

Studienrichtung Vermessungswesen
Technische Universität Wien

**GEOWISSENSCHAFTLICHE
MITTEILUNGEN**

Heft 15

**Prof. Dr. Alois Barvir
zum 80. Geburtstag**

Veröffentlichung des Institutes für Landesvermessung

Geowiss. Mitt.
15, 1979

Wien, 16. Januar 1979

Studienrichtung Vermessungswesen
Technische Universität Wien

**G E O W I S S E N S C H A F T L I C H E
M I T T E I L U N G E N**

Heft 15

**Prof. Dr. Alois Barvir
zum 80. Geburtstag**

Veröffentlichung des Institutes für Landesvermessung

Geowiss. Mitt.
15, 1979

Wien, 16. Januar 1979

Herausgeber, Verleger und
presserechtlich für den Inhalt verantwortlich:

Doz.Dr.K. Peters
Institut für Landesvermessung
Technische Universität Wien

A 1040 Wien, Gußhausstraße 27-29

Copyright: Alle Rechte bei den Verfassern
Einband: Fa. F.Manhardt, Wien
Offsetdruck: ÖH-TU-Vervielfältigung, Wien

INHALTSVERZEICHNIS

Alois BARVIR - 80 Jahre

SCHMID, H.:	Stern- und Galaxienevolution im Spiegel neuer Forschungs- ergebnisse	1 - 168
BRUCKMÜLLER, R., KORSCHINECK, E.:	Testnetz Neue Welt	169 - 192
FÜRST, J.:	Erfahrungen mit der automati- schen Präzisionszeichenanlage Contraves 1700	193 - 204
KORSCHINECK, E., BRUCKMÜLLER, R.:	Laser als Zielhilfe in der Landesvermessung	205 - 220
LEPUSCHITZ, R.:	Anwendung des Monin-Obuchow- Modells zur meteorologischen Reduktion elektronisch gemessener Distanzen	221 - 255
PETERS, K.:	Krustenbewegungsmessungen im Karawankenprofil und an der Torscharte	257 - 307



ALOIS BARVIR – 80 Jahre

Alois Barvir, geb. am 16.1.1899 in Wien als Sohn des Drechslermeisters Franz Barvir und dessen Frau Maria, besuchte die fünfklassige Volksschule, zwei Klassen Bürgerschule und die Staatsrealschule im 8. Wiener Bezirk, Albertgasse. Dort legte er im Juni 1919 die Reifeprüfung mit Auszeichnung ab. Die Kosten hiefür bestritt er selbst durch Nachhilfestunden und Violinspiel. Aus dieser harten Zeit, die auch den Grundstein für seine pädagogischen Fähigkeiten legte, weiß der Jubilar viele Anekdoten zu erzählen.

Vom Herbst 1919 bis Sommer 1924 studierte Barvir an der Bauingenieurschule der Wiener Technischen Hochschule, wo er auch die II. Staatsprüfung im Herbst 1924 bestand.

1925 schloß er den Bund fürs Leben mit einer Wienerin, geb. Litschauer. Dieser Ehe entsproß eine Tochter, die sich dem Dolmetscherberuf zuwandte.

Schon während des Studiums arbeitete Barvir als Ferialtechniker bei der Trassierung und dem Bau der Eisenbahnlinie Friedberg–Pinkafeld. Nach Ende des Studiums war er als Ingenieur bei demselben Bauvorhaben und anschließend als Bauführer bei der staatlichen Eisenbahnbauleitung Ruprechtshofen–Wieselburg–Gresten tätig. Nach Beendigung des Eisenbahnbaues wurde er am 7. Mai 1928 in das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen überstellt.

1928 bis 1930 inskribierte Barvir die für Bauingenieure, welche einen A-Posten im Bundesvermessungsdienst bekleiden sollten, verordnungsgemäß erforderlichen 15 Vorlesungen samt den Übungen der Vermessungsfachschule an der Wiener Technischen Hochschule und legte die Einzelprüfung ab. Stets fühlte er sich aber als Bauingenieur und war auf seine entsprechende Ausbildung stolz. Aus seinem Doppelstudium ergab sich eine große theoretische und praktische Vielseitigkeit, die seine Bekannten erstaunte und seinem Beruf zugutekam.

Als Beamter des BAfEuV war er von 1928 bis 1933 der "Neuvermessungsabteilung", von 1933 bis 1937 der "Triangulierungsabteilung", von 1937 bis 1939 der "Photogrammetrischen Abteilung" und "Topographischen Abteilung" von 1939 bis 1942 wieder der "Triangulierungsabteilung" zugeteilt. Neben seiner Organisationsgabe und Mobilität in jeder Hinsicht kamen ihm dabei auch seine ungewöhnliche körperliche Robustheit und sein Geschick im Umgang mit Mitarbeitern zugute.

Am 6. Mai 1931 legte er die Fachprüfung für den Höheren Vermessungsdienst mit ausgezeichnetem Erfolg ab; am 11. Juli 1936 promovierte er an der TH Wien zum Doktor der technischen Wissenschaften mit dem Thema: "Der Wiener Meridianbogen von Moszin (Polen) bis Monte Hum (Dalmatien)".

Während des 2. Weltkrieges war Barvir in Norwegen tätig, wo er bei der Planung und Projektierung von Eisenbahnbauten eingesetzt war. Für die Zeit vom 2. Juni 1943 bis 22. April 1944 wurde Barvir vom Reichsamt für Triangulierung I. Ordnung angefordert und kehrte 1944 als Leiter der Wiener Triangulierungsabteilung zurück. Danach leitete er die Abteilungen Photogrammetrie und VK/5.

Am 6. Juni 1953 wurde Barvir zum a.o. Professor an der TH Graz ernannt; 1957 erhielt er den Titel eines ordentlichen Hochschulprofessors verliehen, 1959 erfolgte seine Ernennung zum ordentlichen Professor für Geodäsie an derselben Hochschule. Dort lehrte er Ausgleichsrechnung, Angewandte Geodäsie, Aerophotogrammetrie, Höhere Geodäsie II, Angewandte Geophysik und Sphärische Astronomie.

Nach einer siebenjährigen Lehrtätigkeit als Extraordinarius und Ordinarius an der TH Graz wurde Barvir 1960 als Vorstand an das Institut für Landes- und Katastervermessung der TH Wien berufen. Hier lehrte er "Technik des Katasterwesens" (einschließlich Landesvermessung), "Topographie" (einschließlich Reproduktionstechnik) und "Vermessungskunde für Architekten".

Mit großem Geschick erwirkte er die finanziellen Mittel, um sein Institut mit modernen Geräten auszustatten, wobei der

optisch-elektronischen Entfernungsmessung besonderes Augenmerk geschenkt wurde.

Seine wissenschaftlichen Interessen sind seinen Studien und seiner Laufbahn nach immer sehr weit gespannt gewesen. Von Untersuchungen über Analogien zwischen mechanischen Problemen und solchen der Ausgleichsrechnung über die Herstellung von Katasterplänen ebener Gebiete aus Einzelluftbildern reichen seine Interessen bis zur optisch-elektronischen Distanzmessung und Lagerstältenforschung. Die bei seinen Schweremessungen im Grazer Becken zur Erforschung der Grundwasserverhältnisse und seinen gravimetrischen Arbeiten in der Türkei zur Auffindung von Chromerz-Lagerstätten gesammelten Erfahrungen konnte er mit großem Nutzen zur Untersuchung der Schwereverhältnisse im Vorarlberger Rheintal einsetzen.

Sein internationales Ansehen wird unter anderem dokumentiert durch ein 1959 von der "Texas Africa Exploration Company" in New York an ihn gerichtetes Anbot, die Leitung ihrer geophysikalischen Abteilung zu übernehmen sowie durch eine Einladung des ägyptischen Ministeriums für wissenschaftliche Forschungsarbeit im Jahre 1965 nach Kairo, wo er durch drei Monate am National Research Center unterrichtet hat. Seine guten Kenntnisse der französischen und englischen Sprache förderten nicht nur seine beruflichen Kontakte mit dem Ausland; sie waren darüber hinaus mit eine Ursache dafür, daß er auch mehrfach in internationale Gremien berufen worden ist. Als langjähriger Präsident der Kommission VI der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie hat er die Redaktion des von ihr herausgegebenen siebensprachigen Wörterbuches geleitet und am dreisprachigen "Vocabulaire International du Géomètre" mitgearbeitet.

Für das Studienjahr 1965/66 hat ihn das Fakultätskollegium für Naturwissenschaften zum Senator gewählt und für die Periode 1966/67 mit dem Amte des Dekans betraut. Seit langem Mitglied der Österreichischen Kommission für die Internationale Erdmessung, hat er diese immer wieder im Ausland vertreten. Die Fédération International des Géomètres, die Royal Insti-

tution of Chartered Surveyors und die Österreichische Gesellschaft für Photogrammetrie haben ihn durch die Verleihung ihrer Ehrenmitgliedschaft ausgezeichnet. Er ist auch Ehrenmitglied des Ungarischen Vereins für Vermessungswesen. 1972 wurde ihm das Große Silberne Ehrenzeichen für Verdienste um die Republik Österreich verliehen.

Wir hatten seit seiner Berufung als Nachfolger von unserem unvergeßlichen Prof. Dr. Rohrer im Jahre 1960 die uneingeschränkte Freude, seine Assistenten zu sein. Er war schlicht und einfach das Vorbild eines Chefs, Launen waren ihm unbekannt, Ausgewogenheit, Freundlichkeit und Hilfsbereitschaft waren sein Normalzustand. Verwaltungsformalismus waren ihm stets ein Greuel und wir haben neben vielen anderen sehr nützlichen Weisheiten auch die gelehrt erhalten, daß sich viele, ja die meisten Akte dadurch erledigen, daß man sie nicht zu rasch bearbeitet.

Dabei konnte man den hohen Wirkungsgrad seiner Arbeitsweise z.B. bei der unauffälligen aber höchst erfolgreichen Organisation des Wiener FIG Kongresses 1962 bewundern.

Spätestens zu diesem Anlaß wurde klar, daß der Jubilar nicht nur ein Lebenskünstler war, der vielen als Vorbild diente, wenn er im Uralt-VW durch die Lande reiste, sondern auch ein Arbeitskünstler, der in allen Bedrängnissen den ruhenden Pol bildete und mit sicherem Blick für das Wesentliche ohne viel Aufhebens unser Institutsschifflein aus der Heldenzeit in die Neuzeit steuerte.

Sein Interesse und auch sein Wissen waren überaus breit gestreut, er wußte stets bis ins hohe Alter konstruktiv an Diskussionen aller Fachgebiete mitzuwirken.

Auch jetzt noch stellt er seine Arbeitskraft und Erfahrung dem Professorenverband zur Verfügung.

Seine bekannten gesellschaftlichen Talente sind sicher auch eine Folge seiner stets wachen Aufnahmebereitschaft und seiner Freude daran, Wissen möglichst effizient weiterzugeben, ob es nun "nur" Feinschmeckerstätten in aller Welt

oder andere Sehenswürdigkeiten sind. Seine Lebensweisheit zeigte sich in den Anekdoten, welche er als Mittelpunkt einer Gesellschaft zum besten gab, ebenso wie in der Hilfe, die er allenthalben bei den vielschichtigsten Problemen seinen Mitarbeitern und Freunden zukommen ließ; er förderte seine Assistenten, indem er ihnen zu einer Zeit, wo eher das Gegenteil selbstverständlich war, seine Auslandskontakte vermittelte, und ist ein begeisterter Großvater.

Barvir war und ist im Alltag, bei seinen über viele "fachfremde" Wissensgebiete gestreuten Interessen, und auch bei gesellschaftlichen Ereignissen stets eines geblieben: souverän und ein echter Gentleman.

G. Schmidt

alluvor P. Venzler K. Müller

Geowiss. Mitt. 15

1979, 1 - 168

STERN- UND GALAXIENEVOLUTION
IM SPIEGEL NEUER FORSCHUNGSERGEBNISSE

von

H. SCHMID

O.Univ.Prof. Dr. Hans SCHMID, Vorstand des
Instituts für Landesvermessung der Technischen Univ. Wien
1040, Gußhausstraße 27 - 29

INHALTSVERZEICHNIS

0. EINLEITUNG (0)

1. STERNEVOLUTION (1)

1.1. DERZEITIGER STAND DER STERNKOSMOGONIE (1)

1.1.1. DIE CHARAKTERISTIK VON STERNEN (1), Helligkeit (2), Distanz (2), Farben (2), Spektren (2), Harvard Klassifikation (2), Sterngröße und Sternmasse (3), Chemische Zusammensetzung (4), Masse-Leuchtkraftrelation (4), Hertzsprung-Russel-Diagramm (5).

1.1.2. STERNFAMILIEN (6), Sternpopulationen (7), Chemische Zusammensetzung (7), Bewegungen (7), Veränderliche Sterne (8), Explodierende Sterne (10), Novae (10), Supernovae (10), Besonderheiten des Spektrums (11).

1.1.3. DER AUFBAU DER STERNE (11), Sternmaterie (11), Energieübertragung, Energieproduktion in Sternen, Sternmodelle (13).

1.1.4. DIE GEBURT DER STERNE UND IHR VERWEILEN AUF DER HAUPTSEQUENZ (15) - Bewegung im interstellaren Medium (15), Einflüsse von Hitze, magnetischer Energie, Rotationsenergie auf Kondensation (16), Kondensationsmöglichkeiten (17), Fragmentation (17), Sternkontraktion (18), Rotation und Magnetfeld (21), Hauptsequenz, Ende der Kontraktion (21).

1.1.5. DIE GEBURT SEHR MASSEREICHER STERNE (26)

1.1.6. DAS STADIUM DER ROTEN RIESEN UND DIE ENDPHASEN (28) UHS-Sternevolution (28), Weißer Zwerge (31), Novae und Planetarische Nebel (31), OHS-Sterne, Weiterentwicklung und Ende (33).

1.1.7. SUPERNOVAE, NEUTRONENSTERNE, SCHWARZE LÖCHER, RÖNTGENSTERNE, DOPPELSTERNE (35) Supernovae (35), Neutronensterne (Pulsare) (37), Schwarze Löcher (40), Doppelsterne - Röntgensterne (45).

- 1.2. DIE PROTOSTERNHYPOTHESE (52)
 - 1.2.1. NICHTSTATIONARITÄT (52)
 - 1.2.2. ENTSTEHEN DIE STERNE AUS DIFFUSER MATERIE ? (53)
 - 1.2.3. EINE NEUE THEORIE DER STERNENTSTEHUNG?(55)
 - 1.2.4. OFFENE FRAGEN UND AUSBLICKE (57)
Die Kosmogonie auf der Suche nach der Theorie (60)

2. PROBLEME DER GALAXIENENTWICKLUNG (60)
 - 2.1. ÜBERBLICK ÜBER DIE EXISTIERENDEN HYPOTHESEN (63)
 - 2.2. ÜBER DIE KERNE DER GALAXIEN (64)
 - 2.3. RADIOGALAXIEN (64)
 - 2.4. QUASARE UND BL LACERTIDEN (69)
 - 2.5. SEYFERT- UND N-GALAXIEN (73)
 - 2.6. MARKARJAN-GALAXIEN (73)
 - 2.7. DIE ENTWICKLUNG DER GALAXIEN (74)
 - 2.8. GALAXIENHAUFEN (77)

3. DIE URKNALLTHEORIE (BIG BANG) - DER URSPRUNG DES WELTALLS (79)
 - 3.1. ZUR ENTDECKUNGSGESCHICHTE (79)
 - 3.2. DIE THEORIE DER HINTERGRUNDSTRAHLUNG (80)
 - 3.2.1. DIE HINTERGRUNDSTRAHLUNG UND DIE ERDBEWEGUNG IM GESAMTKOSMOS (85)
 - 3.3. DIE ERSTEN MINUTEN DES KOSMOS (87)
 - 3.3.1. DAS HEISSE UNIVERSUM - DIE URSUPPE (87)
 - 3.3.2. DIE ERSTEN MINUTEN (91)
 - 3.3.3. DIE ERSTE HUNDERTSTEL SEKUNDE (94)

- 4. KOSMOLOGISCHE MODELLE (96)
 - 4.1. NICHTMATHEMATISCHE MEINUNGEN UND THESEN (96)
 - 4.2. KOSMOLOGISCHE THEORIEN (98)
 - 4.2.1. DAS EXPANDIERENDE WELTALL - SINGULARITÄT (99)
 - 4.2.2. ANDERE HYPOTHESEN (103)
 - 4.2.3. ÜBERSICHT DER KOSMOLOGISCHEN MODELLE (105)
 - 4.3. DIE RELATIVISTISCHEN WELTMODELLE (106)
 - 4.3.1. EINIGE MATHEMATISCHE GRUNDBEGRIFFE (106)
 - 4.3.2. DIE FRIEDMANNSCHEN WELTMODELLE (107)
 - 4.3.3. WELTMODELLE UND WIRKLICHKEIT (114)
 - 4.3.4. MATERIEDICHTE, ALTER DER CHEMISCHEN ELEMENTE UND DEUTERIUMHÄUFIGKEIT (116)

- 5. KONTAKT MIT EXTRATERRESTRISCHEN ZIVILISATIONEN? (118)
 - 5.1. MINIMALCHANCE FÜR DAS LEBEN - DIE ÖKOSPHERE DER STERNE
Die Erdatmosphäre (119) Die Ökosphäre der Sterne (120)
Ein Planet und seine kontinuierlich bewohnbaren Zonen (120).
 - 5.2. ALTERNATIVE LEBENSFORMEN (121)
 - 5.3. WO UND WIE ZAHLREICH SIND INTELLIGENZEN IN UNSERER GALAXIS ANZUTREFFEN (122)
Drei Hypothesen (128) Asteroidengürtel (130)
 - 5.4. PROJEKT CYCLOPS (130)

GLOSSAR (SCHLAGWÖRTER) (133)

INHALTSVERZEICHNIS (I)

LITERATURVERZEICHNIS (V)

TABELLEN EINIGER NATURKONSTANTEN (VIII)

QUELENNACHWEIS FÜR TAFELN UND ABBILDUNGEN (XIV)

SYMBOLE (XV)

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Probleme der modernen Kosmologie V.A. AMBARZUMJAN und Mitarbeiter, Birkhäuserverlag Basel und Stuttgart
- [2] Doppelsterne mit bewohnten Planeten M.HAHN, Bild der Wissenschaft, Heft 12, 1977
- [3] The Birth of Massive Stars M.ZEILIK, Scientific American, April, 1978
- [4] Stellar Evolution A.J.MEADOWS, Verlag Pergamon
- [5] Lebenslauf des Doppelsternes R.BREUER, Bild der Wissenschaft, Heft 9, 1976
- [6] X-Ray from Supernova Remnants Ph.A.CHARLES and J.L. CULHANE, Scientific American, December, 1975
- [7] The Search for Black Holes K.S.THORNE, Scientific American, December, 1974
- [8] X-Ray emitting Double Stars H.GURSKY and E.P.J.van den HEUVEL, Scientific American, March, 1975
- [9] X-Ray Stars in Globular Clusters G.W.CLARK, Scientific American, October, 1977
- [10] Vom Sterben der Sterne H.ELSÄSSER, Bild der Wissenschaft, Heft 5, 1976
- [11] Weiße Zwerge - Schwarze Löcher R.U.SEXL und H.SEXL (Vorabdruck eines Taschenbuches)
- [12] Die ersten drei Minuten St.WEINBERG, Piper Verlag

- [13] Die Physik Schwarzer Löcher Kosmologie Journal, Heft 1, 1977, S.HAWKING, 1974
- [14] Licht vom Ende der Welt, Quasare R.BREUER, Bild der Wissenschaft, Heft 7, 1978
- [15] Rich Clusters of Galaxis P.GORNSTEIN and W.TUCKER, Scientific American, November, 1978
- [16] Cosmic Radio Waves J.S.SHKLOVSKY, Cambridge, Mass. 1960
- [17] Astrophysik II H.SAUTTER, Gustav Fischer-Verlag
- [18] Kontakt mit den Sternen R.BREUER, Muschan-Verlag
- [19] Handbuch über das Weltall (MEYER's) K.SCHAIFERS und G.TRAVING
- [20] Zur Entdeckungsgeschichte der kosmischen Hintergrundstrahlung J.HERMMANN, Sterne und Weltraum, 1977/1
- [21] The Cosmic Background Radiation and the New Aether Drift R.A.MULLER, Scientific American, May, 1978
- [22] Die neue Kosmologie v.d. OSTEN-SACKEN, Eecon Verlag, 1974
- [23] Über kosmologische Modelle H.SCHMID, Festschrift Prof. Dr.F.KOBOLD zum 70.Geburts- tag, Vermessung, Photogram- metrie, Kulturtechnik, III/IV, 75
- [24] General Relativity and Cosmologie G.C.Mc.VITTIE, London, 1965
- [25] Some Consequences of Large Redshifts G.C.Mc.VITTIE, Astrophy- sical Journal, No.4, 1965
- [26] Will the Universe expand forever J.R.GOTT III, J.E.GUNN, D.N.SCHRAMM, B.M.TINSLEY, Scientific American, March, 1976

- [27] Communication with Extraterrestrial Intelligences (CETI) C.SAGAN, The M.I.T.-Press, Cambridge, Massachusetts and London
- [28] Gravitation und Kosmologie R.U.SEXL und URBANTKE, B.J. Verlag
- [29] Relativitätstheorie H.MELCHER, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1974, 4.Auflage
- [30] 100 Milliarden Sonnen R.KIPPENHAHN, Piper-Verlag, 1980
- [31] Gravitation and Cosmology St.WEINBERG, John Wiley & Sons, 1972
- [32] Gravitation Ch.MISNER, K.THORNE, J.A.WHEELER, Freeman & Comp., SF 1973

TABELLE EINIGER NATURKONSTANTEN

(Die Zahlen in der Klammer geben die Standardabweichung in Einheiten der letzten angegebenen Dezimale an.)

Normwert der Fallbeschleunigung

$$g_n = 9,806 \quad 65 \text{ m.s}^{-2} \text{ (exakt)}$$

Gravitationskonstante

$$G = 6,6732 \text{ (31)} \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2} \text{ kg}^{-1} = \\ = 6,6732 \text{ (31)} \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-2} \text{ g}^{-1}$$

Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2,997 \ 925 \ 0 \text{ (10)} \cdot 10^{10} \text{ cm s}^{-1}$$

$$\epsilon_0 \text{ elektr. Feldkonstante} = 8,859 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^2$$

$$\mu_0 \text{ magnetische Feldkonstante} = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-2} \text{ N s}^2 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ Vs} \text{ \AA}^{-1}$$

Planck-Konstante (Wirkungsquantum)

$$h = 6,626 \ 196 \text{ (50)} \cdot 10^{-34} \text{ J.s} \\ = 6,626 \ 196 \text{ (50)} \cdot 10^{-27} \text{ erg.s}$$

$$1 \text{ erg.s} = 1 \text{ g cm}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,054 \ 591 \ 8 \dots \text{ g cm}^2 \text{ s}^{-1}$$

Boltzmann-Konstante

$$k = 1,380 \ 622 \text{ (59)} \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1} = 1,380 \ 622 \cdot 10^{-16} \text{ erg K}^{-1} \\ = 8,616 \cdot 10^{-5} \text{ eVK}^{-1}$$

Loschmidt-Konstante

$$L = 6,022 \ 169 \text{ (40)} \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} \text{ (Anzahl der Gasmoleküle pro Mol)}$$

Gaskonstante

$$R = k \cdot L = 8,314 \ 34 \text{ (35)} \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

Elementarladung (Ladung d. Elektrons)

$$e = 1,602 \ 191 \ 7 \text{ (70)} \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad \text{C} = \text{Coulomb} = 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s} = \text{auch } 1 \text{ Coul}$$

Stefan-Boltzmann-Konstante

$$= 5,669 \cdot 10^{-5} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-4}$$

TABELLE EINIGER MASSEN

Die Massen sind in Gramm (g), der Schwarzschildradius $R = \frac{2MG}{c^2}$ in cm angegeben.

A bedeutet die Baryonenzahl. Diese ist normalerweise gleich der Zahl der in der Masse enthaltenen Nukleonen (Protonen, Neutronen). Bei Neutronensternen liegen kompliziertere Verhältnisse vor.

Atomphysikalische Masseneinheit

$$1 \mu = 1,660\,531\,(11) \cdot 10^{-24} \text{ g}$$

Elektronenruhemasse

$$m_e = 5,485\,930\,(34) \cdot 10^{-4} \mu = 9,109\,558\,(54) \cdot 10^{-28} \text{ g}$$

Ruhemasse des leichten H-Atoms

$$m_H = 1,007\,825\,22 \mu = 1,673\,43 \cdot 10^{-24} \text{ g}$$

Protonenruhemasse

$$m_p = 1,007\,276\,61\,(8) \mu = 1,672\,614\,(11) \cdot 10^{-24} \text{ g}$$

Neutronenruhemasse

$$m_n = 1,008\,665\,20\,(10) \mu = 1,674\,920\,(11) \cdot 10^{-24} \text{ g}$$

Erde $6 \cdot 10^{27} \text{ g}$

Sonne (M_\odot) $2 \cdot 10^{33} \text{ g}$

Kugelsternhaufen $10^6 M_\odot$

Galaxis $1,5 \text{ bis } 2 \cdot 10^{11} M_\odot$

Galaxienhaufen $10^{14} M_\odot$

Universum 10^{10} Galaxien $= 10^{21} M_\odot$

R
Schwarzschild-
radius (cm)

L.J.

A

$$1,35 \cdot 10^{-55} \text{ cm}$$

-

$$2,48 \cdot 10^{-52} \text{ cm}$$

1

$$0,9 \text{ cm}$$

$$3,6 \cdot 10^{51}$$

$$3 \cdot 10^5 = 3 \text{ km}$$

$$1,2 \cdot 10^{57}$$

$$10^{11} = 10^6 \text{ km}$$

$$10^{63}$$

$$10^{16} = 10^{11} \text{ km}$$

$$10^{-2}$$

$$10^{68}$$

$$10^{19} = 10^{14} \text{ km}$$

$$10$$

$$10^{71}$$

$$10^{27} = 10^{22} \text{ km}$$

$$10^9$$

$$10^{78}$$

|
×
|

LÄNGEN, $t(s)$ ist die Zeit, die das Licht benötigt, diese Strecke zu durchlaufen.

1 Parsec (pc)	= 3,26 L.J.	= $3,084 \cdot 10^{13}$ km	= $3,084 \cdot 10^{18}$ cm
1 Lichtstunde		= $1,08 \cdot 10^9$ km	
1 Lichttag		= $2,59 \cdot 10^{10}$ km	
1 Lichtmonat		= $7,78 \cdot 10^{11}$ km	
1 Lichtjahr		= $9,4673 \cdot 10^{12}$ km	$\approx 10^{13}$ km
1 Astronomische Einheit (AE)	= $1,5 \cdot 10^8$ km		
Erdradius		$6,4 \cdot 10^3$ km	$t(s) = 2 \cdot 10^{-2}$ s
Sonnenradius		$7 \cdot 10^5$ km	= 2,3 s
Kugelsternhaufen		10^{15} km	$\doteq 10^2$ L.J. = $3 \cdot 10^9$ s
Galaxis		10^{18} km	$\doteq 10^5$ L.J. = $3 \cdot 10^{12}$ s
Universum		$2 \cdot 10^{23}$ km	$\doteq 2 \cdot 10^{10}$ L.J. = $6 \cdot 10^{17}$ s

ZEITEN

1 Jahr	= $3,15 \cdot 10^7$ s		
Erdalter	$1,4 \cdot 10^{17}$ s	$\doteq 4,5 \cdot 10^9$ Jahre	
Alter d. Universums	$6 \cdot 10^{17}$ s	$\doteq 2 \cdot 10^{10}$ Jahre	

LEUCHTKRAFT (der Sonne)

$$L_{\odot} = 4 \cdot 10^{33} \text{ erg s}^{-1} = 4 \cdot 10^{12} \text{ g s}^{-1} \text{ cm}^2$$

TEMPERATUREN

$$kT = E$$

$$1^{\circ}\text{K} = 1,38 \cdot 10^{-16} \text{ erg} = 8,65 \cdot 10^{-5} \text{ eV}$$

$$1 \text{ eV} = 1,16 \cdot 10^4 \text{ K} = 1,602 \cdot 10^{-12} \text{ erg}$$

$$v = \frac{3kT}{m} \quad v \dots \text{Molekulargeschwindigkeit in Funktion der Temperatur und der Teilchenmasse}$$

SONSTIGE PHYSIKALISCHE EINHEITEN BZW. GRÖSSEN

$$1 \text{ Newton (N)} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m/s}^2 \quad (\text{Kraft})$$

$$1 \text{ Pascal (Pa)} = 1 \text{ N/m}^2 \quad (\text{Druck})$$

$$1 \text{ techn. Atmosphäre (at)} = 98\,066,5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ phys. Atmosphäre (atm)} = 101\,325 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Joule (J)} = 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m} = 10^7 \text{ erg} = \frac{1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m}^2}{\text{s}^2}$$

$$1 \text{ erg} = \frac{1 \text{ g} \cdot 1 \text{ cm}^2}{\text{s}^2} = 6,242 \cdot 10^{11} \text{ eV}$$

1 mol = Mol ist die Stoffmenge eines Systems, das gleichviel Teilchen enthält, wie Atome in 12 g Kohlenstoff 12 enthalten sind.

$$1 \text{ Coulomb} = 1 \text{ C, auch } 1 \text{ Coul} = 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s}$$

$$1 \text{ Ampère} = 1 \text{ A} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Nm}^{-1}$$

$$1 \text{ Volt} = 1 \text{ W} \cdot 1 \text{ A}^{-1} = 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m} \cdot 1 \text{ C}^{-1} = 1 \text{ J} \cdot 1 \text{ C}^{-1}$$

$$1 \text{ Watt} = 1 \text{ J} \cdot 1 \text{ s}^{-1}$$

1 eV ist die Energie, die ein Elektron beim Durchlaufen eines Spannungsgefälles von 1 V gewinnt und ist

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-12} \text{ erg} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Energien:

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}; \quad E = k \cdot T \quad \text{daher} \quad \nu = \frac{\text{const.}}{T}$$

$$1 \text{ Photon mit } \lambda = 1 \text{ cm} \text{ besitzt eine Energie von } 1,24 \cdot 10^{-4} \text{ eV} \\ = 1,98 \cdot 10^{-16} \text{ erg}$$

$$1 \text{ Photon mit } \lambda = 5 \cdot 10^{-5} \text{ cm (sichtbares Licht) hat eine} \\ \text{Energie von } 1,24 \cdot 10^{-4} / 5 \cdot 10^{-5} = 2,5 \text{ eV}$$

Laut Plankschem Strahlungssatz Gl. (15) ist die mittlere Wellenlänge bei welcher die Schwarze Strahlung ihr Energiemaximum hat, bei 1° K gleich $\lambda = 0,29 \text{ cm}; \quad \lambda = \frac{0,29 \text{ cm}}{1 \text{ K}};$ dies folgt aus der Gl. (15).

$$\text{Das Maximum von } \nu \text{ liegt bei } \nu = 0,2014052 \text{ hc/kT}$$

bei $T = 300 \text{ K}$ (Zimmertemperatur) emittiert ein Schwarzkörper eine Strahlung von $\lambda = \frac{0,29}{300} = 0,001 \text{ cm}$ (infrarot)

bei $T = 5800 \text{ K}$ (Sonnenoberfläche) ist $\lambda = \frac{0,29}{5800 \text{ K}} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$
d.h., das Energiemaximum liegt im Bereich des sichtbaren Lichtes.

Für die Schwarze Strahlung gilt ferner:

$$Z_{\text{ph}} \text{ (Anzahl der Photonen) in einem bestimmten Volumen} \\ 20,28 T^3 / \text{cm}^3 \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \text{Energiedichte} &= 4,72 \text{ eV/Liter für } T = 1^{\circ} \text{ K} \\ &47,200 \text{ eV/Liter für } T = 10^{\circ} \text{ K} \\ &380 \text{ eV/Liter für } T = 3^{\circ} \text{ K (Hintergrund-} \\ &\text{strahlung)} \end{aligned}$$

Energien von chemischen Reaktionen liegen bei 1 eV/Atom bzw. Elektron.

Beispiel: $13,6 \text{ eV}$ sind nötig, um das Elektron aus dem H-Atom herauszuschließen.

Die Photonen im Sonnenlicht haben ebenfalls eine Energie von etwa 1 eV (dadurch können sie die lebenswichtige Photosynthese auslösen).

Eie Energie von Kernreaktionen liegt bei etwa $10^6 \text{ eV/je Atomkern} = 1 \text{ MeV}$ (deshalb hat 1 kg Plutonium ungefähr die Sprengkraft von 10^6 kg TNT).

QUELLENACHWEIS FÜR TAFELN UND ABBILDUNGEN:

TAFEL 1	aus "Offener Himmel"	von H. HABER Photo von der Schweizerischen Astronom. Gesellschaft
TAFEL 2	aus "Weltall"	Photo vom Mount Wilson u. Palomaral Observatorium von William C. MILLER
TAFEL 3	aus "Weltall"	Photo vom Mount Wilson u. Palomaral Observatorium von William C. MILLER
TAFEL 5	aus "Weltall"	"
TAFEL 6	aus "Weltall"	" Nino CARBE
TAFEL 7	aus "Weltall" und aus [1]	" (oberes Bild) (unteres Bild)
TAFEL 8	aus [1]	
TAFEL 9	aus "Erforschung der Galaxien"	von Simon MITTON Photo vom Hale Observatorium
TAFEL 9a	aus [1]	
TAFEL 10	aus "Erforschung der Galaxien"	Photo von der Royal Astronomical Society
TAFEL 11	aus [1]	
TAFEL 12	aus [1]	
TAFEL 13	aus [1]	
TAFEL 14	aus [1]	
TAFEL 15	aus "Offener Himmel"	von H. HABER Photo von Klaus BÜRGLER

SYMBOLE

a	Basis für die Relation Helligkeit-Sterngröße (Magnitude)
A	Baryonenzahl, Ampère
c	Vakuumllichtgeschwindigkeit
C	$\frac{8}{3} G \cdot \rho \cdot R_0^3$, Coulomb
D	Distanz (i.a.)
\mathcal{D}	Funktion für die Übergangskoeffizienten nach Mc VITLIE
e	Basis vom ln, Abkürzung für Elektron (eV = Elektronenvolt), auch elektronische Elementarladung
E	Energie
g	Fallbeschleunigung bzw. Gravitationskomponente g_{ik}
G	Gravitationskonstante
h	PLANCKsches Wirkungsquantum
\hbar	$h/2\pi$
H(t)	HUBBLE-Konstante (zeitabhängig)
J	Joule
k	BOLTZMANN-Konstante, Krümmungsparameter ($0, \pm 1$)
K	°KELVIN
l	Länge (i.a.)
L	Leuchtkraft (L_0 Sonnenleuchtkraft)
m	Magnitude (Sterngrößenklasse)
m	kleine Massen (im Vergleich zu großen Massen in einer Formel), Meter
m_e	Elektronenmasse, m_p Protonenmasse
M	große Masse in einer Formel mit kleinen Massen ($M_0 =$ Sonnenmasse)

M_{ph}	Wahre Helligkeit
n	Baryonendichte
N	Anzahl von Teilchen in einer Volumseinheit, NEWTON (Krafteinheit)
p	Druck, relativistisch p/c^2
pc	Parsec, $M_{pc} = \text{Megaparsec} = 10^6 pc$
P_a	Pascal (Druckeinheit)
$q(t)$	Vergrößerungsfaktor der kosmischen Expansion (zeitabhängig)
r	Abstand zweier kosmischer Objekte
$R(t)$	Weltkrümmungs-Radius (zeitabhängig)
R	Gaskonstante
s	Sekunde
S_i	Strahlungsströme
S_e	Entropie
t	Zeit, ($t_2 - t_1 = \text{Zeitdifferenz}$)
t_{exp}	Expansionszeit
t_c	Kontraktionszeit (der Sterne)
t_w	Weltperiode (im oszillierenden Kosmos)
T	Absolute Temperatur (KELVIN)
u	Energiedichte (der Protonen)
V	Volt
W	Watt
x, y	Koordinaten (i.a.)
X, Y	detto
Z	Rotverschiebungsfaktor
Z_s	detto, senkrecht zur Ausbreitungsrichtung
R	Schwarzschildradius
α	proportional zu ...

ϵ_0	elektrische Feldkonstante
η_{ik}	Symbol für cartesisches Koordinatensystem (z.B. $g_{ik} = \eta_{ik}$)
α	$8\pi G/c^2 = 3 C/\rho_0 c^2 R_0^3$, auch Absorptionskoeffizient
λ	Wellenlänge, kosmologische Konstante
$\Lambda = \lambda \cdot c^2$	(relativistische) kosmologische Konstante
m	atomphysikalische Masseneinheit
ν	Frequenz der elektromagnetischen Strahlung
π''	Sternparallaxe (jährlich)
ρ	Dichte
σ	Dichteparameter, Stefan-Boltzmann-Konstante
τ	spezielle Zeitangaben (z.B. bei Neutronensternen)
ω	Winkelgeschwindigkeit

O. V O R W O R T

Seit jeher waren die Sterne für die Menschen das Symbol des Unveränderlichen, Ent-rückten und der Inbegriff der Ewigkeit.

Dem Geodäten dienten sie als absolutes Orientierungs- und Bezugssystem, so wie sie schon immer als Grundlage der Navigation und auch sogar zur Vorhersage persönli-cher Schicksale galten.

Den alten Griechen bedeutete das Weltall in seiner Gesamtheit, der "Kosmos" genannt, ("geordnetes Ganzes") die Alternative zum "Chaos". Schon immer glaubte man die Ord-nungsprinzipien dieser unserer Umwelt (im weitesten Sinne) zu kennen; trotzdem wurden alle Natur- und auch Geisteswissenschaften durch den Drang nach weiterer Er-forschung des Sternenhimmels und seiner Gesetze zu allen Zeiten bis ans äußerste gefordert und gefördert.

So wie unsere irdischen Festpunkte sich als veränderlich erwiesen, und aus der Lan-desvermessung heraus über geologisch-geophysikalische Überlegungen und geodätische Messungen schließlich die neueren tektonischen Theorien zustandekamen, welche teil-weise alte Mythen, teilweise geniale empirische Vorstellungen rechtfertigen, so zeigen auch die neuen astronomischen Meßtechnologien die Eigenbewegungen der früher als fest gedachten Himmelskörper, die Expansion des Raumes und führen teilweise zum wissen-schaftlichen Modell eines Schöpfungsaktes.

Kosmologie und Kosmogonie, die Wissenschaften vom Weltall und seiner Entstehung, sind heute durch eine Anzahl populärwissenschaftlicher Bücher schon ein verbreitetes Hobby geworden. Die Faszination, den Gedankenprozeß bis zum Ursprung von Raum und Zeit nachzuvollziehen, macht dies verständlich.

Anläßlich meiner Antrittsvorlesung an unserer Universität habe ich mich damit bekannt- und seither vertraut gemacht. Die einzelnen Bücher hierüber sind oft sehr persönlich geschrieben, so daß ein Suchen nach objektiven Erkenntnissen bald mit dem Einlesen in immer abstraktere Fachliteratur und Diskussion mit akademischen Fachleuten verbun-den sein mußte, was mein Interesse aber immer mehr vertiefte.

Diese Zusammenfassung ist aus dem Wunsch des Jubilars, Herrn Emer.O.Univ.Prof. Dr. Alois BARVIR entstanden, die Manuskripte meiner bisher gehaltenen Vorträge, etwa ein Dutzend an der Zahl, zusammenzufassen und in dieser Festschrift zu veröffentlichen. Dieser Versuch erwies sich alsbald als undurchführbar, so daß ich beschloß, eine Gesamtdarstellung des mir bekannten Standes der astrophysikalischen Forschung zu bringen.

Frau Doz. Dr. Maria FLRNEIS vom Institut für Astronomie der Universität Wien danke ich ganz besonders, einerseits für die vielen wertvollen Hinweise und Anregungen und an-dererseits für die Korrekturlesung des umfangreichen Manuskripts und des Mathematischen Anhangs.

Bei der Herstellung des Manuskripts haben mich ferner zu Dank verpflichtet die Herren Doz. PETERS durch kritische Durchsicht, G. THIER durch die Anfertigung der Zeichnungen, E. FLICKER durch die Beschaffung der Reproduktionen.

Ganz besondere Verdienste hat sich Frau Ilse POLESK durch die mühevollen Reinschrift erworben.

Ich habe immer wieder betont und tue dies auch hier, daß ich keineswegs ein "gelernter Astrophysiker" bin, jedoch habe ich seit einem Jahrzehnt mit größtem Interesse die Forschungsergebnisse verfolgt, so daß ich glaube, mit dieser Arbeit dem interessierten Laien einen generellen Überblick über den derzeitigen Stand der Forschung in einigen Bereichen der Astrophysik geben zu können. Ich hoffe vor allem, dem Wunsche des Jubilars entsprochen zu haben.

URKNALL - STERNE - GALAXIEN - EXTRATERRESTRISCHE
(ZUSAMMENSCHAU 1979)

1. STERNEVOLUTION

1.1. DERZEITIGER STAND DER STERNKOSMOLOGIE

Es sei die schon fast klassisch zu nennende Sternentstehungstheorie, welche auf v. WEIZSÄCKER, HOYLE u.a. zurückgeht, beschrieben: Es ist seit den frühen Tagen der Sternentwicklungsgeschichte angenommen worden, daß Sterne ihren Ursprung in den diffusen Gas- Staubmassen im interstellaren Raum haben müßten. Es ist schwer einzusehen gewesen, woher sie sonst kommen sollten und es wurde und wird noch immer von einem großen Teil der Wissenschaftler behauptet, daß es genügend Anhaltspunkte durch Beobachtung für diese Kondensationstheorie gäbe. Es soll jedoch auch die neuere, nicht unwidersprochene und eigenwillige Theorie, die vor allem von V. AMBARZUMJAN [1] und seiner Schule entwickelt wurde und den praestellaren Materiezustand betrifft, kurz erläutert werden.

Man betrachte folgende Argumente: Die Lebensspanne eines Sterns hängt grundsätzlich von zwei Faktoren ab: der emittierten Energie in der Zeiteinheit und der Gesamtenergie, die zur Emission zur Verfügung steht. Der erste Faktor ist eng korreliert mit der Sternhelligkeit, der zweite offenbar mit der Gesamtmasse des Sterns, genauer Wasserstoffmasse, die für den Nuklearprozeß zur Verfügung steht, welche aber offenbar proportional zur Gesamtmasse des Sterns ist. Der Vergleich von der Helligkeit mit der Masse gibt natürlich nur einen Näherungswert für das Sternalter an, da ja bekanntlich die Helligkeit eines Sterns vom Geburtstag bis zum Ende seines Weges auf der Hauptreihe konst. bleibt.¹⁾

Noch etwas wichtiges ist in diesem Zusammenhang festzustellen: wenn wir besonders helle Sterne betrachten, die millionenfach mehr Energie in der Zeiteinheit emittieren als etwa unsere Sonne, so haben diese wesentlich mehr nukleare Reserven als etwa unsere Sonne, dennoch ist dieses Mehr an Masse kein ausreichendes Gegengewicht zu deren Energieverlust und ihr Leben ist viel kürzer - nur hunderte Millionen Jahre - im Vergleich zu der etwa 10 Milliarden Jahre Lebenszeit unserer Sonne. Die sehr hellen Sterne in unserer Galaxie sind also sehr junge und kurzlebige Sterne. Tatsächlich beobachten wir in unserer Galaxie die Geburt von Sternen, wobei diese Protosterne sich immer inmitten von Gas- Staubwolken befinden. Später verschwindet diese Wolke nach und nach und der Stern bleibt über. Auch dieses Stadium ist beobachtet worden, so sagen die Verfechter der Kondensationstheorie, wie wir diese Theorie nennen wollen. Die Erklärung für das Verschwinden der Gaswolke wird der Strahlungsenergie des nunmehr hellen Sterns zugeschrieben. Diese Strahlungsenergie in den verschiedenen Frequenzbereichen kann mit Hilfe von Meßstationen, je nach Wellenlänge auch in Satelliten gemessen werden.

Es soll im folgenden versucht werden, die wesentlichen Stationen und Fakten der Sternentstehung aufzuzeigen.

1.1.1. DIE CHARAKTERISTIK VON STERNEN

Das Studium der Sternentwicklung hat gewisse Analogien zum Studium der biologischen Evolution:

- a) Die Forschung in beiden Disziplinen begann etwa zur gleichen Zeit (2. Hälfte des letzten Jahrhunderts).
- b) Zuerst war die Charakteristik von allen möglichen Arten (Pflanzen, Tieren, Sternen, Galaxien ...) zu studieren.
- c) Die Charakteristika sind zu selektieren und ein Klassifikationssystem ist aufgrund dieser aufzubauen, wobei die Klassifikation physikalische Signifikanzen aufweisen muß. Dies ist einer der wichtigsten Schritte in der naturwissenschaftlichen For-

¹⁾ Dies ist größenordnungsmäßig zu verstehen. Geringe Temperaturänderungen (5. Kapitel) sind nicht auszuschließen. Hauptreihe ist jener Zeitraum im Sternleben, in welchem er ein stabiles Verhalten zeigt.

schungstätigkeit.

Bislang ist von Evolution noch nicht die Rede, da die Klassifikation voraussetzt, daß die Objekte ihre Eigenschaften beibehalten. Aber sowohl in der Biologie, als auch in der Kosmogonie existieren Objekte, welche sich einer eindeutigen Zuordnung zu wohldefinierten Gruppen widersetzen. Gerade das Studium dieser "Außenseiter-Objekte", man nennt sie auch gerne "missing links" ist der wichtigste Teil, sowohl in der Kosmogonie als auch in der Biologie. Die Erkenntnis, daß ausgerechnet jene VERÄNDERLICHEN sowohl im Bereich der Stellarforschung als auch im Bereich der Galaxienforschung wichtige Hinweise auf die Evolution der Systeme geben können, haben in den letzten Jahren zu beachtlichen Erfolgen geführt. Weitere Analogien bestehen z.B. in der Tatsache, daß evolutionäre Veränderungen in Gruppen entstehen. Allerdings verstehen wir in der Kosmogonie der Sterne auch die Entwicklungsstadien des Einzelobjektes als evolutionären Vorgang. Wir wollen nun die wichtigsten Charakteristika für die Sternevolution klarstellen.

HELLIGKEIT UND DISTANZ

Distanzmessungen gehören zu den wichtigsten Aufgaben in der gesamten Astronomie. Von ihren Ergebnissen hängen entscheidende Aussagen über den Kosmos ab. Auf die vielfachen Methoden, wie etwa physikalische, mit Hilfe der Rotverschiebung oder mit Hilfe von "Veränderlichen Sternen" usf., soll nur hingewiesen werden. Bezüglich der Helligkeit ist festzustellen, daß das Verhältnis maximale Sternhelligkeit : minimale Sternhelligkeit = $10^{11} : 1$ beträgt. Hier ist zu beachten, daß die Gesamthelligkeit nicht nur den sichtbaren Bereich der elektromagnetischen Wellen, sondern das gesamte Spektrum in dem emittiert wird, umfaßt und die Dimension "Energie" besitzt, demnach in erg bzw. Joule (10^7 erg) ausgedrückt wird. Im Englischen wird für Leuchtkraft der Begriff "luminosity of a star" verwendet. Da das Verhältnis $1 : 10^{11}$ zu unhandlich ist, hat man an Stelle der Helligkeit den Begriff "Magnitude" eingeführt, dergestalt, daß ein Stern nun eine Magnitude (Größenklasse) "heller" ist, wenn seine Emission (luminosity) 2,5 mal größer ist, als die des nächst schwächeren Sterns. Dadurch findet man mit 28 Magnitudes (Größenklassen) das Auslangen. (Math. Anhang)

OBERFLÄCHENTEMPERATUR, FARBEN UND SPEKTREN

Wir stellen fest, daß blaue und weiße Sterne die heißesten sind und die Temperatur in dem Maße abnimmt, als die Sternfarbe sich gegen rot verändert. Ein etwas komplizierterer Zusammenhang besteht zwischen Oberflächentemperatur und Spektrum. Die Fähigkeit eines Atoms, Licht zu absorbieren, hängt von seinem speziellen Zustand ab. Der statistische Zustand vieler Atome gibt einen Hinweis auf die Temperatur der Umgebung. Für jedes spezielle Atom existiert eine Temperatur, bei welcher die Absorption am effizientesten ist. Durch das Studium der Absorptionslinien (schwarz) kann auf die Oberflächentemperatur rückgeschlossen werden. Die Maximaltemperatur von Sternen der Hauptreihe beträgt etwa 50 000 K (Heiße Sterne, für Planetarische Nebel vermutet man weit höhere Temperaturen) und die Minimaltemperatur ist 3 000 K und kann bis 1 000 K absinken. Das extreme Temperaturverhältnis ist demnach $100 : 1$.

Die nachfolgende Havard-Klassifikation gibt die Sternentemperatur der einzelnen Sterntypen wieder.

HAVARD-KLASSIFIKATION

TABELLE 1.1.

Havard Klassifizierung Temperatur Tabelle (K)	O	B	A	F	G	K	M	R	N	S
	50.000- 25.000	25.000- 11.000	11.000- 7.500	7.500- 6.000	6.000- 5.000	5.000- 3.500	3.500- 3.000	3.000- 3.000	3.000- 3.000	3.000
	Tabelle 1:1									
Kleinbuchstaben vor der Spektral- klasse bedeuten:	c und s	n	v	p	Spektrallinien sind besonders scharf Spektrallinien sind verwaschen (nebulos) Das Spektrum ist zeitlich veränderlich (variabe) Weist auf sonstige Besonderheiten hin (peculiar)					

STERNGRÖSSE UND STERNMASSE, CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG

Genau wie die Helligkeit und die Oberflächentemperatur zwischen den Maxima und den Minima große Differenzen zeigt, sind auch die STERNGRÖSSEN und MASEN sehr verschieden, nicht jedoch die chemische Zusammensetzung.

Die Messung von Sterndurchmessern ist äußerst schwierig. Die großen Distanzen einerseits und die extreme Überstrahlung andererseits lassen eine direkte Bestimmung der Durchmesser nicht zu.

(1" auf 1 Lichtjahr (9×10^{12} km) beträgt $5 \times 9 \times 10^{12} \times 10^{-6}$ km = $4,5 \times 10^7$ km
 0,01" auf 1 Lichtjahr noch immer $4,5 \times 10^5 = 450\ 000$ km!!)

Eine besonders brauchbare Methode der Durchmesserbest. ist die "Doppelsternmethode":

- a) Mit Hilfe des Dopplereffektes kann die Geschwindigkeit jeder Doppelsternkomponente bestimmt werden (Absorptionslinien mit Spektrum).
- b) Die Zeitspanne, wo eine der beiden Komponenten die Emission der anderen abdeckt, hängt von den Komponenten (Stern-)Durchm. und Geschwindigkeiten ab.
- c) Da die Zeitspanne der Emissionsabdeckung (meßbar) und die Geschwindigkeit, Pkt.a), bekannt sind, läßt sich der Durchmesser der Doppelsternkomponenten berechnen.

Eine zweite Methode besteht in der Interferenzmessung, anwendbar allerdings nur für nicht zu große, benachbarte Komponenten. Hier muß jedenfalls die Distanz bekannt sein. Diese Methode wird meist angewendet, um die Ergebnisse der erstbeschriebenen Methode zu bestätigen. - Die Sterngrößen verhalten sich wie:

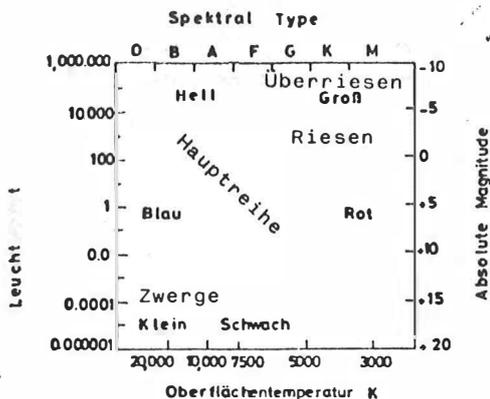
$$\text{Maximalradius} : \text{Minimalradius} = 3\ 000 R_{\odot} : \frac{1}{400} R_{\odot}$$

das heißt, rund $10^6 : 1$ (R_{\odot} = Sonnenradius)

Das Verhältnis der Maximal- und Minimalgrößen ist also wesentlich kleiner, als etwa das entsprechende Helligkeitsverhältnis.

STERNMASSEN sind ebenfalls optimal aus Doppelsternpaaren abzuleiten. Die bekannten Gravitationsgesetze erlauben einfach aus Umlaufzeit und Distanz die Massen abzuleiten. Sind allerdings die Komponenten so nah beieinander, daß ein Materieabtausch stattfindet, dann ist diese Methode wesentlich-schwieriger anzuwenden [5].

Sogenannte "visuelle" Doppelsterne wieder, können unter Umständen soweit voneinander entfernt sein, daß ein Umlauf viele Jahre währt, ja sogar, daß seit ihrer Entstehung kein einziger ganzer Umlauf erfolgte, so daß dadurch weitere Schwierigkeiten bei der Massebestimmung bestehen. Bislang hat man nur wenige Dutzend exakte Massebestimmungen und die nur fast ausschließlich von Hauptreihensternen (siehe HERTZSPRUNG-RUSSEL Diagramm) durchführen können.



Das HERTZSPRUNG-RUSSEL-Diagramm (Die Leuchtkraft ist im Vielfachen der Sonnenleuchtkraft ausgedrückt)

Abb. 12

Haupt reihensterne sind solche, deren Oberflächentemperatur zur Leuchtkraft sich so verhält, daß sie auf der "Hauptsequenz" liegen (90% aller Sterne liegen dort). - Die eingetragene Regionsbezeichnung zeigt an, wo bestimmte Sterntypen im HR-Diagramm liegen. Z.B. rechts oben liegen die "Roten Riesen", links oben die "Hellen (Blauen) Riesen", links unten die "Weißen Zwerge", das sind kleine Sterne mit heißer Oberfläche, rechts unten liegen die "Roten (bezüglich Leuchtkraft) Zwerge" usw. (Abb. 1.4)

Von "Überriesen" (HR-Diagramm) sind z.B. keine Massewerte bekannt. Zwischen der Leuchtkraft (Helligkeit, luminosity) und der Sternmasse besteht eine etwa lineare Abhängigkeit in einem gewissen Bereich für Hauptsequenzsterne. Wie wir noch sehen werden, besteht auch zwischen der Oberflächentemperatur und der Leuchtkraft eine etwa lineare Abhängigkeit¹⁾, so daß Leuchtkraft, Masse und Oberflächentemperatur eng korreliert sind.

Die wenigen derzeit bekannten Massewerte zeigen ein Verhältnis von

$$\text{Maximalmasse} : \text{Minimalmasse} = 10^4 : 1 \quad (\text{Sonnenmasse} = 10^2)$$

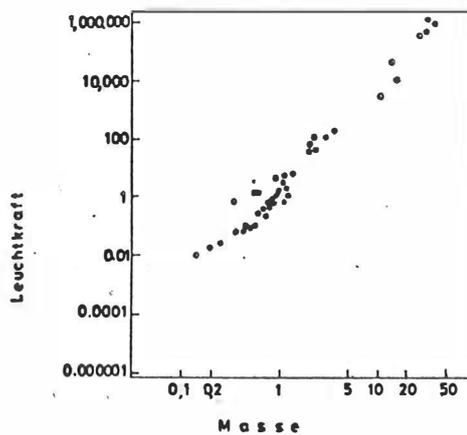


Abb. 1.3

Die Masse-Leuchtkraft Relation. Masse u. Leuchtkraft sind als Sonnenvielfache angegeben. Beide Skalen sind logarithmisch.

DIE CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG

Vorweg sei festgestellt, daß hier die modernen Forschungsergebnisse viel dazu beigetragen haben, um wissenschaftlich einwandfreie Ergebnisse bzw. Aussagen zu erhalten. Generell gilt, daß zwischen den Sternen eine überraschend große chemische Gleichförmigkeit herrscht. Die Masse eines typischen Sterns, wie etwa unsere Sonne, besteht zu Dreiviertel aus Wasserstoff und der Rest fast zur Gänze aus Helium. Lediglich 2% der Gesamtmasse sind allen übrigen Elementen zugeordnet. In der Sonnenatmosphäre kommen auf 1 000 Wasserstoffatome 80 Heliumatome und nur 2 "übrige" Atome. Die Sonne ist typisch für diese Verteilung. Helium bringt übrigens die größten Schwierigkeiten bei der Elementemengenbestimmung, da es ein schlechter Produzent von Absorptionslinien ist. Deshalb ist die Heliummengenbestimmung weit unexakter, wie die für alle übrigen wichtigen Elemente. Im übrigen teilt die Elementebestimmung das gleiche Schicksal mit der Temperaturbestimmung, nämlich, die Aussagen gelten nur für die Oberfläche. Es gibt jedoch gute Gründe anzunehmen, daß die Sternevolution mit graduellen Veränderungen der chemischen Zusammensetzung gekoppelt ist. Diese findet sicherlich zuallererst im Inneren des Sterns statt. Das augenscheinlichste Beispiel hierfür ist das Element TECHNETIUM. 1937 erstmalig im Labor produziert, ist es äußerst selten auf der Erde vorzufinden, da es radioaktiv ist und nur noch geringe Spuren vorhanden sind. In der Atmosphäre gewisser Riesensterne ist es aufgefunden worden. Wir müssen annehmen, daß dieses Element in den

¹⁾ Die "Linearität" ist immer im Hinblick auf die logarithmischen Maßstäbe zu verstehen.

Sternen geschaffen wurde, daß also diese ihre chemische Zusammensetzung ändern. Abschließend seien hier noch die Neutrinoströme erwähnt, welche ständig von den Sternen emittiert werden. Von manchen Astrophysikern werden für die Zukunft wichtige Informationen aus dem Sterninneren erwartet, wenn es einmal gelingt, die Neutrinoemissionen wie elektromagnetische Wellen aufzufangen. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist allerdings gering.¹⁾

HERTZSPRUNG-RUSSEL-DIAGRAMM

Zwischen 1911 und 1913 entdeckte der Däne HERTZSPRUNG unabhängig vom Amerikaner RUSSEL einen Zusammenhang zwischen Spektrum und Leuchtkraft (Helligkeit, luminosity). Beide fanden, daß nicht alle Kombinationen von Leuchtkraft und Spektrum im Kosmos vorkommen.

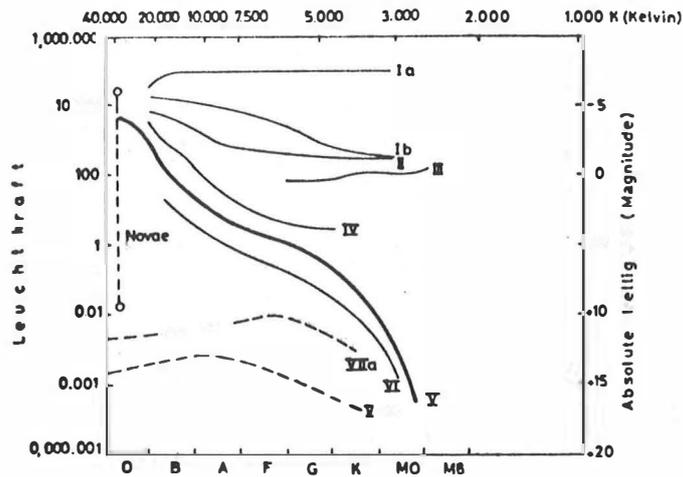


Abb. 1.4

Erläuterung: Hertzsprung - Russell Diagramm

- Ia : Helle Überriesen (besonders hell, äußerst seltene rote Sterne)
- Ib : Schwache Überriesen ca. 1000 x SONNENGRÖSSE
- II : Helle Riesen ca. 100 x SONNENGRÖSSE
- III : Schwache Riesen
- IV : Unterriesen ca. 10 x SONNENGRÖSSE
- V : Hauptreihe, auch Hauptsequenz genannt (hier liegt die überwiegende Mehrzahl der untersuchten Sterne), auch unsere Sonne liegt auf dieser Hauptreihe:
Zwerge 1 x SONNENGRÖSSE
- VI : Unterzwergenreihe
- VIIa: Helle Weiße Zwerge
- VIIb: Schwache Weiße Zwerge
- O-O : Weiß-blaue Sequenz

Es ist anzumerken, daß diese verfeinerte Version des HR-Diagramms nicht allein auf HERTZSPRUNG-RUSSEL zurückgeht, vielmehr durch den Amerikaner KUIPER und die Russen PARENAGO und WORONZOW ergänzt wurde.

Die Klassifikation enthält sieben Hauptklassen: O - B - A - F - G - K - M und zwei Verzweigungen G - R - N; K - S für die seltener vorkommenden Spektren. Die Hauptklassen werden noch je in zehn Unterklassen (z.B. B0 bis B9) unterteilt. Die Spektralklasse ist im wesentlichen ein Maß der Sterntemperatur, z.B.:

- O Sterne 50 000 - 25 000 K heiße (blaue) Sterne
- M Sterne 3 500 K kalte (rote) Sterne

Der Sirius, als hellster Stern unseres Nachthimmels, ist ein Stern der Klasse A

1) Neutrinos besitzen weder Masse noch elektr. Ladung, jedoch einen Spin, dadurch entziehen sie bei ihrer Entstehung im Sterninneren Energie.

mit 10 000 K Temperatur.

Da auch der atmosphärische Druck und die Schwerebeschleunigung in der Sternatmosphäre einen wesentlichen Einfluß auf das Spektrum haben, d.h., kleine und große Sterne gleicher Temperatur liefern verschiedene Spektren, entstand eine zweidimensionale Spektralklassifikation, die von den Amerikanern MORGAN-KEENAN-KELLMAN ausgearbeitet wurde und heute als MKK-Klassifikation weite Verbreitung gefunden hat.

1.1.2. STERNFAMILIEN

Die Sterne in unserer Galaxis bilden häufig physische Systeme, etwa Doppel-, Dreifach- und Mehrfachsysteme. Nach KUIPER sind mindestens 80% aller Sterne der Galaxis Mitglieder von Mehrfachsystemen. (Darunter versteht man Doppelsterne, Dreifachsysteme, Trapeze (4 Sterne) usw. Diese können wieder enge Systeme, bei Doppelsternen z.B. Umlaufzeiten bis wenige Tage oder aber auch entfernte Systeme mit Umlaufzeiten von Jahrhunderten oder extrem entfernte Systeme mit Umlaufzeiten von Jahrtausenden, bilden.

Weitere Systeme mit großer Mitgliederzahl heißen Sternhaufen. Genetisch haben wir zu unterscheiden: 1. Kugelsternhaufen sind Systeme von hunderttausend und mehr Sternen, sie besitzen eine regelmäßige fast sphärische Form, die Sterndichte im Zentrum ist ein Vielfaches der äußeren Sterndichte. Die Durchmesser liegen bei 30 bis 100 pc. Sie sind weit von der Symmetrieebene der Galaxis entfernt und sind um das galaktische Zentrum stark konzentriert. 2. Offene Haufen haben bis zu 100 Mitglieder, sie besitzen oft unregelmäßige Formen. Die Durchmesser dieser Haufen sind kleiner als 20 - 30 Parsec (1 Parsec = pc entspricht 3,26 Lichtjahren = L.J.). Sie liegen häufig in der Nähe der Symmetrieebene der Galaxis. Diese beiden Sternhaufen unterscheiden sich auch hinsichtlich ihrer Population: offene Haufen enthalten gewöhnlich heiße (Blaue) Riesen, während die Kugelhaufen, in denen solche nicht vorkommen, Rote Riesen enthalten. Die Sterndichte (Anzahl der Sterne je Volumseinheit) in diesen beiden Sternhaufen ist um einen Faktor 10 und mehr über der galaktischen Sternfeldldichte (Dichte der Einzelsterne). Wir bezeichnen auch diese Sterne in offenen Haufen und die damit verwandten Einzelsterne (fieldstars) überwiegend als zur Population I (junge Population) gehörig, während die Sterne von Kugelhaufen bzw. mit ihnen verwandte, überwiegend zur Population II (alte Population) gehören.

3. Im Jahre 1947 schrieb V. AMBARZUMJAN ^{1/1/7} über einen neuen Typ von Sternsystemen, die sehr jung sind und sich unmittelbar nach ihrer Entstehung zerstreuen. ²⁾ Sie sind nichtstationär im vollen Sinne des Wortes. Er nannte sie STERNASSOZIATIONEN und die Erforschung dieser leitete eine fruchtbare Entwicklungsperiode in der Sternkosmogonie ein. Ausgangspunkt waren ausgeprägte Tendenzen zur Gruppenbildung bei heißen Sternen der Spektralklasse O und B (siehe HR-Diagramm) und bei den "Veränderlichen Sternen" vom Typ T Tauri. ¹⁾

Diese Entdeckung wertet AMBARZUMJAN als ein gewichtiges Argument zugunsten der Vorstellung, daß eine ZERSTREUUNG aus anfangs kleinem Volumen einen wichtigen Teil des Entwicklungsprozesses im KOSMOS darstellt.

Es darf gleich hier vorweggenommen werden, daß die "T Tauri Veränderlichen" Sterne am Beginn ihrer Entwicklung sind. Doch darüber soll in dem Abschnitt über "VERÄNDERLICHE" noch näheres erläutert werden.

In einigen O-Assoziationen kommen weiters WOLF-RAYET Sterne vor (WR-Sterne), ebenfalls VERÄNDERLICHE, wobei mit großer Wahrscheinlichkeit angenommen werden darf, daß es sich

¹⁾ Neu entdeckte "Veränderliche" werden mit einem oder zwei großen Buchstaben vor dem Genetiv des Sternbildnamens bezeichnet! Man beginnt jedoch mit R usw. bis Z, dann folgt RR bis RZ, SS bis SZ usw. Wenn dies nicht ausreicht, folgt A bis Z usw. Die alten Veränderlichen haben griechische Buchstaben vor dem Sternbildnamen (δ - Cephei)

²⁾ CHANDRASEKHAR hat allerdings schon sehr früh das "Abdampfen" von Sternen aus Sterngemeinschaften behandelt.

hier um Sterne am Ende oder kurz vor dem Ende ihrer Entwicklungsperiode handelt.

Die Verteilung der verschiedenen Sternfamilien in unserer Galaxie ist längst bekannt, soll aber der Vollständigkeit halber kurz wiederholt werden!

Unsere Galaxie ist eine Spiralgalaxie und gewissermaßen eine Schwestergalaxie der bekannten Andromedagalaxie, auch Andromedanebel genannt. In den Spiralarmen dieser Galaxie kommen vornehmlich helle und hellste blaue Sterne vor, so daß diese Spiralarme generell eine blaue Farbe aufweisen, außerdem enthalten diese Spiralarme große Massen von interstellarem Gas und Staub. Derartige Gas- und Staubwolken fehlen im Kern NORMALE GALAXIEN fast vollkommen (siehe 2. Kapitel). Die hauptsächlich in diesen Galaxienkernen vorkommenden Sterne haben eine rötliche Farbe, die auch dem Zentrum die rötliche Färbung vermittelt. (NORM. GALAXIEN sind ältere Galaxien nach ihrer AKTIVITÄTSPERIODE.) Die Gas- und Staubwolken (das interstellare Material) sind für die Sternentwicklung von beträchtlichem Interesse, denn die klassische (auch Kondensations-) Theorie nimmt, wie bereits erwähnt, diese Wolken als Ausgangsmaterial für die entstehenden Sterne bzw. Sterngruppen an. Es soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, daß die Schule AMBARZUMJAN dieser Vorstellung konträr gegenübersteht und als Urmaterial für die Entstehung von Protosternen im allgemeinen, die aus AKTIVEN GALAXIENZENTREN emittierten ungeheuren Materiemassen ansieht. Doch darüber mehr am Ende dieses Kapitels.

ZUSAMMENHANG ZWISCHEN DEN STERNPOPULATIONEN UND IHRER CHEMISCHEN ZUSAMMENSETZUNG:

Wir haben festgestellt, daß zwei Sternpopulationen existieren und wollen untersuchen, inwieweit die chemische Zusammensetzung dieser beiden Populationen I und II variiert. Bei Sternen, die der Sternpopulation I angehören, sind die Spektrallinien aller Elemente, mit Ausnahme derer von Wasserstoff und Helium, auffallend stärker als die entsprechenden Linien von Sternen der Population II.

Eine Überprüfung dieses Unterschieds zeigt, daß ein typischer Population I-Stern ungefähr 10 mal mehr SCHWERERE ELEMENTE enthält, als ein Stern der Population II. Unter "schwereren Elementen" sind alle jene, die schwerer als Wasserstoff und Helium sind, zu verstehen. Trotz dieses beträchtlichen Unterschieds muß jedoch daran erinnert werden, daß typische Sterne beider Populationen vorwiegend (über 95% [4]) Wasserstoff und Helium enthalten. Wenn wir diese Überprüfung über einige Sternhaufen ausdehnen, finden wir, daß das exakte Verhältnis der vorhandenen Sternelemente etwas variieren kann.

ZUSAMMENHANG ZWISCHEN DEN STERNPOPULATIONEN UND IHREN BEWEGUNGEN:

In diesem Zusammenhang soll nur kurz festgestellt werden, daß im allgemeinen Sterne der Population II auf ihrem Umlauf um das galaktische Zentrum Rosettenkurven (Ellipsen) beschreiben, in deren einem Brennpunkt das galaktische Zentrum liegt [4]. Um hier Mißverständnissen vorzubeugen, sei vermerkt, daß in den Spiralarmen unserer Galaxie sowohl Sterne der Population I als auch der Population II vorkommen, für welche diese Aussage nicht unbedingt absolute Gültigkeit hat. Jedoch kann man für diese Sterne auch gewisse chemische Abweichungen von der Regel feststellen. Sterne der Population I hingegen beschreiben auf ihrer Umlaufbahn um das galaktische Zentrum Kurven, die genähert durch Kreise darstellbar sind, in deren Mittelpunkt das galaktische Zentrum liegt.

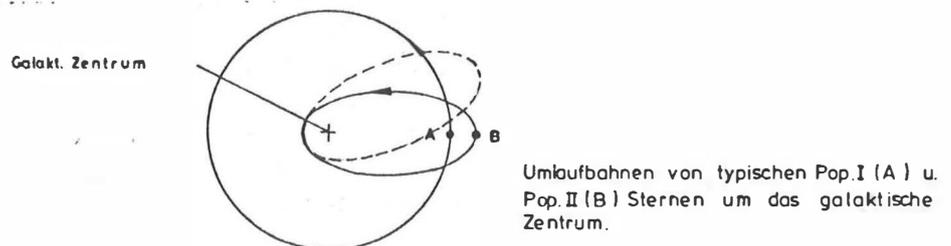


Abb. 1.5

Wir haben weiter oben festgestellt, daß unsere Galaxie eine Spiralgalaxie ist, wobei aber noch die Definition, was man unter Spiralarm zu verstehen hat, aussteht.

Wir stellen fest: 1.) Die Dichte der Sterne in den Spiralarmen ist größer als in den Räumen zwischen den Spiralarmen.

2.) Der wesentliche Unterschied besteht jedoch darin, daß die interstellaren Gas- und Staubmassen vor allem, ja man kann sagen ausschließlich, in den Spiralarmen vorkommen, wenn wir vorerst die galaktischen Zentren aktiver Galaxien ausklammern.

Wir können daher feststellen, daß gerade die Gegenwart von Gas- und Staubmassen den Unterschied Spiralarm und dazwischenliegender Raum repräsentiert.

Wir können weiter durch Beobachtung feststellen, daß einige Sterntypen, wie z.B. die hellblauen Sterne der O-Assoziationen, nur in den Spiralarmen vorkommen und dort üblicherweise eng mit den Gas- und Staubwolken assoziiert sind. Diese enge Assoziation verursacht eine starke Ionisierung des Gases und regt es dadurch an, Spektrallinien zu emittieren. Diese Linien sind sogenannte Emissionslinien und sind zum Unterschied von Absorptionslinien im Spektrum als helle breite Spektrallinien zu beobachten.¹⁾ Dadurch ist es relativ leicht, die chemische Zusammensetzung dieser interstellaren Materie festzustellen. Man hat gefunden, daß diese Gas- und Staubwolken dieselben chemischen Elemente aufweisen, wie sie in den Sternen gefunden werden, vorherrschend ist auch hier Wasserstoff.

In den vierziger Jahren dieses Jahrhunderts wurde theoretisch eine Radioemission dieser Wasserstoffwolken mit einer Wellenlänge von 21 cm vorausgesagt, in den frühen fünfziger Jahren wurde diese Radioemission tatsächlich erstmalig durch Radioteleskope nachgewiesen.¹⁾ Heute liefert uns diese Radioinformation einen sehr guten Überblick über die Gestalt und Form unserer Spiralgalaxie. Leider können aus Gründen der Abdeckung nur relativ geringe Teile der einzelnen Spiralarme durch diese Radioinformation erfaßt werden..(Die Infrarot- und Röntgenastronomie werden in der Zukunft diesen Mangel weitgehend beheben helfen.)

VERÄNDERLICHE STERNE

Wie bereits mehrfach erwähnt, existieren neben den temporär statischen Sternen, welche sich vor allem auf der Hauptsequenz des HR-Diagramms befinden, eine für die Sternentwicklung außergewöhnlich wichtige Gruppe von Sternen, nämlich die sogenannten "VERÄNDERLICHEN". Die Veränderung dieser Sterne betrifft die Helligkeit und die Oberflächentemperatur. Nahe Doppelsterne werden üblicherweise ebenfalls zu den VERÄNDERLICHEN gezählt, da ihre Lichtemission zu variieren scheint. Wir wissen jedoch, daß diese Veränderung vor allem von der Komponentenabdeckung durch den Umlauf herrührt.

Wir wollen im folgenden jedoch nur jene VERÄNDERLICHEN betrachten, bei denen die Veränderung der Lichtemission in den Sternen selbst vor sich geht und nicht an äußere Umstände gebunden ist. Die periodischen V E R Ä N D E R L I C H E N haben besondere Aufmerksamkeit dadurch erlangt, weil sie sich besonders nützlich für die Distanzbestimmung erweisen. Die beiden wichtigsten Gruppen sind die CEPHEÏDEN (genannt nach dem Prototyp DELTA-CEPHEÏ) und die RR-LYRAE-Sterne, (die bereits erwähnten T TAURI-Sterne sind ebenfalls Veränderliche, eignen sich aber aus hier nicht näher zu erläuternden Gründen nicht für die Distanzmessung).

Es sei hier festgehalten, daß die Veränderung in der Helligkeit auch von einer entsprechenden Veränderung in der Größe oder/und der Oberflächentemperatur der einzelnen Veränderlichen abhängig ist.

Die CEPHEÏDEN haben Perioden zwischen einem und 50 Tagen, die RR-LYRAE-Sterne pulsieren viel rascher mit Perioden von wenigen Stunden. Diese beiden Sterntypen haben verschie-

1) Siehe Seite 8a

1) Im allgemeinen entsteht Strahlung durch einen Elektronenübergang von einem Energieniveau zu einem niedrigeren, wobei ein Photon entsprechender Energie abgestrahlt wird. Einzelne Atome oder weit voneinander entfernte Atome erzeugen ein Linienspektrum, feste Körper, Flüssigkeiten oder dichte Gase produzieren ein kontinuierliches Spektrum, das n u r von der Temperatur des emittierenden Objektes und n i c h t von der chemischen Zusammensetzung abhängt.

Verbreiterungen der Spektrallinien entstehen

- a) durch den Dopplereffekt bei turbulenten Strömungen in der Sternatmosphäre oder durch die thermische Bewegung der Atome und
- b) durch Dämpfungerscheinungen, da eine elektromagnetische Welle endlicher Länge keine exakte Linie als Spektrum erzeugt und schließlich durch
- c) Stoßdämpfung, wegen Zerhackung des Wellenzuges durch zu nahe andere Teilchen.

Ein Absorptionsspektrum entsteht, wenn kühleres Gas vor dem heißeren emittierenden Objekt liegt. Es werden dann Photonen durch das kühle Gas absorbiert, welche dunkle Linien an jenen Stellen im Spektrum zeigen, die den Wellenlängen der absorbierten Elemente (z.B. H-Linien der diversen Serien) entsprechen.

Ein Emissionsspektrum entsteht, wenn das Gas vor dem schwarzen Strahler heißer als dieser ist. Es sind dann farbige, dem Element entsprechende Emissionslinien dem Spektrum überlagert.

Im Radiobereich sei besonders die 21 cm-Linie des neutralen Wasserstoffs erläutert:

Beim Wasserstoff umkreist bekanntlich nur ein Elektron ein zentrales Proton, beide Teilchen haben ein magnetisches Moment, ähnlich sehr kleinen Stabmagneten. Dadurch üben sie über ihr Magnetfeld Kräfte aufeinander aus, die bewirken, daß sich die magnetischen Momente von Elektron und Proton nur entweder parallel (höhere Energie) oder antiparallel (niedere Energie) einstellen können. Die Energiedifferenz zwischen beiden "Stellungen" entspricht einer Frequenz von 1 420,4 MHz, entsprechend einer Wellenlänge $\lambda = 21,105 \text{ cm}$

$$(\Delta E = h \cdot \nu = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \cdot \frac{1,420,4 \cdot 10^9}{\text{s}} = 9,41 \cdot 10^{-25} \text{ J} = 5,87 \cdot 10^{-6} \text{ eV})$$

Da es sich hier um einen "verbotenen" Übergang (s.o.) handelt, dauert es z.B. hier ca. 11 Millionen Jahre bis ein derartig angeregtes H-Atom unter Aussendung eines Photons in seinen Grundzustand zurückkehrt (Spin-Umkehr). Nur die extrem geringe Gasdichte der interstellaren Materie und die extrem lange Kollisionsphase von etwa 100 Jahren zwischen 2 Atomen verhindern, daß das Atom seine Energie strahlungslos abgibt.

dene Positionen im HR-Diagramm. Schließlich sind die CEPHEÏDEN gelbe Überriesen, während die RR-LYRAE-Sterne blaue Riesensterne sind.

Die Distanzbestimmung mit Hilfe dieser Veränderlichen geschieht im wesentlichen aufgrund des Zusammenhanges der wahren Helligkeit und der Periodenlänge. Aus der Differenz der scheinbaren Helligkeit und der wahren Helligkeit läßt sich die Distanz ableiten. Die Distanzmessung mit Hilfe der RR-LYRAE-Sterne ist noch einfacher, da alle RR-LYRAE-Sterne nahezu die gleiche wahre Helligkeit besitzen. Kennen wir diese einmal, so gibt der Vergleich mit der scheinbaren Helligkeit sofort die Distanz. Da diese Veränderlichen oft in Sternhaufen vorkommen, helfen sie auch, die Distanz der übrigen Mitglieder dieser Sternhaufen zu bestimmen, woraus wiederum die wahre Helligkeit (luminosity) und Größe der Sterne dieser Clusters bestimmt werden können. (Begriffe, siehe mathematischer Anhang.)

Sowohl die CEPHEÏDEN als die RR-LYRAE-Sterne gehören der Population II an. Neuere Beobachtungen haben jedoch gezeigt, daß CEPHEÏDEN manchmal in offenen Sternhaufen vorkommen, was darauf schließen läßt, daß es 2 TYPEN von CEPHEÏDEN gibt, nämlich klassische Ceph. und Virginis-Sterne, wovon eine Gruppe auch der Population I angehören kann.¹⁾

"EXPLODIERENDE" STERNE (eruptive Veränderliche)

Wir haben in der Geschichte der Astronomie immer wieder von "hellen, neuen Sternen" gehört, die plötzlich am Himmel aufgeleuchtet sind, um nach einigen Wochen oder Monaten wieder zu verschwinden. Zwei Hauptgruppen dieses Typs von "Veränderlichen" können unterschieden werden, die NOVAE und die SUPERNOVAE.

NOVA: Sie leuchtet sehr rasch auf, wobei die Helligkeit etwa auf das 60 000fache und mehr anwächst, dann wird sie nach und nach schwächer, um etwa nach einer Periode von zwei Jahren wieder ihre ursprüngliche Helligkeit erreicht zu haben. Spektroskopische Untersuchungen haben gezeigt, daß das plötzliche Anwachsen der Helligkeit mit einer Sternexplosion *k o r r e l i e r t* ist, die Teile der äußeren Sternoberfläche in den Raum schleudert. Manchmal kann einige Jahre nach der Explosion das ausgeworfene Material direkt durch das Teleskop als expandierende Gaswolke, die den Stern umgibt, beobachtet werden. Als Faustregel kann angenommen werden, daß etwa 1/10 000 der Sternmasse in den Raum geschleudert wird. Bei einigen NOVAE hat man innerhalb von Jahrzehnten mehrere derartige Explosionen beobachten können. In der Tat sind NOVAE bekannt, die etwa monatlich hell aufleuchten. Es ist augenscheinlich, daß der Zeitraum zwischen den "Explosionen" von der Größe der einzelnen Massenemissionen abhängt, kleinere "Explosionen" können sich offenbar öfter wiederholen.²⁾

SUPERNOVA: Keine SUPERNOVA wurde jemals vor ihrer Explosion beobachtet, so daß wir bis heute nicht wissen, welche Art von Sternen derartige SUPERNOVAE hervorbringen. Die hellsten und bekanntesten SUPERNOVAE sind etwa 200 Millionen mal heller als die Sonne und sind wesentlich heller (im gesamten elektromagnetischen Spektrum und im elektroschwachen Strahlungsbereich), als die hellsten NOVAE. Bezüglich der Häufigkeit sei folgendes vermerkt: zwei bis drei Dutzend NOVAE erfolgen jedes Jahr in unserer Galaxie, dem gegenüber ereignet sich etwa eine SUPERNOVA in 50 - 70 Jahren. Der wesentliche Unterschied zwischen einer NOVA und einer SUPERNOVA ist der, daß bei einer SUPERNOVA eine substanzielle Umwandlung in ein kosmisches Objekt anderer Art durch den Gravitationskollaps erfolgt; wir werden im Kapitel über Pulsare und Schwarze Löcher (SL) noch mehr darüber hören.

Die letzte in unserer Galaxie beobachtete SUPERNOVA geht auf das Jahr 1604 zurück. Unsere Kenntnisse über SUPERNOVAE resultieren daher hauptsächlich aus Beobachtungen über derartige Ereignisse in anderen Galaxien. Wir versuchen derzeit nach den Resten von SUPERNOVAE zu forschen, um ihre Eigenschaften zu überprüfen. Sehr viele Informationen erhalten wir mit Hilfe der Radioastronomie. Die Geschwindigkeit, welche das ausgeworfene Sternmaterial bei einer SUPERNOVA erreicht, liegt etwa bei 3 500 bis

1) Kurzperiodische Veränderliche (Zwerg-Cepheiden) haben Perioden kürzer als 5 Stunden. Langperiodische Veränderliche können Perioden bis hunderte von Tagen haben, wie z.B. der Stern Mira Ceti (330 Tage, Mittelwert seiner Periode)

2) Den Novamechanismus bringen die neueren Forschungsergebnisse meist mit Doppelsternen in Zusammenhang.

5 000 km pro Sekunde. Eine bedeutende SUPERNOVA wurde im Jahre 1054 beobachtet, deren "Explosionswolke" als KREBSNEBEL heute besondere Aufmerksamkeit erlangt hat.

BESONDERHEITEN DES SPEKTRUMS

Neben der großen Gruppe der Sterne, deren Helligkeit sich ändert, existieren weitere Sterntypen, deren Spektren wesentlich anders sind, als bei normalen Sternen. Z.B. besitzen gewisse Sterntypen Spektren, die sich von Zeit zu Zeit verändern. Daneben existieren Sterne, die in ihren Spektren neben den dunklen Absorptionslinien eine Anzahl von hellen Emissionslinien besitzen, die sich mit der Zeit unregelmäßig ändern. Eine exakte Untersuchung dieser Sterne hat ergeben, daß sie rasch rotieren, die beachtliche Geschwindigkeit beträgt etwa 500 km je Sekunde für einen Punkt am Sternäquator. Zum Vergleich sei angegeben, daß ein Äquatorpunkt der Erde etwa 460 m je Sekunde zurücklegt (40 000 km : 24 x 3 600).

Durch diese hohe Rotationsgeschwindigkeit entstehen Zentrifugalkräfte, die von der Gravitation nicht mehr kompensiert werden können, so daß diese Sterne kontinuierlich Material in den Raum verlieren. Eine Zeitlang formt dieses Material einen Ring um das Zentralgestirn, wobei Emissionslinien im Sternspektrum entstehen, die jedoch nach einiger Zeit verschwinden.

1.1.3 DER AUFBAU DER STERNE

Bevor wir im nächsten Kapitel über Geburt, Leben und Sterben der Sterne sprechen werden, ist es notwendig, einige Feststellungen über den inneren Aufbau von Sternen zu treffen.

Obwohl die einzelnen Sterntypen stark verschieden erscheinen, existieren doch gewisse strukturelle Eigenschaften, die allen Typen mehr oder weniger gemeinsam sind. Eine dieser augenscheinlichsten Eigenschaften ist offenbar das Emittieren von Energie. Dieser Umstand unterscheidet die Sterne im wesentlichen von den Planeten. Wir stellen generell fest, daß Sterne fähig sind, über lange Zeit, Jahrhundertmillionen, ja sogar Jahrmilliarden, Energie zu produzieren und diese auch zu emittieren. Sterne haben daher unvorstellbare Energiereserven. Darüber hinaus ist festzustellen, daß gerade diese Energieproduktion die generelle Stabilität eines Sterns, zumindest über die längste Zeit seines Lebens, sichert.

DIE STERNMATERIE

Aufgrund der Bestimmung der Oberflächentemperatur (etwa der Sonne) wird klar, daß sie groß genug ist, jegliches bekannte Element oder Molekül in den gasförmigen Aggregatzustand zu versetzen. Darüber hinaus wissen wir, daß das Zentrum der Sterne noch wesentlich höhere Temperaturen aufweist; für die Sonne z.B. kann eine Zentraltemperatur von 10 Millionen Kelvin angenommen werden.

Bekanntlich hängt die Höhe der Temperatur mit der Geschwindigkeit der Atombewegungen im Material eng zusammen. Bei einigen Millionen Graden ist die Häufigkeit der durch die atomare Bewegung entstehenden Kollisionen groß genug, um die Struktur der Atomkerne zu verändern.

Wir können feststellen, daß die hohe Temperatur im Sternzentrum - grob gesprochen - Ursache dafür ist, daß das Gesamtmaterial in einen gasförmigen Zustand mit sehr hoher Dichte verwandelt wird. Diese Feststellung gilt vor allem für die Situation im Sternzentrum. Genaue Überprüfungen zeigen, daß für Punkte, die vom Zentrum weiter entfernt sind, sowohl die Temperatur als auch die Dichte relativ rasch abnehmen, dennoch ist das Sternmaterial auch in diesen Punkten gasförmig.

Wir stellen fest, daß ein Stern grundsätzlich als "Kugel aus gasförmigem Material"

bezeichnet werden kann. In jedem Punkt eines sogenannten Normalsterns muß das Gesamtmaterial im Gleichgewicht sein. Wenn dies nicht der Fall wäre, würde der Stern instabil werden und wir würden innerhalb kurzer Perioden größere Veränderungen wahrnehmen.

Wir wissen jedoch, daß im Leben eines Sterns derartige Instabilitätszeiträume eine gewichtige Rolle spielen. Der Gleichgewichtszustand eines Sterns wird einerseits durch die Gravitationskraft, die gegen das Sternzentrum wirkt und andererseits durch den Innendruck, der durch die Hitzeentwicklung entsteht, erzeugt. Es ist eines der wesentlichen Charakteristika von Gasen - das diese besonders von Flüssigkeiten und festen Stoffen unterscheidet - daß sie relativ leicht komprimierbar sind, woraus folgt, daß die Dichte des Sternmaterials gegen das Zentrum des Sterns hin rasch ansteigt, andererseits sinkt die Dichte ebenso rasch in Richtung auf die Oberfläche eines Sterns ab. Die Dichte der Sonnenatmosphäre ist weitaus geringer als die Dichte unserer Planetenatmosphäre.

DIE ENERGIEÜBERTRAGUNG IN EINEM STERN

Wir wir noch sehen werden, geschieht die Energieproduktion in einem Stern in einer verhältnismäßig kleinen Region im Sternzentrum. Für die Energieübertragung existieren drei Möglichkeiten:

- a) durch Strahlung
- b) durch Wärmeaustausch (Konvektion)
- c) durch Wärmeleitung

Erfolgt der Energietransport durch STRAHLUNG, so wird diese ständig absorbiert oder gestört durch vorhandene Atome bzw. Atomkerne und Elektronen. Die Fähigkeit des Sternmaterials durch Streuprozesse die Strahlung zu verhindern oder zu verringern, wird mit Lichtundurchlässigkeit oder Opazität (opacity) bezeichnet. Die Strahlung im Sternmaterial wird etwa nach 2 bis 3 cm Weglänge bereits absorbiert, was der Lichtundurchlässigkeit von schmutzigem Wasser entspricht. Diese hohe Lichtundurchlässigkeit verhindert es erstens, daß die Strahlung den Stern verläßt (im allgemeinen benötigt ein Strahlungspartikel viele Jahrzehntausende, um vom Zentrum zur Oberfläche zu gelangen) und bewirkt zweitens, daß die Strahlung auf diesem Weg sehr stark an Energie verliert. Die Strahlungsenergie hängt eng von der Strahlungsfrequenz ab. Im Zentrum eines Sterns finden wir häufig hochfrequente Röntgenstrahlen. Auf ihrem Weg vom Zentrum bis zur Oberfläche verliert die Strahlung jedoch sehr viel an Energie und damit an Frequenz.

Die Energieübertragung durch KONVEKTION¹⁾ setzt voraus, daß das Sternmaterial an sich in Bewegung ist. In dieser Hinsicht besteht ein großer Unterschied zwischen der Strahlungsübertragung und der Konvektion.

Die Bewegung bei Konvektion ist geringer als etwa 80 km/Stunde, so daß das Gleichgewicht des Sterns dadurch nicht in Frage gestellt wird. Im allgemeinen können wir feststellen, daß, je nach Strahlungsdurchlässigkeit des Sternmaterials, die Übertragung der Energie sowohl durch Konvektion als auch durch Strahlung erfolgen wird.

Die dritte Art der Energieübertragung, nämlich durch LEITUNG, ist in der Astronomie nur unter besonderen Umständen von Bedeutung. Der Grund ist augenscheinlich: die besten Wärmeleiter sind bekanntlich feste Stoffe (etwa Metalle), wir haben jedoch gesehen, daß die Sterne aus gasförmigem Material bestehen. Es ist jedoch möglich, daß unter besonders starkem Druck, das gasförmige Sternmaterial wie festes Material bezüglich Wärmeleitung wirkt und trotz der hohen vorhandenen Temperaturen sich in einen ausgezeichneten Wärmeleiter verwandelt. Wenn wir es daher mit außerordentlich dichten Sternen zu tun haben, müssen wir auch diese Energieübertragung durch Leitung in Be-

1) In kleinen Hauptreihensternen ist die Konvektion auf die Oberfläche beschränkt. In großen Hauptreihenst. findet sie in den Kernen statt. In Sternen die nicht auf der Hauptr. liegen, bestimmt der adiabatische Gradient das Einsetzen der Konvektion.

tracht ziehen. Dies ist in erster Linie der Fall bei Weißen Zwergen und bei Neutronensternen.

DIE ENERGIEPRODUKTION IN DEN STERNEN

Bis in die dreißiger Jahre war der Ursprung der Sternenergie ein ungelöstes Geheimnis. Heute existiert hier eine generelle Übereinstimmung: Die Energieproduktion in Sternen erfolgt durch atomare Prozesse, genau gesagt, durch Kernverschmelzungsprozesse. Aufgrund der ungeheuer hohen Temperaturen sind in den zentralen Regionen der Sterne die Atome vollständig ionisiert, sie bewegen sich mit sehr großen Geschwindigkeiten und kollidieren ständig miteinander.

Wie im Laboratorium nachgewiesen werden konnte, können diese atomaren Partikel unter diesen Voraussetzungen miteinander in Wechselwirkung treten, d.h., nuklear miteinander reagieren. Als Faustregel können wir feststellen, daß die leichteren Kerne rascher mit anderen Kernen wechselwirken, vor allem deshalb, weil sich die leichteren Atomkerne rascher bewegen und die COULOMBSche Abstoßung aufgrund der kleineren Kernladungszahl geringer ist. Als generelle Regel kann festgehalten werden, daß ein Stern seine Zentraltemperatur gerade hoch genug hält, damit die leichtesten Elemente in Wechselwirkung treten können. Bevor z.B. ein Proton mit einem anderen Proton in Wechselwirkung tritt, vergehen mehr als eine Milliarde Jahre. Obwohl derartig große Zeiträume benötigt werden, besitzt z.B. die Sonne eine derart riesengroße Menge Wasserstoff, daß diese wahrlich seltenen Interaktionen dennoch etwa eine Leistung von $735,5 \times 10^{26}$ Watt produzieren.

Generell sei hier nur erwähnt, daß die Energieproduktion, die aus zwei Wasserstoffprotonen schließlich ein normales Heliumatom erzeugt, als Proton-Proton-Zyklus bezeichnet wird. In Sternen, die bedeutend heißer als die Sonne sind, wird das Helium auf einem anderen Weg erzeugt. Hier wird Kohlenstoff als Katalysator verwendet, so daß dieser Zyklus als Kohlenstoffzyklus oder exakter als Kohlenstoff-Stickstoff-Sauerstoff-Zyklus (CNO) bezeichnet wird. Wenn die Temperatur hoch genug angestiegen ist (etwa von 10 auf 100 Millionen Kelvin), beginnen die Heliumkerne wechselwirksam zu werden und bilden Beryllium. Um aus Helium schwerere Atome zu erzeugen, ist eine sogenannte dreifache Kollision notwendig und man gelangt schließlich zu einem stabilen Kohlenstoffatom. Derartige Dreifachkollisionen sind unter normalen Verhältnissen sehr selten und Helium wird nur bei sehr hoher Dichte und sehr hoher Temperatur zu Kohlenstoff verschmelzen. Dieses Heliumbrennen wird als Drei-Alpha-Reaktion bezeichnet.

Steigt die Temperatur weiter an, können auch schwerere Elemente produziert werden. Heliumkerne können mit Kohlenstoffkernen zu Sauerstoff interaktiviert werden. Mehrere Heliumkerne können mit Sauerstoffkernen Neon produzieren und schließlich auch zu noch schwereren Elementen verschmelzen.

Bevor wir diesen Abschnitt abschließen, wollen wir feststellen, daß die Transformation von Wasserstoff zu Helium Energie produziert. Dasselbe geschieht bei Umwandlung von Helium in Kohlenstoff, jedoch wird der Betrag der freiwerdenden Energie geringer. Je schwerer die so produzierten Elemente werden, umso geringer wird die freiwerdende Energie. Wenn z.B. die Kernverschmelzung bis zur Produktion von Eisen gehen sollte (der Atomkern von Eisen enthält 56 subatomare Teilchen), hört die Energieproduktion vollkommen auf. Um einen Atomkern mit höherem Atomgewicht als Eisen zu produzieren, wird bereits Energie benötigt.

STERNMODELLE

Im folgenden soll generell der Weg beschrieben werden, der beschritten werden muß, um ein bestimmtes Sternmodell berechnen zu können. Wir beginnen mit der Annahme einer bestimmten Masse der chemischen Zusammensetzung und dem Alter eines Sterns. Gewisse physikalische Prozesse, die für die Berechnung des Sternmodells eine bedeutende

Rolle spielen, sind uns bekannt. Wir vergleichen nun die aus der Berechnung erhaltenen theoretischen Werte für die Helligkeit, die Oberflächentemperatur, den Radius etc. mit den tatsächlich beobachteten Werten. Wenn diese Ergebnisse übereinstimmen, so haben wir vorerst ein Resultat für die Größe, die chemische Zusammensetzung bzw. für das Alter des Sterns erhalten. Des weiteren haben wir aber auch ein Bild über die Struktur des Sterns gewonnen, wie z.B. etwa über den Energietransport innerhalb des Sterns und über die nuklearen Prozesse, die im Sternzentrum ablaufen. Leider, und das muß hier mit aller Deutlichkeit festgestellt werden, sind die Lösungen nicht eindeutig.

Es ist durchaus möglich, daß sich zwei oder mehr Alternativmodelle mit verschiedenen Strukturen ergeben, die dennoch dieselbe Helligkeit und Oberflächentemperatur als Resultat ergeben. Da sich die chemische Zusammensetzung innerhalb eines Sterns über lange Zeiträume ändern kann, muß auch dieser Umstand bei der Berechnung berücksichtigt werden. Der einfachste Fall ist ein Stern, der gerade geboren worden ist. Es ist augenscheinlich, daß am Beginn eines Sternlebens, das Sternmaterial weitgehend homogen ist, mit anderen Worten, ein sogenannter Nulljahr-Stern¹⁾ besitzt eine einheitliche chemische Zusammensetzung vom Zentrum bis zur Oberfläche. Da wir jedoch die Sterne nur an der Oberfläche beobachten können, gibt uns dieser Stern auch ein Bild seines Inneren. Ein Stern mit einer homogenen chemischen Zusammensetzung liefert uns offenbar das denkbar einfachste Sternmodell.

Wir setzen nun eine Serie von Gleichungen an,²⁾ die das Geschehen an irgendeinem Punkt innerhalb des Sterns beschreiben. Z.B. können wir eine Gleichung ansetzen, die zeigt, wie die Energieproduktion von der Temperatur und der Dichte in einem gegebenen Punkt innerhalb des Sterns abhängt. Wir lösen alle diese Gleichungen auf und erhalten so unser Sternmodell. Im Laufe der Berechnungen haben wir selbstverständlich die verschiedenen Möglichkeiten der Sternstruktur im Auge zu behalten, so etwa, wie die Energie zu jedem Punkt transportiert wird, durch Strahlung, Konvektion oder Leitung. Wir haben weiters den Kernverschmelzungsprozeß zu beachten, ob es sich um eine Proton-Proton-Kette oder um einen CNO-Prozeß o.a. handelt.

Unter der Annahme, daß wir die richtigen Voraussetzungen für unseren Stern gewählt haben, erhalten wir wesentliche wichtige Charakteristika und das augenscheinlichste Ergebnis wird sein, daß der Druck, die Temperatur und die Dichte rasch und kontinuierlich vom Zentrum zur Oberfläche hin abnehmen. Ein eher überraschendes Ergebnis ist es, daß die Energie fast zur Gänze innerhalb einer sehr kleinen Region rund um das Sternzentrum produziert wird. Für die Sonne ergibt sich etwa der Bereich einer Kugel, die nur 25% des Sonnenradius' besitzt. Für einen Stern mit 10 Sonnenmassen erhalten wir gar nur eine Region mit einem Radius von 5% des entsprechenden Sternradius'. Diese Konzentration zum Zentrum hin hängt mit der starken Abhängigkeit des nuklearen Prozesses von der Temperatur zusammen.

Als weiteres interessantes Ergebnis erhält man einen starken Dichteanstieg, der seinerseits eine starke Massenkonzentration bewirkt.

Für die Sonne liegen 90% des Sonnenmaterials innerhalb des halben Sonnenradius'.

Für einen Stern mit 10facher Sonnenmasse ergeben sich die nahezu gleichen Verhältnisse. Das vielleicht überraschendste Ergebnis ist, daß Sterne mit geringen Massen dichter in ihrem Zentrum sind, als massereichere Sterne.

Für die Sonne hat man im Zentrum eine Dichte berechnet, die der 100fachen des Wassers entspricht. Für einen Stern mit 10 Sonnenmassen ergäbe sich nur die 10fache Wasserdichte. Soweit die Berechnung für einen Nulljahr-Stern.

Dies ist jedoch nur der Anfang der Studien über die Sternevolution. Die Berechnungen für alte und ältere Sterne werden weitaus komplizierter. Dennoch sind wir heute in der Lage, die Berechnungen je nach Sternalter schrittweise vorzunehmen. Wie groß wir

1) Man nennt diese Methode Zero-Age-Main-Sequenz- ZAMS- Methode.

2) Es handelt sich hierbei um Systeme nichtlinearer Differenzialgleichungen.

die einzelnen Zeitintervalle ansetzen, hängt vom betrachteten kosmischen Objekt ab. Für einen Stern wie die Sonne wird ein Zeitabschnitt von 500 Millionen Jahren je Berechnungsdurchgang angemessen sein. Wie bereits erwähnt, wird die Berechnung umso komplizierter, je inhomogener das Sternmodell angenommen werden muß. Wir setzen unsere Berechnungen unter Einsetzung vieler Parameter so lange fort, bis schließlich das Endmodell dieselben Ergebnisse zeigt, wie sie die tatsächliche Sternbeobachtung ergibt. Das Endergebnis wird Aufschluß über die Masse, die chemische Zusammensetzung und das Sternalter bringen.

Derartige extensive Berechnungen von exakten Sternmodellen sind erst in den letzten Jahrzehnten gemacht worden. Für diese Berechnungen sind große Computer vonnöten. Der Grund liegt darin, daß die Gleichungen, die das Sternmodell hervorbringen sollen, sehr schwierig zu berechnen sind. Die numerischen Berechnungen sind daher äußerst umfangreich. Pro Berechnungsdurchgang muß man für einen Großcomputer einige Stunden Rechenzeit veranschlagen. Selbst unter Berücksichtigung aller bereits erwähnten Umstände, gibt es im Leben von Sternen Augenblicke, wo sich ihre innere Struktur plötzlich ändert und diese Strukturänderungen sind mathematisch schwierig bzw. kaum zu erfassen.

1.1.4. DIE GEBURT DER STERNE UND IHR VERWEILEN AUF DER HAUPTSEQUENZ

Obwohl im Abschnitt 1.2. der Zweifel an der Kondensationstheorie durch die Protosternhypothese erläutert wird, soll im folgenden dennoch der Ablauf der Sternentstehung nach der klassischen Theorie beschrieben werden. Es darf vorweggenommen werden, daß die folgende Theorie durchaus geeignet ist, gewissermaßen die Protosternhypothese zum mindesten teilweise zu involvieren. Es wird darauf noch besonders hingewiesen werden.

BEWEGUNG IM INTERSTELLAREN MEDIUM

Wir wollen annehmen - und dies zeigt die Beobachtung - daß ein enger Zusammenhang zwischen diffusem Medium und kompakten Sternen besteht. Vom ersten zum zweiten Zustand kann man durch Kondensation kommen. Die dazu notwendige Kraft ist zweifellos durch die Gravitation gegeben.

Im ersten Augenblick scheint es, daß die Gravitation das Problem sehr leicht lösen kann. Es taucht jedoch sofort die Frage auf, wieso dann nicht alle vorhandene diffuse Materie schon längst kondensiert ist? Teils spielt die Tatsache, daß diese Materie in Bewegung ist und daß die Zentrifugalkräfte der Kondensation entgegenwirken, eine gewisse Rolle. Wichtiger scheinen jedoch gewisse Eigenschaften der stochastischen Potentialtheorie zu sein. Bezüglich der sich überlagernden Bewegungen ist zu unterscheiden:

Erstens, eine langzeitige Rotation um das galaktische Zentrum und zweitens, eine kurzfristige Rotation um einen fiktiven Massenmittelpunkt der Gas- und Staubwolke. Gerade die kurzfristige Rotation ist für unser Problem der Sternentstehung interessant. Diese Bewegung kann durch den Umstand festgestellt werden, daß einerseits die interstellare Gaswolke Absorptionslinien produziert, die andererseits aufgrund des Dopplereffekts sich in verschiedenen Wellenlängen darbietet. Aus dem Studium der Absorptionslinien läßt sich erstens die Dichte - etwa 1 000 Atome je cm^3 , zum Vergleich von etwa 1 Atom in 10 cm^3 , zwischen den Wolken (Verhältnis 10 000 : 1) - und zweitens die Größe abschätzen. Der durchschnittliche Durchmesser beträgt etwa 30 bis 40 Lichtjahre, das bedeutet eine 1 000fache Sonnenmasse als Gesamtmasse dieser Wolke! Die Temperatur beträgt etwa 100 K, welche aber durch benachbarte Sterne auf 10 000 K und mehr aufgeheizt werden kann. Diese Wolke enthält einen gewissen Betrag an Energie, teils in Form von Wärme, welche als ungeordnete kinetische Energie beschrieben werden kann und teils in Form von potentieller Energie innerhalb der Wolke.

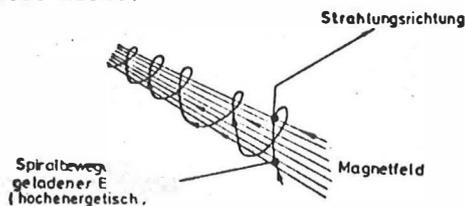
1) Für die Berechnung konkreter Sternmodelle sind in gewissen Evolutionphasen diese Zeitstufen bis auf wenige Jahrtausende abgefallen. Derartige Berechnungen wurden an der I.U. Wien auf dem Großcomputer angestellt.

DER EINFLUSS DER THERMODYNAMISCHEN ENERGIE AUF DIE KONDENSATION.

Die Gravitation erzeugt eine allgemeine Tendenz zur Kondensation, also zur Verkleinerung der Wolke. Diese Tendenz ist umso stärker, je größer die Masse und die Dichte sind. Die thermodynamische Energie widersetzt sich der Kontraktion. Die Gestalt einer interstellaren Wolke hängt daher davon ab, welche Kräfte stärker sind, die Gravitation oder die thermodynamische Energie. Eine einfache Rechnung zeigt das Gleichgewicht dieser Kräfte für eine "Durchschnittswolke". Dies ist der Grund dafür, daß die meisten Interstellarenwolken unserer Galaxie im Gleichgewicht sind und daher keine Sternbildung gestatten. Wenn jedoch dennoch eine derartige Wolke kondensiert, so würde ein Stern entstehen, tausendmal schwerer als die Sonne, ein Stern, vielfach massiver als jemals in unserer Galaxie gefunden, daher liegt der Schluß nahe - und dies ist auch durch Beobachtungen erwiesen - daß Sterne fast ausschließlich gleichzeitig in größerer Anzahl entstehen.

DER EINFLUSS DER MAGNETISCHEN ENERGIE AUF DIE KONDENSATION

Im Hinblick auf die Erforschung der thermonuklearen Prozesse werden große Anstrengungen gemacht. Man will im Laboratorium jene Temperaturen in einem kleinen Gasvolumen erzeugen, wie sie etwa im Sternzentrum herrschen. In diesem Stadium sollten die Atomkerne durch Verschmelzung Energie produzieren. Um ein Entweichen des Gases beim Erhitzungsprozeß zu verhindern, muß es irgendwie zusammengehalten werden. Im Stern geschieht dies durch Gravitationskräfte, wie sie durch große Massen auftreten. Im Labor sind diese Massen nicht vorhanden, aber wenn das Gas zum PLASMA geworden ist, d.h., wenn alle Atome vollständig ionisiert sind, bilden sie ein ambipolares Plasma, das nach außen vollkommen neutral ist, also alle verbleibenden Partikel elektrische Ladungen - positiv oder negativ - haben, tritt ein neues wichtiges Phänomen auf: Die Bewegungen der geladenen Teilchen können durch Gegenwart eines magnetischen Feldes, wie die Abbildung 1.6. zeigt, verändert werden. Neutrale Teilchen besitzen diese Fähigkeit nicht.



Spiralbewegung geladener Teilchen in einem magnetischen Feld. Tangential zur Bahnkurve strahlen die Elektronen im engen Winkel elektromagn. Strahlen ab.

Abb. 1.6

Das Teilchen wandert spiralförmig entlang der Feldlinien. Dadurch ist es möglich, in einem magnetischen Feld kleine Gasvolumina auch bei stärkster Erhitzung zusammenzuhalten. Auf astronomische Dimensionen übertragen, kann das Gas z.B. in den Spiralarmen unserer Galaxie gehalten werden, da in diesen starke Magnetfelder nachgewiesen werden konnten¹⁾ Aber das magnetische Feld kann auch den Kondensationsprozeß hemmen bzw. so beeinflussen, daß die Wolke keine sphärische Form, sondern die einer Scheibe annimmt.

EINFLUSS DER ROTATIONSENERGIE AUF DIE KONDENSATION

Wenn eine Materiewolke durch Kondensation kleiner wird, beginnt sie rascher zu rotieren. Berechnungen ergeben, daß ein Stern, würde er direkt aus einer interstellaren Wolke kondensieren, etwa 90% der Lichtgeschwindigkeit als Äquatorialgeschwindigkeit besitzt, dies ist natürlich unsinnig, denn wir finden z.B. bei der Sonne eine Äquatorialgeschwindigkeit von etwa 1,5 km je Sekunde. Bei Geschwindigkeiten von mehr als

1) Diese Theorie wird heutzutage stark angezweifelt.

einigen hundert km je Sekunde würden die Zentrifugalkräfte den Stern zerstören.

MÖGLICHKEITEN DER KONDENSATION

Wie ist nun trotz all dieser Schwierigkeiten dennoch ein Kondensationsprozeß denkbar? Das Problem wird leichter lösbar, wenn wir annehmen, daß sich in dem interstellaren Material auch größere Brocken befinden. Hier haben wir einen, wenn auch sehr unbesimmten Hinweis auf die später beschriebene PROTOSTERNHYPOTHESE des Russen V.AMBARZUMJAN, ohne daß der Ausdruck verwendet wird.

Derartige "Brocken" werden vom Magnetfeld nicht beeinflusst. Weiters ist leicht zu zeigen, daß eine Ansammlung derartiger Brocken während der Kondensation ihren Überschuß an Rotationsenergie verliert. Darüber hinaus sind diese Brocken imstande, je nach vorhandenem Material, den kleinsten Planeten ebenso aufzubauen, wie den größten Stern.

Leider haften diesem Schema zwei Mängel an:

Erstens, woher kommen diese Brocken? (AMBARZUMJAN hat dafür eine Erklärung) und zweitens sollten sie Beobachtungseffekte hervorbringen (z.B. sollte Licht von entfernten Sternen durch sie verdeckt werden), bzw. welche Größe und welche Masse haben sie, wenn derartige Effekte ausbleiben? Wir beobachteten bis dato Derartiges in den interstellaren Gaswolken nicht.¹⁾

Weitere Möglichkeiten der Kondensation könnten durch besondere Kräfte, welche von außen das Material komprimieren, gegeben sein. Hier existieren ebenfalls Theorien. Weiters könnte brockenartiges Material durch Sternexplosionen entstehen. Wie dem auch sei, man hat in den Gaswolken dunkle Flecken (Globulen) beobachtet, welche offenbar dichte Körper aus interstellarer Materie darstellen. Sie sind klein - etwa 1 Lichtjahr im Durchmesser - verglichen mit der Gaswolke und haben die Masse eines Sterns. Diese Gebilde könnten durch Kompression von außen her entstanden sein, etwa durch die Druckwelle einer Sternexplosion. Wir erinnern nochmals an die Riesengaswolke, mit etwa 1000facher Sonnemasse. Bei derart großräumigen Gas- Staubwolken sind die äußeren Schichten sehr wohl in der Lage, die Zentralregion von der Strahlung und Ionisierung durch benachbarte Sterne abzuschirmen, so daß das Innere der Wolke unionisiert und die Teilchen gegenüber Magnetfeldern neutral, d.h. unbewegt bleiben, so daß eine Kondensation trotz interner Hitzeenergie stattfinden kann.

DER ZERFALL (FRAGMENTATION DER GASWOLKE)

Wir müssen voraussetzen, daß Sterne nicht einzeln, sondern in größeren Gruppen entstehen. Bei einer Wolke mit 1000facher Sonnemasse wird die Anzahl der entstehenden Sterne auch in ähnlicher Größenordnung liegen. Die interstellare Wolke bzw. die Zentralregion kontrahiert und wird dabei instabil und zerfällt in kleinere Teile, die für sich weiter kontrahieren, unter eigener Gravitation. Diese Teilstücke werden ebenfalls instabil und weitere Fragmentationen treten ein. Dieser Vorgang kann sich wiederholen und dabei können sich die Fragmente so aufheizen, daß sie als PROTOSTERNE erkennbar werden. Die Fragmentation endet und das ursprünglich transparente Material wird undurchsichtig und als Ergebnis wird die Hitzestrahlung nun zurückgehalten. Dieser Ablauf der Sternentstehung paßt recht gut zu vorhandenen Beobachtungsergebnissen. Ein Großteil der Sterne in unserer Galaxis gehören Sterhaufen-Assoziationen an! Diese Ansicht wird auch von den Gegnern der Kondensationstheorie geteilt! Was ist aber mit Einzelsternen, wie etwa der Sonne? Hier muß auf die Instabilität von Sternassoziationen hingewiesen werden, welche bewirkt, daß in relativ kurzer Zeit, die Einzelsterne in den Raum entweichen! Auch Stern-Clusters sind instabil, jedoch dauert es länger bis sie zerfallen. Die Zeit des Zerfalls hängt von der Anzahl der Sterne in der Gruppe und von ihrem gegenseitigen Abstand ab. Gruppen mit wenigen Mitgliedern lösen sich rascher auf.

1) Diese Hypothese ist nach dem heutigen Stand der Wissenschaft nicht mehr zu halten.

Theoretische Abschätzungen zeigen:

Massive Kugelsternhaufen sind etwa 10^{10} Jahre alt.

Offene Sternhaufen, wie etwa die Plejaden, sind 10^8 Jahre alt.

Junge und alte Sternhaufen können dadurch unterschieden werden, daß in alten Haufen kaum noch Gas-Staubreste vorhanden sind, da sie als Baumaterial verwendet und der Rest durch den Strahlendruck und die Hitzewirkung der Sterne weggeblasen wurde.

Wenn eine große Anzahl von Sternen gleichzeitig entsteht, so ist es sehr wahrscheinlich, daß auch echte Mehrfachsysteme, wie Doppelsterne oder Dreifachsterne entstehen. Sogar Sechsfachsysteme (Castor in den Zwillingen ist ein Beispiel) wurden entdeckt. In diesem Mehrfachsystem hat man ein noch nicht vollständig erklärtes Phänomen beobachtet: Einige Sterne konnten beobachtet werden, die sich mit hoher Geschwindigkeit (einige hundert km je Sekunde) aus der Region der Sternentstehung entfernen. Z.B. wurden drei Sterne entdeckt, die mit hoher Geschwindigkeit aus der bekannten Sterngeburtsstätte des ORION entfliehen. Es sind junge, heiße Sterne, genau wie die, die in der Assoziation verbleiben. Eine mögliche Erklärung wäre das Entweichen eines Doppelsternpartners, wobei eine Komponente plötzlich explodiert und die zweite in den Raum schleudert. Eine Explosion dieser Heftigkeit könnte noch andere Reaktionen zeigen. Tatsächlich beobachtet man einige schwach leuchtende Filamente in der nächsten Umgebung der Hauptmateriewolke im Orionnebel, welche Druckwellen von explodierenden Sternen anzeigen könnten (TAFEL 1).

WEITERE STERNKONTRAKTIONEN

Wir betrachten nun den weiteren Verlauf der Sternbildung eines Einzelobjektes (Eine Ausnahme ist die Entstehung eines Doppelsterns, hier gelten andere Gesetze). Der Protostern kontrahiert nach der letzten Fragmentation aufgrund seiner eigenen Gravitationskräfte. Dadurch steigt die Temperatur umso rascher, je undurchsichtiger er wird und zwar viel stärker im Zentrum als an der Oberfläche. Er liegt nun im HR-Diagramm rechts unten, weit entfernt von der Hauptsequenz (siehe Abb. 1.7.)

Der weitere Ablauf:

Die Sternmaterie ist überwiegend kalter Wasserstoff in Molekülform H_2 . Bei 1500 K etwa, zerfallen die Moleküle. Um die große Menge Wasserstoff zu spalten d.h. in Einzelprot. aufzulösen, muß der Stern rasch Energie produzieren.

Diese Energie kann nur durch rasche Kontraktion aufgebracht werden. Die Berechnungen zeigen tatsächlich einen raschen Kollaps in Richtung Sternzentrum an.

Dieser Prozeß endet jedoch nicht mit der vollst. Ionisation aller H_2 -Moleküle in Atome, sondern setzt sich wegen der inzwischen stark angestiegenen Temperatur fort, bis die H-Atome in Elektronen und Protonen aufgesplittert sind.

Der Kollaps setzt sich weiter fort, auch wenn der gesamte Wasserstoff ionisiert ist. Wir dürfen annehmen, daß der Kollaps nun eine derart hohe Temperatur geschaffen hat, daß nicht nur die H-Atome aufgebrochen wurden, sondern auch die Ionisation der Heliumatome aktiviert wurde. Der Kollaps setzt sich fort, bis beide Bestandteile, Wasserstoff und Helium, vollkommen ionisiert sind.

Die Sonne würde als Protostern einen Radius von 100 AE, - (astronomische Einheit ist Distanz Erde - Sonne), das ist weit außerhalb der Grenzen des derzeit bekannten Planetensystems (Pluto ist von der Sonne rund 39 AE entfernt) - besitzen, wenn der Kollaps begänne.

Der Kollaps endete, wenn der Radius 0,25 AE ist, das ist kleiner als die Merkurdistanz (0,39 AE) von der Sonne.

Der gesamte Kollaps dauert einige hundert Jahre. Im HR-Diagramm springt der Protostern



TAFEL 1: Orionnebel- eine bekannte, vermutete Sternengeburtstätte

von seiner Position als kühler, schwacher Stern, in die Position eines hellen und beträchtlich heißeren Sterns.

Der Weg zur Hauptreihe verläuft nun nicht in einer horizontalen Geraden im HR-Diagramm, vielmehr bewirkt seine Umgebung in der Gas-Staubwolke gewisse Zwischenaktionen, die sich in einem Auf und Ab im HR-Diagramm auswirken. Aber die generelle Tendenz ist die Bewegung von rechts nach links zur Hauptsequenz. Für massereichere Sterne ist dieser rechts-links Weg viel ausgeprägter, d.h., das Auf-Ab im HR-Diagramm ist viel geringer.

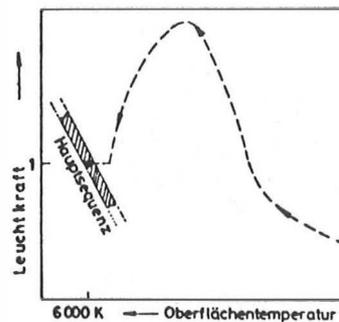


Abb. 1.7

Weg eines kontrahierenden Protosterns ($1M_{\odot}$) im Hertzsprung Russell - Diagramm.

WIRD DIE STERNKONTRAKTION BEOBACHTET?

Das Frühstadium der Sternbildung verläuft relativ rasch, wenn erst einmal ein Kern gebildet ist. Die letzten Stadien der Kontraktion dauern am längsten, dennoch, die Gesamtzeit für einen Stern wie die Sonne beträgt nach D.D. CLAYTON etwa 8×10^7 Jahre. (Diese Zahlen sind sehr unsicher, da ja der Beginn der Kontraktion kaum definierbar ist. Nach anderen Autoren beträgt diese Zeitspanne nur $3 \cdot 10^7$ Jahre, nach MEADOWS sogar nur "einige" 10^6 Jahre). In einem gewissen Entstehungsstadium ist dieser sonnenähnliche Stern vollkommen konvektiv und wird daher vollständig "durchmischt", so daß er eine generelle homogene chemische Zusammensetzung beim Erreichen der Hauptsequenz besitzt. Dies ist aber im Spektrum beobachtbar. Die tatsächliche Zeitspanne der Kontraktion hängt hauptsächlich von der Menge der vorhandenen interstellaren Materie ab. Die Sonne benötigt einige Millionen Jahre (siehe weiter oben) für diesen Prozeß. Ein Stern mit zwei Sonnenmassen benötigt wesentlich weniger als eine Million Jahre! Ein Stern mit halber Sonnenmasse benötigt mehr als 100 Millionen Jahre.

Von der Masse hängt daher auch die Lage des Punktes auf der Hauptsequenz ab, bei welchem sich der Stern auf ihr niederläßt. Das heißt, je massereicher der Stern ist, umso höher links wird dieser Punkt auf der Hauptsequenz (siehe HR-Diagramm, Abb. 1.8) liegen. Auch dies ist beobachtbar.

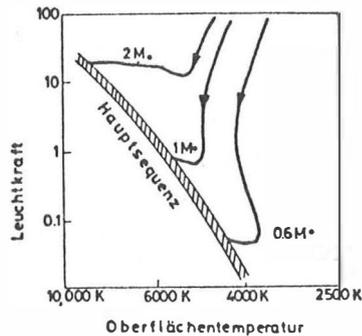


Abb. 1.8

Endkontraktionsstadium im Hertzsprung Russell-Diagramm. Der Krümmungsknick zeigt den Punkt, wo der Protostern seine Konvektivität beendet. Für Massen weniger als $\frac{1}{4} M_{\odot}$ bleibt der Protostern völlig konvektiv.

Je rascher ein Stern kontrahiert, umso geringer ist die Chance, ihn zu beobachten. Wir finden daher kontrahierende Sterne mit geringer Masse mit größerer Wahrsch.. Wir halten deshalb Ausschau nach schwachen, rötlichen Sternen, die rechts von der Hauptsequenz im HR-Diagramm liegen. Das Problem ist nur, daß Sterne auch im späten Lebensstadium durch diesen Diagrammbereich wandern. Bestimmte Sterne können daher sowohl alte als auch junge sein und es ist schwer, dies durch direkte Beobachtung zu erkennen. Wir versuchen dieser Schwierigkeit Herr zu werden, indem wir unsere Suche auf junge Sternhaufen konzentrieren, hoffend, daß irgendwelche Mitglieder dieser Clusters im Kontraktionsstadium sind. In der Tat, wenn wir die Gruppe im Orionnebel durchforsten, finden wir eine beträchtliche Anzahl schwacher Sterne, rechts oberhalb der Hauptreihe. Die T Tauri-Sterne, VERÄNDERLICHE, haben irreguläre Helligkeitsveränderungen und sind stets von interstellarer Materie umgeben, was ihre Jugend anzeigt. Eine faszinierende Eigenschaft, die sie von Hauptreihensternen wesentlich unterscheidet, ist die Masse an Lithium, die sie besitzen, demnach müßten sie kontrahieren, wobei die Zentrumstemperatur noch nicht hoch genug ist, um Lithium zu verschmelzen.¹⁾ Es ist sogar wahrscheinlich, daß der plötzliche Sprung vom schwachen zum hellen Stern schon beobachtet worden ist. Photos von T Tauri-Regionen zeigen häufig kleine Knoten in der interstellaren Materie, welche nach ihren Entdeckern - HERBIG-HARO-Objekte genannt werden. Im Jahre 1954 entdeckte man im Orion-Nebel, daß eines dieser Objekte augenscheinlich zwei Sterne enthielt, welche wenige Jahre vorher sicherlich noch nicht sichtbar waren. Wir können annehmen, daß sie sehr schwache Protosterne waren, welche plötzlich "zündeten" und sichtbar wurden. Da junge Sterne durch die Gas-Staubwolke unserer Sicht leicht entzogen werden können, hilft uns hier die Infrarotphotographie. Wir haben dadurch Aufschluß erhalten, daß im Orion-Nebel zweifellos zahlreiche Protosterne existieren, ebenso wie im Trifid-Nebel (TAFEL 2).

1) Diese Aussagen sind, und das ist wesentlich, statistisch aufzufassen.



TAFEL 2: Globulen im Trifidnebel (siehe Pfeile)

ROTATION UND MAGNETFELD

Wir haben in einem früheren Abschnitt die Frage noch nicht beantwortet, was mit dem Energieüberschuß an Rotationskräften bei der Kondensation geschieht. Nun, auch hier kann ein Modell gefunden werden, das eine brauchbare Erklärung liefert. Die folgende Abbildung zeigt das Modell, welches die Frage beantwortet:

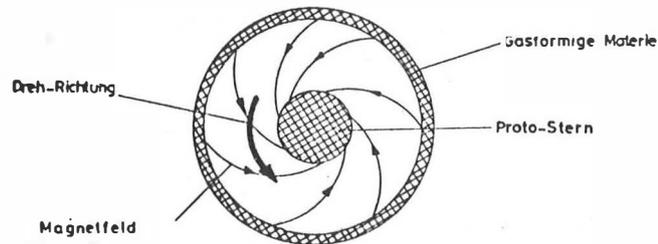


Abb. 1.9

Die Fahrrad-analogie.

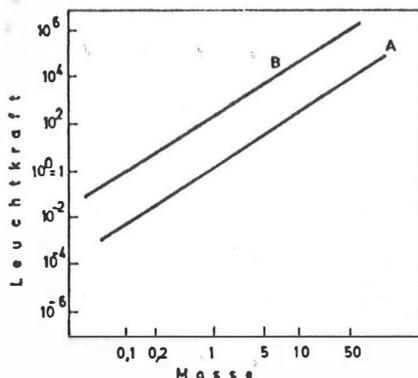
Der Protostern rotiert sehr rasch und wirft dadurch am Äquator Material ab. Bei weiterer Kontraktion würde er dieses Material gänzlich verlieren, jedoch das Magnetfeld hält es gewissermaßen zurück. Diese magnetische Feldenergie ist teils im Protostern und teils in der verströmten Materie verankert. Was nun geschieht, zeigt die Abb. 1.9. Wenn der Protostern sehr rasch rotiert, so werden sich die "elastischen" Magnetfeldlinien wie in der Abbildung dargestellt, "verformen" und die gasförmige Schale ebenfalls in Rotation versetzen. Die Rotationsenergie wird also vom Protostern via Magnetfeldlinien auf die Gashülle übertragen. Dieser Mechanismus scheint geeignet, die Rotationsgeschwindigkeit des Sterns soweit zu reduzieren, daß sie Werte erreicht, wie sie bei Sternen nahe der Hauptsequenz tatsächlich beobachtet werden: so könnte ein Teil des letzten offenen Hauptproblems gelöst werden.

DIE HAUPTREIHE – DAS ENDE DER KONTRAKTION

Mit dem Erreichen der Hauptsequenz ändern sich Helligkeit und Oberflächentemperatur nur noch sehr langsam. Die Zentrumstemperatur ist nun knapp über 1,000 000 K. Es beginnt nun das eigentliche "Wasserstoffbrennen", sobald das Deuteriumbrennen, eine kurze Episode im Leben der Sterne, beendet ist. Das Wasserstoffbrennen nimmt den größten Zeitraum im Lebenszyklus eines Sterns ein. Die Energie, die bei der Umwandlung von Wasserstoff in Helium frei wird, ist ausreichend, allen Energieerfordernissen eines Sterns zu genügen; die Kontraktionsenergie (Hitze) ist nicht mehr erforderlich. Die nun erreichte stabile Situation dauert so lange an, bis alle Wasserstoffreserven im Zentrum verbrannt sind (ca. 10% der gesamten H-Menge), für die Sonne dauert dieser Zeitraum 10^{10} Jahre. Da diese Zeitspanne für alle Sterne die längste in ihrem Leben ist, beobachten wir auch tatsächlich, daß die überwiegende Mehrzahl aller Sterne auf der Hauptsequenz liegt.

Die Position, die der Protostern auf der Hauptsequenz erreicht, hängt von der Masse ab. Je größer diese ist, umso weiter links oben liegt er auf der Hauptsequenz. Dieser Umstand wird einfach durch die Masse-Leuchtkraft-Relation dargestellt, die in logarithmischen Einheiten dargestellt, eine Gerade ergibt (siehe Abb. 1.3.).

Wir müssen nur festhalten, daß für Population I und II-Sterne verschiedene Masse-Leuchtkraftrelationen bestehen, wobei simplifiziert in logarithmischen Nomogrammen dargestellt, für beide Populationen zueinander parallele Gerade als Abbilder resultieren (Abb. 1.10).



Masse-Leuchtkraft Relation für Sterne der Population I u. II.
 A-Pop. I: 75% H + 24% He + 1% schwere Elemente.
 B- Pop. II: 75% H + 24,9% He + 0,1% schwere Elemente.

Abb. 1.10

Massereichere Sterne verweilen kürzere Zeit auf der Hauptsequenz als masseärmere. Z.B. ergibt sich:

Ein Stern mit $15 M_{\odot}$ (Sonnenmassen) verweilt einige 10^6 Jahre,
 ein Stern mit $1 M_{\odot}$ (Sonne) verweilt einige 10^9 Jahre.

Da die massereichen Sterne nur kurze Zeit auf der HS verweilen, findet man daher weit weniger Sterne am "hellen" Ende (links oben) als am "schwachen" Ende (rechts unten). Weiters kann man davon ableiten, daß der Fragmentationsprozeß viel häufiger viele kleine Sterne, als einen einzelnen großen Stern hervorbringt.

In der Folge betrachten wir die weitere Entwicklung der Sterne getrennt nach ihrer Lage am oberen bzw. unteren Ast der Hauptreihe. Die heißen Sterne der OBEREN HAUPTSEQUENZ (OHS) produzieren ihre Energie nach dem Kohlenstoff-Stickstoff-Sauerstoff-Zyklus, während die kühleren Sterne der UNTEREN HAUPTSEQUENZ (UHS) dies durch die Proton-Proton-Zyklusbewerkstelligen. Beide Prozesse verändern die Sternstruktur radikal verschieden. In einer gewissen Bandbreite (für die Population I gilt $1,5 M_{\odot}$ bis $2,5 M_{\odot}$) wird die Energie durch beide Prozesse erzeugt. Bedingt durch dieses "Trennungsband" gehört die Sonne zu den unteren Hauptsequenzsternen.

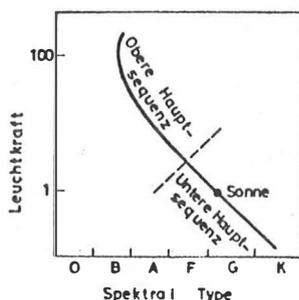


Abb. 1.11

Hertzsprung Russell- Diagramm. Es zeigt die Untere u. Obere Hauptsequenz.

Für die Sterne der OBEREN HAUPTREIHE, welche nach dem Kohlenstoff-Stickstoff-Sauerstoff-Zyklus "verbrennen" ist die ist die Ergiebigkeit der Reaktion stärker temperaturabhängig als bei der Proton-Proton- Zyklus-Reaktion.

CNO-Zyklus: bei Zentraltemperatur von $2 \times$ Sonnentemperatur beträgt die produzierte Energie $10^4 \times$ Sonnenenergie

Proton-Proton-Zyklus: bei Zentraltemperatur von $2 \times$ Sonnentemperatur beträgt die produzierte Energie $5 \times$ Sonnenenergie

Beim CNO-Zyklus steigt die Energieproduktion sehr rasch gegen das Zentrum an, es wird viel mehr Energie erzeugt, als durch Strahlung abtransportiert werden kann, die zentrale Region wird instabil, da die meiste Energie durch Konvektion, d.h. bekanntlich

durch bewegte Materie, abgeführt werden muß. Die äußere Zone bleibt stabil, die Energie wird hier nur durch Strahlung transportiert. Wir können sagen:

Ein Stern der oberen Hauptsequenz besitzt einen konvektiven Kern und eine ausstrahlende Hülle. Diese Struktur spielt in der Weiterentwicklung eine fundamentale Rolle. Für eine beträchtliche Zeitspanne bleibt der Obere-Hauptsequenz-Stern (OHSS) an seinem ursprünglichen Platz auf der Hauptsequenz, bis ein beachtlicher Teil seines Wasserstoffes im Kern verbrannt ist (ca. 90%). Dann wird er langsam heller, jedoch kühler, was gleichbedeutend ist mit einer Zunahme seines Durchmessers. Er wandert von der Hauptsequenz weg und steigt im HR-Diagramm nach rechts aufwärts, aber nicht sehr weit. Seine Helligkeit hat sich dabei verdoppelt und seine Oberflächentemperatur ist um etwa 10% gesunken. Wenn schließlich der gesamte Wasserstoffvorrat im Kern verbraucht ist, fällt der Stern einer inneren Umwandlung anheim, welche ihn von der Hauptsequenz entscheidend entfernt. Die folgenden Ereignisse werden im nächsten Abschnitt erläutert. Wir wollen noch festhalten, daß der Stern während seines Verbleibens auf der Hauptsequenz seine Position innerhalb einer gewissen Bandbreite um die Hauptsequenz ändert.

Die Sterne der Oberen Hauptsequenz haben eine Obergrenze in Helligkeit und Oberflächentemperatur. Wir haben bereits festgestellt, daß die Stabilität eines Sterns hergestellt wird durch

- 1.) die Gravitationkräfte, die nach innen gerichtet sind und
- 2.) nach außen wirkende Druckkräfte, deren Auftreten verschiedene Mechanismen zugrunde liegen.

Diese Mechanismen sind einerseits die hohe Temperatur der atomaren Teilchen (Gasdruck) und andererseits die Strahlung (Strahlungsdruck), die vom Zentrum nach außen wirkt. Bei der Sonne überwiegt der Gasdruck bei weitem den Strahlungsdruck. In sehr massereichen Sternen überwiegt der Strahlungsdruck. Für eine bestimmte Masse stellt sich ein solcher Radius ein, daß Gravitations- und Strahlungsdruck einander das Gleichgewicht halten, dadurch ist die Helligkeit und die Oberflächentemperatur bestimmt. Jedoch gibt es einen oberen Grenzwert für die Masse, über der die Stabilität der Gesamtkonfiguration nicht mehr gewährleistet bleibt.

Theoretische Berechnungen ergaben einen Grenzwert von $100 M_{\odot}$. Die massereichsten beobachteten Vertreter sind die PLASKETT-Doppelsterne mit etwa $70 M_{\odot}$. Dieses System zeigt allerdings Anlagen der Instabilität und verliert offenbar Materie in den Raum.

Die UNTEREN-HAUPTSEQUENZ-STERNE (UHSS) (kleiner als $2 M_{\odot}$) produzieren ihre Energie fast ausschließlich durch den Proton-Proton-Zyklus. Da sich die Energieproduktion gegen das Zentrum hin weit weniger stark aufbaut wie bei den OHS-Sternen, wird das Sternmaterial nicht konvektiv instabil. Der Energietransport erfolgt durch Strahlung und die Materie in der Zentralregion bleibt ungemischt. Aber auch die Hülle dieser Sterne unterscheidet sich von der der OHS-Sterne dadurch, daß sie aufgrund der niedrigeren Temperatur undurchsichtiger ist. Dadurch wird die Möglichkeit des Energietransports durch Strahlung so stark eingeschränkt, daß die Stabilität verloren geht und der Hauptenergiefluß durch Konvektion erfolgen muß. Auf diese Art wird die innere Sternstruktur völlig verschieden von der der OHS-Sterne.

Die exakte Erfassung der Bedingungen in einer konvektiven Hülle ist eines der schwierigsten Probleme der Evolutionstheorie der Sterne. Während diese Bedingungen in einem konvektiven Kern berechenbar sind, ist dies für eine konvektive Hülle nicht möglich. In anderen Worten: die Struktur von UNTEREN-HAUPTSEQUENZ-STERNE ist derzeit nicht mit derselben Exaktheit erfaßbar wie die Struktur der OBEREN-HAUPTSEQUENZ-STERNE.

In der weiteren Entwicklung ändert sich die chemische Zusammensetzung im Kern dadurch, daß der Wasserstoff im Zentrum viel rascher verbrennt als in der Umgebung. Dadurch bewegt er sich langsam die Hauptsequenz empor. Die Größe bleibt erhalten, die Oberflächentemperatur und die Helligkeit werden größer. Wenn der gesamte Wasserstoff im Zentrum

und auch außerhalb des Zentrums verbrannt ist, endet die Bewegung entlang der Hauptsequenz und es folgt eine Abwanderung nach rechts im HR-Diagramm, d.h., der Radius beginnt anzuwachsen.

Nunmehr befinden sich zwar beide Sternarten (OHSS und UHSS) im selben Bereich des HR-Diagramms, aber der große Unterschied liegt im Ablauf dieser Entwicklungsstufe, d.h. die masseärmeren UHS-Sterne bleiben wesentlich länger in der Nähe der Hauptsequenz, während die massereichen OHS-Sterne plötzlich in ihre nächste Entwicklungsphase schreiten, da sie ihren Wasserstoffvorrat sehr plötzlich in ihrem Zentrum verbrauchen, während die UHS-Sterne diese Entwicklungsphase viel langsamer durchlaufen. Wir werden im Abschnitt 1.1.6. noch Genaueres erfahren.

Die untere Grenze der Hauptsequenz ist durch eine bestimmte minimale Helligkeit und minimale Oberflächentemperatur gegeben. Damit im Zusammenhang steht eine Minimalmasse, die etwa 0,07 bis 0,09 M_{\odot} beträgt. Wenn die vorhandene Masse so gering ist, kann die Kontraktion die erforderliche Zündungstemperatur von etwa 10^6 K nicht mehr hervorbringen; dieser Protostern kann nie die Hauptsequenz erreichen, womit die untere Grenze der Hauptsequenz gegeben ist.

Wir haben bereits mehrfach angedeutet, daß die CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG neben der Masse eine bedeutende Rolle in der Sternentwicklung spielt.

Wir haben bisher hauptsächlich die Sterne der Population I betrachtet. Glücklicherweise gelten die meisten Aussagen auch für die Mitglieder der Population II.

Die chemischen Unterschiede der beiden Populationen bestehen in der Menge schwerer Elemente und zwar:

- 1.) Population I hat etwa 70% H, 27% He, 3% schwerere Elemente
- 2.) Population II kann etwa 70 - 90% H, 29,9 - 9,9 He, 0,1% schwerere Elemente haben.

Dieser Unterschied in der chemischen Zusammensetzung reflektiert sich in verschiedener Helligkeit und Oberflächentemperatur der Sterne. Es gelten die folgenden Regeln:

- 1.) Je weniger Wasserstoff ein Stern mit gegebener Masse hat, umso heißer und heller wird er. Weiters gilt:
- 2.) Je weniger schwere Elemente vorhanden sind, umso heißer und heller wird ein Stern.
- 3.) Demgemäß sind die hellsten Hauptsequenzsterne jene, die am meisten Helium besitzen.
- 4.) Die Helligkeit und die Oberflächentemperatur steigen an, wenn die chemische Zusammensetzung sich ändert und zwar von der Population I- zur Population II-Charakteristik, woraus folgt,
- 5.) daß Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung einen Stern sich eher entlang der Hauptsequenz bewegen läßt, als von ihr abzuweichen.
- 6.) Die Position eines Sterns auf der Hauptsequenz ist also durch die Masse und die chemische Zusammensetzung gegeben, d.h., daß z.B. ein Stern mit 1 M_{\odot} und 60% H-Gehalt dieselbe Position einnehmen kann, wie ein Stern mit 1,3 M_{\odot} und 80% H-Gehalt.
- 7.) Die Bandbreite, die die OBERE und UNTERE HAUPTSEQUENZ trennt, beträgt für Sterne der Population I die bereits erwähnte Größe von 1,5 M_{\odot} bis 2,5 M_{\odot} , jedoch für Sterne der Population II den Wert von etwa 4 M_{\odot} .

Sterne der Population I mit 1,5 M_{\odot} bis 2,5 M_{\odot} haben einen kleinen konvektiven Kern, wo Wasserstoff im CNO-Zyklus brennt, der eingeschlossen ist von einer stabilen Region, in der Wasserstoff in der Proton-Proton Kette zu Helium verschmilzt. Es folgt eine Region in der die Energie durch Strahlung transportiert wird. Eine eigentliche Energieproduktion in ihr findet nicht mehr statt. Schließlich folgt eine Konvektionszone, die bis zur Sternoberfläche reicht. Sterne in dieser "Massenregion" von 1,5 M_{\odot} bis 2,5 M_{\odot} sind gewissermaßen eine Kombination eines Oberen- mit einem Unteren Hauptsequenz-Stern.

Wenn ein Stern eine MASSEÄNDERUNG in seiner Entwicklung erfährt, so hat diese bedeutende

Auswirkungen auf den weiteren Lebensweg des Sterns.

Bisher haben wir konstante Masse nach Beendigung der Kontraktion angenommen. Ein Massezuwachs aus dem Raum ist nach Erreichen der Hauptsequenz unwahrscheinlich, ausgenommen, zwei Sterne bilden ein Doppelsternsystem. Der entgegengesetzte Fall, des Masseverlustes in verschiedenen Entwicklungsstadien kann jedoch sehr häufig beobachtet werden. Als Beispiele mögen die T TAURI-Sterne am Beginn und die ROTEN RIESEN am Ende der Sternevolution gelten.

Die größten Masseverluste finden wir bei den hellen, heißen Sternen am oberen Ende der Hauptsequenz, wie etwa bei den WOLF-RAYET- oder auch bei den Be-Sternen. Letztere verströmen das Material unregelmäßig, oft mit langen Zeitperioden zwischen den Ausbrüchen. Die abgestoßene Masse ist schwer bestimmbar, aber man nimmt an, daß sie groß genug ist, um Einfluß auf die weitere Entwicklung zu nehmen. Ein derartiger Masseverlust bewirkt das Abwandern von der Hauptsequenz und zwar nach RECHTS-UNTEN! Eine Bewegung, die völlig außerhalb des normalen Abwanderns nach RECHTS-OBEN liegt. Man hat derartige Fälle beobachtet, insbesondere bei Komponenten sehr naher Doppelsysteme, auch KONTAKT-DOPPELSYSTEME genannt. Diese Sterne haben eine so geringe gegenseitige Distanz, daß die Gravitationskräfte stark wirksam werden und Sternmaterie von der Oberfläche abgesaugt und in den Raum verströmt wird. Dies beeinflußt die weitere Endevo- lution außerordentlich.

Eine bedeutende Rolle werden bei der zukünftigen Sternerforschung die NEUTRINOS spielen. Die Sonnennähe gibt uns die Möglichkeit, mit Hilfe der emeritierten NEUTRI- NOS Aufschluß über das Geschehen im Inneren des Sterns zu erhalten. Man spricht bereits von einer NEUTRINO-ASTRONOMIE, aber dies ist verfrüht, da wir derzeit noch kaum in der Lage sind, NEUTRINOS als Informationsträger entsprechend "auffangen" zu können, wie uns dies bei den elektromagnetischen Wellen aller Frequenzen bereits leicht gelingt. NEUTRINOS entstehen sowohl beim CNO-Zyklus wie bei der Proton-Proton-Kettenreaktion. Das Neutrino hat weder Masse noch Ladung jedoch Spin und bewegt sich mit Lichtgeschw.. Aufgrund der beiden erstgenannten Eigenschaften besteht keine interaktive Einwirkung auf andere atomare Partikel. Daher verlassen sie bereits 2 bis 3 Sekunden (!) nach ihrer Entstehung im Sonnenzentrum dieses und entführen Energie ohne Hitzeproduktion. Die entführte Energie beträgt zwar nur etwa 3% der produzierten Totalenergie, in spä- teren Entwicklungsstadien kann dieser Energieanteil jedoch wesentlich signifikanter werden! Wenn wir diese Neutrinoströme wie elektromagnetische Wellen mit Hilfe von "Neutrinoteleskopen" auffangen könnten, wären wir in der Lage, in das Sonneninnere zu blicken, denn die Neutrinoemission ist ein mittelbares "Abbild" von den im Zentrum eines Sterns ablaufenden Nuklearreaktionen. Um e i n Neutrino jedoch "einzufangen" benötigt man derzeit noch ungeheure Mengen von Tetrachloräthylen (hunderttausende Liter) und dennoch würde nur 1 Neutrino je Woche (!) eingefangen werden. Um Störeffekte aus- zuschließen, müssen die Tetrachloräthylenbehälter am Grunde von Minenschächten aufge- stellt werden, um dort ev. Neutrinos einzufangen. Die Ergebnisse sind bis dato sehr ungenau bezüglich der Zahl der festgestellten Neutrinos und daher unbefriedigend. Dennoch hat man gefunden, daß die Neutrino-Produktion viel geringer ist, als theoretisch berechnet wurde. Ist dies richtig, so werden unsere Vorstellungen von der Sternevolu- tion stark erschüttert, da wir doch selbstverständlich annahmen, die Sonne viel besser als alle übrigen Sterne zu begreifen. Ein Ausweg aus diesem Dilemma könnte in dem Um- stand liegen, daß die Sonne regelmäßig pulsiert, wie man weiß. Durch Beobachtung dieser Pulsation können wir ebenfalls "in das Innere" der Sonne blicken. Diese Ergebnisse bestätigen die Richtigkeit unseres gegenwärtigen theoretischen Modells der Sonne. Unser Dilemma lautet daher:

Sind die Ergebnisse der Pulsationsbeobachtung richtig oder die der Neutrino registrierung?

1.1.5. DIE GEBURT SEHR MASSEREICHER STERNE

In letzter Zeit sind eingehende Studien und Beobachtungen über das Problem der Entstehung sehr heißer und massereicher Sterne gemacht worden. M. ZEILIK hat in [3] darüber berichtet. Die Geburt dieser kosmischen Objekte hat die Astronomen und Astrophysiker seit längerer Zeit vor schwere Probleme gestellt und man glaubt nun eine Theorie gefunden zu haben, die weitgehendst mit den Beobachtungsergebnissen übereinstimmt.

Diese massereichen Objekte haben eine Lebensdauer von nur einigen

10^6 (!) Jahren. Das Ende ist stets eine katastrophale Explosion, eine Supernova.

In den letzten Jahren hat die Radio- und vor allem die Infrarot-Astronomie geholfen, die Geburtsstätten derartiger massereicher Sterne aufzuspüren und darüber hinaus scheinen die Beobachtungsergebnisse anzuzeigen, daß die Entstehung unmittelbar durch Schockwellen hervorgerufen wird, die durch die sehr großen Materiewolken rasen, welche man z.B. im Sternbild der CASSIOPEIA beobachtet hat (IC 1795, IC 1805) und welche in der Hauptsache aus ionisiertem Wasserstoff bestehen (H_{II} -Regionen).

Diese massiven Sterne sind blau-weiße Riesensterne des Spektraltyps O und B. Die Oberflächentemperaturen liegen zwischen 16 000 und 45 000 (!) Kelvin, die Leuchtkräfte sind 800 bis 500 000mal größer als die der Sonne und sie besitzen 6 bis 60 Sonnenmassen. Ein entscheidendes Faktum ist ihre fast ausschließliche Ansiedlung in den Spiralarmen der Galaxis.

Die Staub- und Gaswolken aus denen diese massereichen Sterne entstehen, enthalten neben den Staubkörnern Gasmoleküle von Wasserstoff (H_2), welche überwiegen, ferner OH-Moleküle, weiters Wasserstoffzyanid- (HCN) und Kohlenmonoxydmoleküle (CO). Die Staub- Gas-Verteilung läßt sich etwa mit 10^{12} Gasatomen auf ein Staubkorn ausdrücken. Bemerkenswert ist jedoch die gigantische Ausdehnung derartiger Wolken, sie mögen einen Durchmesser von einigen zehn Parsec ($1 \text{ pc} = 3,262 \text{ L.J.}$), etwa 100 000fache Sonnenmasse, eine Dichte von ca. 1 000 Molekülen je cm^3 und eine Temperatur von 15 bis 20 K besitzen. In diesem prästellaren Stadium emittiert die Wolke elektromagnetische Wellen im Millimeterbereich. Theoretische Arbeiten ergaben, daß der neugeformte Riesenstern vorerst geringe Oberflächentemperatur, aber hohe Leuchtkraft besitzt. Im weiteren Verlauf steigt die Temperatur rasch an, die Leuchtkraft bleibt aber fast die gleiche. Z.B. ist die Oberflächentemperatur eines $15 M_{\odot}$ -Sterns am Beginn der Evolution ca. 4 000 K und seine Leuchtkraft etwa 10 000 L_{\odot} (L_{\odot} = Sonnenleuchtkraft). In nur 140 000 Jahren steigt die Temperatur an der Oberfläche auf 32 000 K, die Leuchtkraft aber nur auf das 16 000 fache der Sonnenleuchtkraft.

Im folgenden soll die Theorie von B.G. ELMEGREEN und CH.J. LADA vom Smithsonian Astrophysical Observatory kurz erläutert werden:

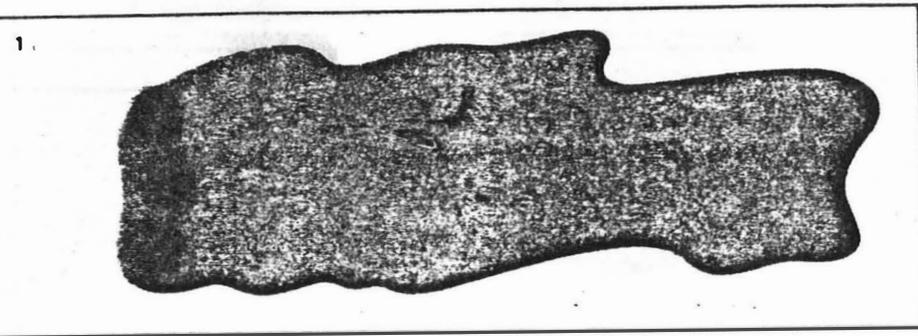
Zwei wichtige Feststellungen bzw. Fragen am Beginn:

- 1.) Viele der Typ O und Typ B-Sterne werden in losen Gruppen von wenigen hundert Sternen gefunden, die aus der Literatur bereits bekannten OB-Assoziationen. Man schließt daher: auch die massiven Sterne oder besser vor allem die massiven Sterne entstehen in Gruppen.
- 2.) Welcher Prozeß bewirkt die gravitative Instabilität der Wolke, die für die Bildung des massiven Sterns notwendig ist?

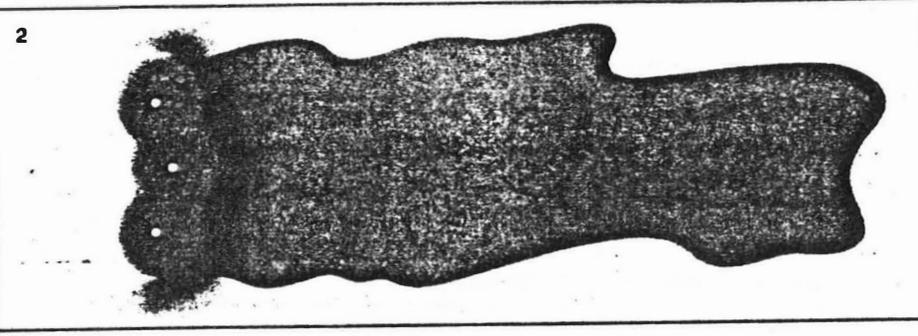
Das Modell ELMEGREEN und LADA beruht auf einer Beobachtung, die von A. BLAAUW von der Universität in Leyden vor einigen Jahren gemacht wurde. Er fand, daß OB-Assoziationen aus getrennten Untergruppen von Sternen bestehen, die etwa 4 bis 20 Sterne beinhalten und ein Raumgebiet von 2 bis 200 pc einnehmen.

Die Untergruppen erscheinen jeweils als in einer einzigen Evolutionsphase entstanden und gewissermaßen wie auf einer Perlschnur aufgereiht: die älteste Untergruppe,

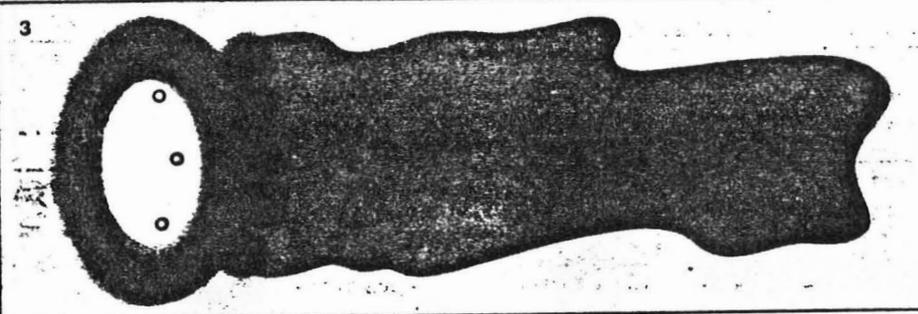
Abb. 1.12



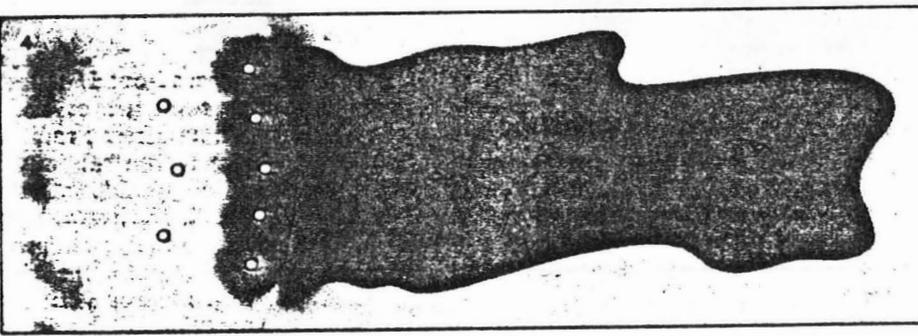
Massereiche Sterne bilden sich in Gruppen, welche als OB-Assoziationen bekannt sind. Eine Schockwelle induziert gravitative Instabilität an einem Wolkenrand (mittelgrau). Diese Schockwelle regt in typischer Art und Weise eine Materieschicht an zu kollabieren und die Sternevolution einzuleiten (1).



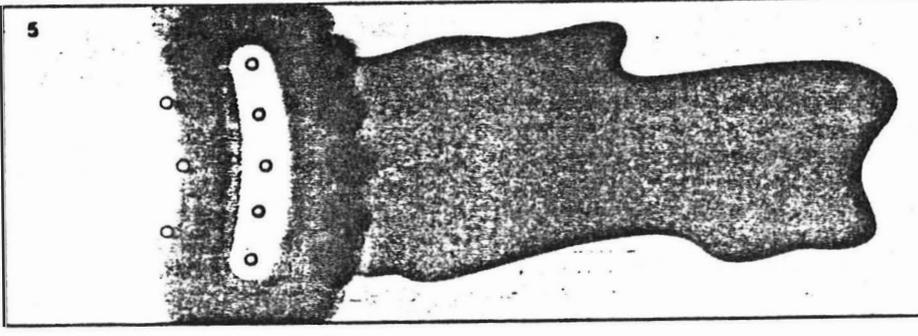
Die expandierende H II-Region (rot) erzeugt nun ihrerseits Schockwellen, welche durch die Wolke eilen, und Materie hinter sich mitreißen (2).



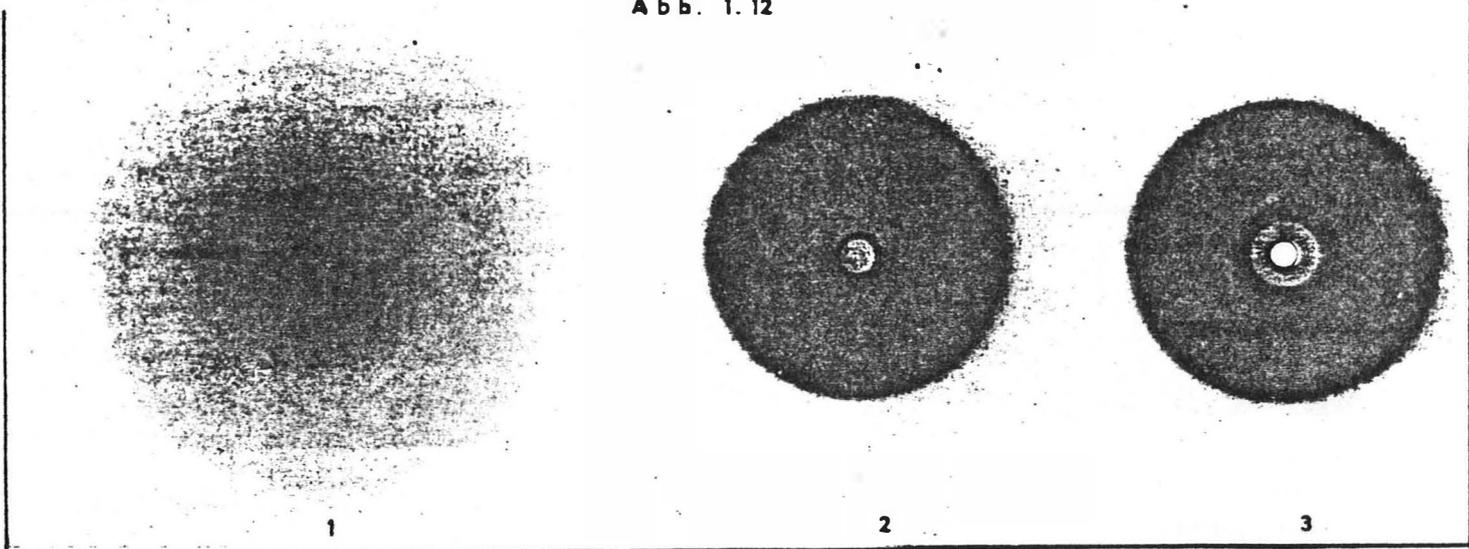
Ist die Dichte dieser neuen Schichte groß genug, um gravitativ instabil zu werden, teilt sie sich und beginnt zu einer 2. Sterneneration zu kollabieren (3).



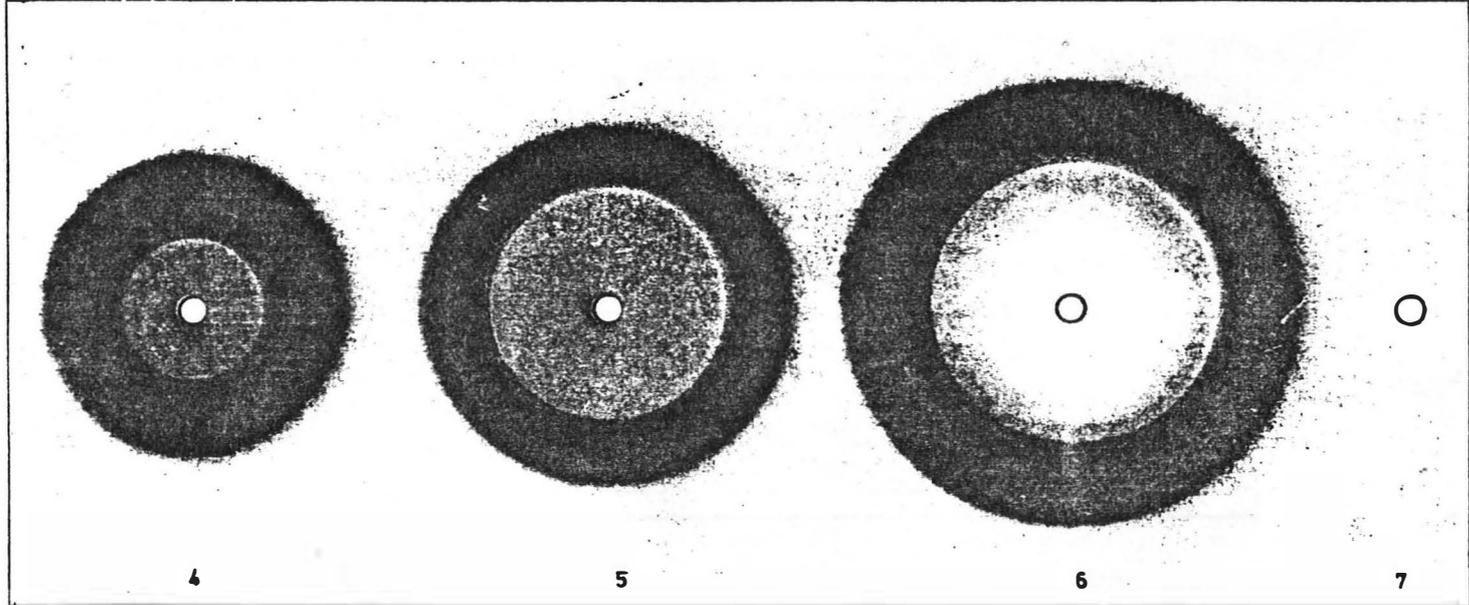
Diese neue Sterngruppe kann nun ebenfalls eine H II-Region schaffen, die ihrerseits expandiert (4) und



Schockwellen produziert, welche die Interstellarwolke (5) durchziehen, wodurch eine 3. Sterneneration entsteht. In der Zwischenzeit sind die älteren Sternenerationen "gereift" (linker Bildteil von 5). In einer derartigen Wolke kann man verschiedene Evolutionsstadien der Sternbildung verfolgen. (Wurde in der Praxis bereits beobachtet, s.o.)



Entwicklungsstadium	Praestellare Wolke kollabiert.	Sehr junger, kühler Stern, „leuchtet“ durch Gravitations - Kontraktion.	Der Stern beginnt mit seinem Kernverschmelzungsprozess im Zentrum.
Beobachtungserscheinung	Kühle dichte molekulare Wolke; CO-Radiowellen - emission.	Kompakte Infrarotquelle, begleitet von molekularer Wolke, welche OH und H ₂ O Radiowellen emittiert	Kompakte Nahinfrarot und Radioquelle in Molekular - Wolke.
Dauer (Jahre)	300,000	25,000	25,000



Entwicklungsstadium	Stern im frühen Normalleben	Junge H II Region beginnt zu expandieren.	Alte, sehr ausgedehnte H II Region beginnt sich mit der interstell. Materie zu vermischen.	Unverhüllter Stern vom Typ O oder B
Beobachtungserscheinung	Infrarot u. Radio- quelle in Molekular- Wolke.	Schwache Infrarot-Emission, Diffuse Zentimeter -Radio- wellen Emission, leuchtende sichtbare Nebel, gerade noch sichtbare Typ O o. B - Sterne.	Keine infrarote Emission, sehr diffuse Zentimeter -Radio - emission, schwache Nebel sicht- bar; Sterne vom Typ O oder B voll sichtbar.	Es wird ein einzelner Typ O o. B - Stern ohne umgebende H II - Region sichtbar.
Dauer (Jahre)	30,000	500,000	2.000,000	6.000,000

Die Geburt eines massereichen Sterns geschieht in aufeinanderfolgenden Stadien, welche bestimmte Beobachtungsmerkmale liefern. Im ersten Stadium verursacht eine Schockwelle in einem Teil der kühlen Gas- und Staubwolke (mittelgrau) gravitative Instabilität und eine Region (dunkelgrau) beginnt zu kollabieren (1). Dabei wird sie heißer und dichter (2), bis sie rot zu glühen beginnt durch die Hitzeenergie, welche durch den Gravitationskollaps frei wird. Als bald beginnt die thermonukleare Fusion im Sternzentrum (3) und die Oberflächentemperatur steigt an, wobei der Stern weiß oder blau wird. Die Sternenergie heizt das umgebende Gas auf; in einigen zehntausend Jahren emittiert der junge Stern soviel UV-Strahlung, daß das Gas in seiner Umgebung ionisiert wird und eine H II-Region bildet (4) (hell). Das erhitzte Gas expandiert nach außen in die kühle Molekularwolke (5), bis es den Großteil der Wolke in den interstellaren Raum bläst (6) und ein unverhüllter, massereicher Stern sichtbar wird (7).

bereits sehr zerstreut (daher der Raum von 200 pc), wurde am Rand der Assoziation gefunden, während die jüngste und noch kompakteste Untergruppe am gegenüberliegenden Rand der Riesenwolke situiert war. Man kann annehmen, daß die Urwolke aus der die Assoziation geformt wurde, in aufeinanderfolgenden "Ausbrüchen" jeweils eine Untergruppe hervorbrachte.

ELMEGREEN und LADA hoben die Tatsache besonders hervor, daß die H_{II} -Region (ionisierter Wasserstoff), in welcher neuentstandene massereiche Sterne eingebettet sind, expandiert und in die umgebende Riesenwolke mit einer Teilchengeschwindigkeit von 5 bis 10 km/sec stößt, rasch genug, um eine Schockwelle zu erzeugen. Wenn diese Welle in die Molekularwolke eindringt, baut sie an ihrer Rückenfront eine Materieschicht auf. Nach wenigen Millionen Jahren wird diese Schicht dicht genug, um instabil zu werden. Sie fragmentiert, die Teile kollabieren und eine neue Untergruppe ist entstanden. Die neuen Sterne werden heißer, ionisieren das umgebende Gas, schaffen eine eigene H_{II} -Region, welche expandiert und eine neue Schockwelle erzeugt, die wieder in die Molekularwolke stößt und sich der Vorgang wie oben wiederholt bis die Riesenwolke aufgebraucht ist (Abb. 1.12). Die folgenden Abbildungen veranschaulichen diesen Prozeß. Die Beispiele für diese Theorie sind offenbar in den glühenden CASSIOPEIA-Nebel IC 1795 und IC 1805 und im OMEGA-Nebel M 17 im SAGITTARIUS gefunden worden. Die Radioemission aus M 17 deutet auf eine Subgruppe von etwa 10 massereichen Sternen hin. Interessanterweise entspricht das Emissionsmaximum nicht dem hellsten sichtbaren Teil von M 17, vielmehr liegt es ein Stück davon entfernt am scharfen Rand des sichtbaren Nebels. Dieses Maximum zeigt an, daß einige Typ O und Typ B Sterne von der Staubwolke verdeckt sind. Mit Hilfe der Millimeterwellen hat man weiters zwei dichte Fragmente einer Molekularwolke entdeckt, unmittelbar neben dem hellsten Teil der H_{II} -Region. Tatsächlich scheint hier die H_{II} -Region in die Wolke zu stoßen. Diese Beobachtungen wurden von M. BEETZ vom M.P.I. in Heidelberg bestätigt und ergänzt. Er fand mit Hilfe der Infrarotphotographie eine Gruppe von mindestens 6 Typ O und Typ B Sterne in der Zwischenzone der H_{II} -Region und der Molekularwolke. All dies deutet auf die Richtigkeit der neuen Theorie hin. Auch andere Astrophysiker haben Beobachtungen an Riesenwolken gemacht, die mit der Theorie offenbar übereinstimmen. So wurden zwei Riesenwolken in der Nähe von M 17 beobachtet, welche Ausdehnungen von 22 mal 86 pc² bzw. 44 mal 170 pc² haben.

Zum Abschluß sollen noch andere Mechanismen untersucht werden, die in der Lage sind, gravitative Instabilität zu erzeugen. Wir wissen, daß die meisten Molekularwolken in sich nicht instabil sind. Äußere Kräfte müssen ins Spiel kommen, diese können sein:

- 1.) Schockwelle durch Explosion einer Supernova, wenn also ein massiver Stern stirbt. Diese Welle kann 10⁶ Jahre wirken!
- 2.) Schockwellen, die in der Galaxie aufgrund der Spiralstruktur entstehen und dem Wesen nach Schallwellen sind. Einige Theoretiker nehmen an, daß zwei "Spiral-Dichte-Wellen" durch die Galaxienscheibe wandern. Wenn diese Dichtewellen die interstellare Materie durchziehen, schieben sie Material vor sich her und kreieren so eine Schockwelle, wenn ihre Durchzugsgeschwindigkeit über der Schallgeschw. liegt.
- 3.) Kollision zweier Molekularwolken. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist gering, etwa eine Kollision in 10⁷ Jahren.

Gegenwärtig ist keine dieser drei Möglichkeiten erwiesen.

Die in diesem Abschnitt geschilderten Erkenntnisse verdanken wir in erster Linie der Mikrowellen- und Infrarotastronomie.

Im Jahre 1966 hat BLAAUW bereits die Formierung massiver Sterne in Untergruppen vorausgesagt, aber die Beobachtungsmöglichkeiten fehlten damals noch.

1.1.6. DAS STADIUM DER ROTEN RIESEN UND DIE ENDPHASEN

Obere und Untere Hauptsequenzsterne (OHSS und UHSS) verbrennen alle ihre zentralen H-Reserven, verlassen die HS und wandern nach rechts im HR-Diagramm. Im Zentrum wird keine Energie mehr produziert, daher wirkt der Gravitation nichts entgegen, das Zentrum kontrahiert und erhitzt sich, ferner schließt die benachbarte Schale dichter an das Zentrum auf und die Temperatur steigt auch hier an. Es beginnt ein Wasserstoffbrennen in der Schale, das nach kurzer Zeit allen Wasserstoff in Helium verschmilzt.

Der kontrahierende Kern wird heißer und strahlender, dadurch expandiert die Hülle, welche geringe Dichte besitzt. Es wird nun der Kern immer dichter, während die Dichte der Hülle abnimmt. Der Stern wandert im HR-Diagramm weiter nach rechts und wird größer und größer. Dieser Prozeß endet, wenn der Kern mehr als ein Zehntel der Gesamtmasse besitzt (er hat von der Hülle Materie aufgenommen), dies heißt die SCHOENBERG-CHANDRA-SEKHAR-Grenze. Der Kern wird instabil.

Wir müssen nun wieder zwischen den UHSS und den OHSS unterscheiden.

UHS-STERNEDEVELOUTION - NOVAL - PLANETARISCHE NEBEL - WEISSE ZWERGE

Die Dichte im Kern erreicht das 10^5 fache von Wasser und der Kern erhält metallische Eigenschaften, er beginnt guter Wärmeleiter zu werden. Die Materie degeneriert ¹⁾, die SCHOENBERG-CHANDRASEKHAR-Grenze gilt nicht mehr. Der Kern kontrahiert nicht mehr. Um den Kern hüllt sich eine teilweise degenerierte Heliumschicht. Der Stern wird von einer dicken Hülle mit sehr geringer Dichte eingehüllt.

Weiters breitet sich die konvektive Zone von außen gegen das Zentrum aus.

Dieser Umstand läßt nun den Stern im HR-Diagramm aufwärts wandern, er wird heller, er wandert in die Zone der Roten Riesen. Manche Sterne in dieser Region pulsieren, und zwar dann, wenn sie den Instabilitätsstreifen (Abb. 1.14) im HRD durchlaufen, sie ändern regelmäßig ihre Leuchtkraft. Die Zentraltemperatur ist nun etwa einige 10^7 K, es beginnt das Heliumbrennen. Da es sich im Kern um degeneriertes Material handelt, bewirkt die weitere Aufheizung durch den Drei-Alpha-Prozeß, wie er beim Heliumbrennen abläuft, keine weitere Expansion des Sterns, vielmehr erhitzt sich das degenerierte Material sehr rasch. Die Situation wird sehr instabil.

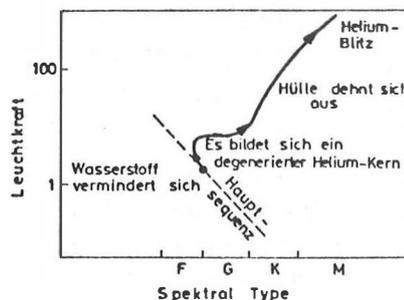


Abb. 1.13

Evolutionsweg eines Unteren Hauptsequenz-Sternes.

Nun tritt ein neuer Umstand ein: Materie degeneriert bei hohem Druck und entsprechender hoher Temperatur, es ist die bekannte Eigenschaft degenerierter Materie, daß sich vorläufig die physikalischen Parameter bei Temperaturanstieg nicht ändern, erst wenn die Temperatur noch weiter ansteigt, so kann es sein, daß der Druck nicht mehr ausreicht, das Material im degenerierten Zustand zu halten, es konvertiert zurück in ionisiertes Gas. Es expandiert nun durch die viel zu hohe Temperatur augenblicklich,

¹⁾ Die Materie nimmt Eigenschaften an, die den bekannten physikalischen Gesetzen degenerierter Materie gehorchen.

es entsteht ein HELIUM-FLASH: In diesem Stadium hätte ein Stern wie die Sonne etwa 50% der Masse im Kern vereinigt. Die Zeit vom Verlassen der Hauptreihe bis zum Heliumblitz würde für einen $0,75 M_{\odot}$ Stern $2 \text{ mal } 10^9$ Jahre dauern, d.s. 15% der Zeit, die er auf der HS verbringt. Die Leuchtkraft ist 100fach so groß wie die der Sonne, die Oberfläche hat wenige tausend K Temperatur - ein typischer Roter Riese ist entstanden.

Die Auswirkungen des Heliumblitzes sind die folgenden:

Während bislang Änderungen in der Struktur des Sterns langsam erfolgten, wird diese nun in Sekundenschnelle signifikant anders.

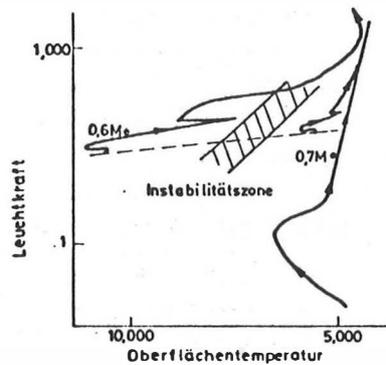


Abb. 1.14

Entwicklung bis zum Helium-Blitz und danach für zwei Sterne mit $0,6 M_{\odot}$ und $0,7 M_{\odot}$.

Im Moment des Blitzes beginnt die Sternexplosion.

Ein Teil der Materie wird in den Raum geschleudert.

Das Endergebnis ist, daß nun im Kern Helium zu Kohlenstoff verbrannt wird, später zu Sauerstoff. In der umgebenden Hülle fusioniert der noch vorhandene Wasserstoff zu Helium. Die Lage im HR-Diagramm wird nun schwer voraussagbar. Grundsätzlich kann man jedoch eine Horizontalbewegung erwarten und zwar nach links, d.h., der Stern wird blau und zwar umso mehr, je geringer die Masse, je kleiner der Anteil an schweren Elementen. Im entgegengesetzten Fall (größere Masse, größerer Anteil an schwereren Elementen) bleibt er im Bereich des Roten-Riesen-Astes.

Wenn alles Helium im Kern verbrannt ist, der Stern heller und heller geworden ist, bewegt er sich im HR-Diagramm hin und her, von rot zu blau und wieder zu rot (Abb. 1.14). Er enthält nun zwei Schalenquellen mit verschiedenen Brennmechanismen und zwar eine Wasserstoffbrennquelle an der Hüllensbasis, darunter eine Heliumbrennquelle um den Kern herum, in diesem selbst eine Sauerstoff-Kohlenstoff-Brennquelle.

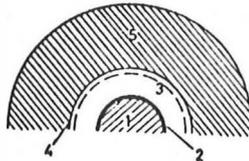


Abb. 1.15

Struktur eines Unteren Hauptsequenz-Sternes im späten Entwicklungsstadium der Hauptsequenz.

1. Innerer Kohlenstoff-Sauerstoff Kern
2. Helium-Verschmelzungszone
3. Innere Helium-Schicht
4. Wasserstoff-Verschmelzungszone (möglicherweise inaktiv in diesem Stadium.)
5. Hülle reich an Wasserstoff.

Der Stern wandert nun stark in den roten Bereich und wird bedeutend heller, er wandert aufwärts. Die Evolutionsgeschwindigkeit erhöht sich, dieser Vorgang dauert nur noch 10^8 Jahre. Nunmehr werden die Voraussagen etwas unsicherer. Durch die Instabilität werden große Masseabstoßungen wahrscheinlicher. Beobachtungstechnisch sind diese als "PLANETARISCHE NEBEL" verifiziert (TAFEL 3).

Wir sehen, daß ein UHSS Materie verliert, wenn das Heliumschalenbrennen einsetzt. Die weitere Entwicklung und das Ende hängt davon ab, wieviel der Stern in diesen letzten Lebensabschnitten verloren hat. Dieser Massehaushalt spielt eine bedeutende Rolle in der Frage nach den Fusionsmechanismen, d.h., Sterne mit weniger als $0,5 M_{\odot}$ können kein Heliumbrennen erreichen.

Sterne mit weniger als $0,75 M_{\odot}$ können Kohlenstoff nicht verschmelzen usw., folglich kann großer Masseverlust den Stern daran hindern, in das nächste Brennstadium zu gelangen, z.B. würde ein $0,5 M_{\odot}$ Stern im Kern nicht entsprechend hohe Temperatur entwickeln können, um die Heliumverschmelzung in Gang zu setzen, ein Helium-Flash wird nie erfolgen, er verbraucht all seinen Wasserstoff im Zentralgebiet, dann wird er kleiner und heißer und quert die HS nach links unten, in den Bereich der Weißen Zwerge wandernd.

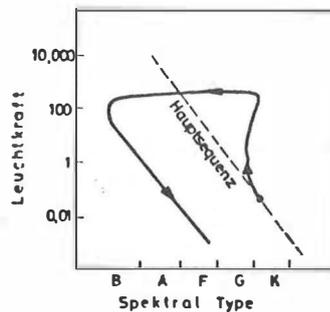


Abb. 1.16

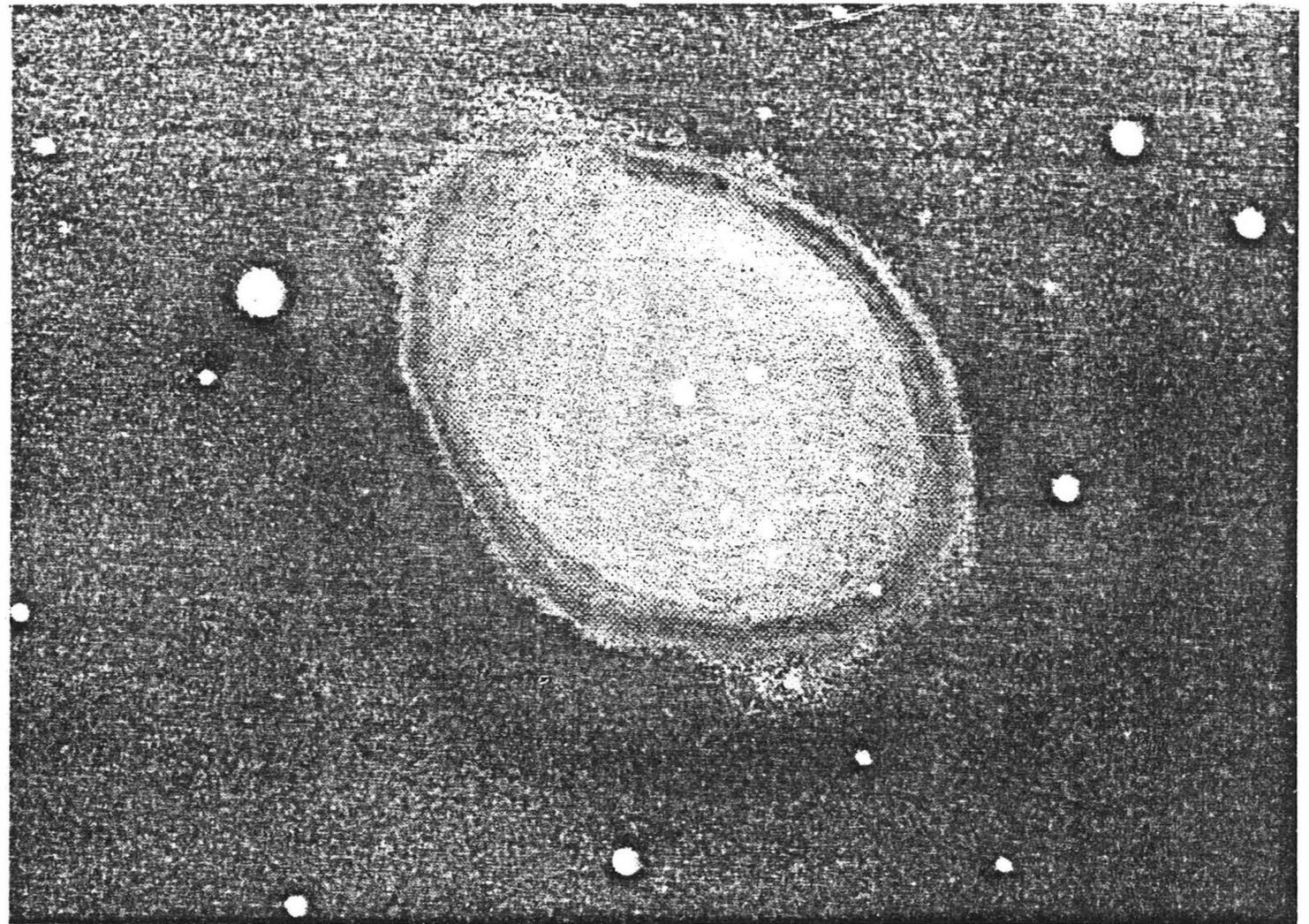
Die Entwicklung eines geringmassigen Sternes $\ll 1 M_{\odot}$ nach der Hauptsequenz.

Unser UHS-Stern hat sein letztes Stadium erreicht.

Nicht nur massereiche Sterne beenden ihr Leben in einer Katastrophe, auch Sterne von mittlerer Masse (unteres Ende der Oberen Hauptsequenz) beenden ihr Leben in spektakulärer Weise. Das Problem liegt im Kohlenstoffbrennen, jedoch mit degenerierter Materie. Die Temperatur liegt um 6×10^8 Kelvin, die Dichte 10^4 x größer als von Wasser. Dies führt zu einem heftigen Relaxationsprozeß, mit starken, plötzlichen Energieverlusten und heftiger Materieemission in den Raum.

Nach diesen heftigen Masseverlusten gelangt der Stern nach bekannten physikalischen Gesetzen in ein gewisses Gleichgewicht unter minimalem Energieaufwand. Wenn er kontrahieren kann, tut er es, aber die meisten dieser Sternüberreste haben bereits hohe Dichte. Daher ist das Endstadium all dieser Sterne eine degenerierte Materieansammlung. Das Problem lautet: Hat degenerierte Materie genügend Steifheit, um den Gravitationskräften widerstehen zu können? Die Antwort: dies hängt wieder von der Masse ab. In einem Stern mit geringer Masse kann die degenerierte Materie sicher widerstehen. In einem Stern mit $1,5 M_{\odot}$ und mehr, kann die degenerierte Materie dies nicht mehr. Dieser Wert ist annähernd der Wert für die "Chandrasekhar Grenze".¹⁾ Die Sterne, die das Stadium der

¹⁾ Der exakte Wert ist $1,44 M_{\odot}$, er ist jedoch materialabhängig. Außerdem ist für diesen Grenzwert auch die Rotationsenergie des Sterns maßgebend, so daß die Zentrifugalkräfte ihn eine zeitlang am Kollaps hindern können.



TAFEL 3: Eine Direktaufnahme, die mit dem Hale-Teleskop gemacht wurde, enthüllt die Form des Ringnebels der Lyra.



.TAFEL 4: Beispiel für einen Planetarischen Nebel in der Vulpecula

Instabilität vermeiden können, liegen auf der HS rechts unten. Für diese Sterne ist die Zeitspanne des letzten Lebensabschnittes derzeit nicht voraussagbar. Es ist anzunehmen, daß sie für ihre Evolutionszeit das gesamte Galaxienalter benötigen. Der Planet Jupiter z.B. kann als Stern sehr geringer Masse angesehen werden, der nie die zur Wasserstoffzündung erforderliche Temperatur in seinem Zentrum erreicht hat. NOVAE und PLANETARISCHE NEBEL (TAFEL 3 und 4) sind rasche, explosionsartige Materiewürfe, welche eine heftige Strahlung produzieren. Derartige Explosionen lassen den Stern plötzlich an Leuchtkraft in großer spektraler Bandbreite zunehmen. Diese Sterne werden blau und besitzen hohe Dichte. Novae-Ausbrüche (siehe Doppelsternmechanismus) emittieren nur relativ wenig Materie in den Raum und werden daher nicht als katastrophales Geschehen im Sternenleben bezeichnet. Obwohl derartige Ausbrüche wiederholt passieren, beträgt die abgestoßene Materie nur Prozente der Gesamtsternmasse. Da Novae i.a. Komponenten von nahen Doppelsternen sind, wissen wir viel über ihre Charakteristik (siehe Abschnitt über Doppelsterne bzw. Röntgensterne).¹⁾

Da Novae kleine dichte Sterne sind, passen sie gut in die Konzeption der Sternevolution zum Studium der Weißen Zwerge. Immerhin, die Natur eines nahen Doppelsternsystems hindert uns natürlich, diese Evolutionsphase schlechthin als Erklärung für die Endentwicklung eines Einzelsterns geringer Masse zu gebrauchen, wiewohl dies nahe läge, da das Endergebnis ein dichter kleiner Stern vom beobachteten Typ ist, wie sich aus der Modellrechnung ergibt.

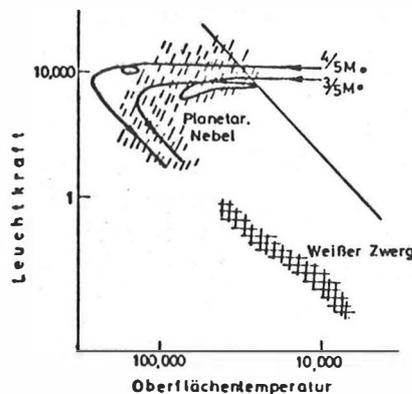


Abb. 1.17

Entwicklung der Planetar. Nebel zu Weißen Zwergen (verglichen mit Beobachtungen.)

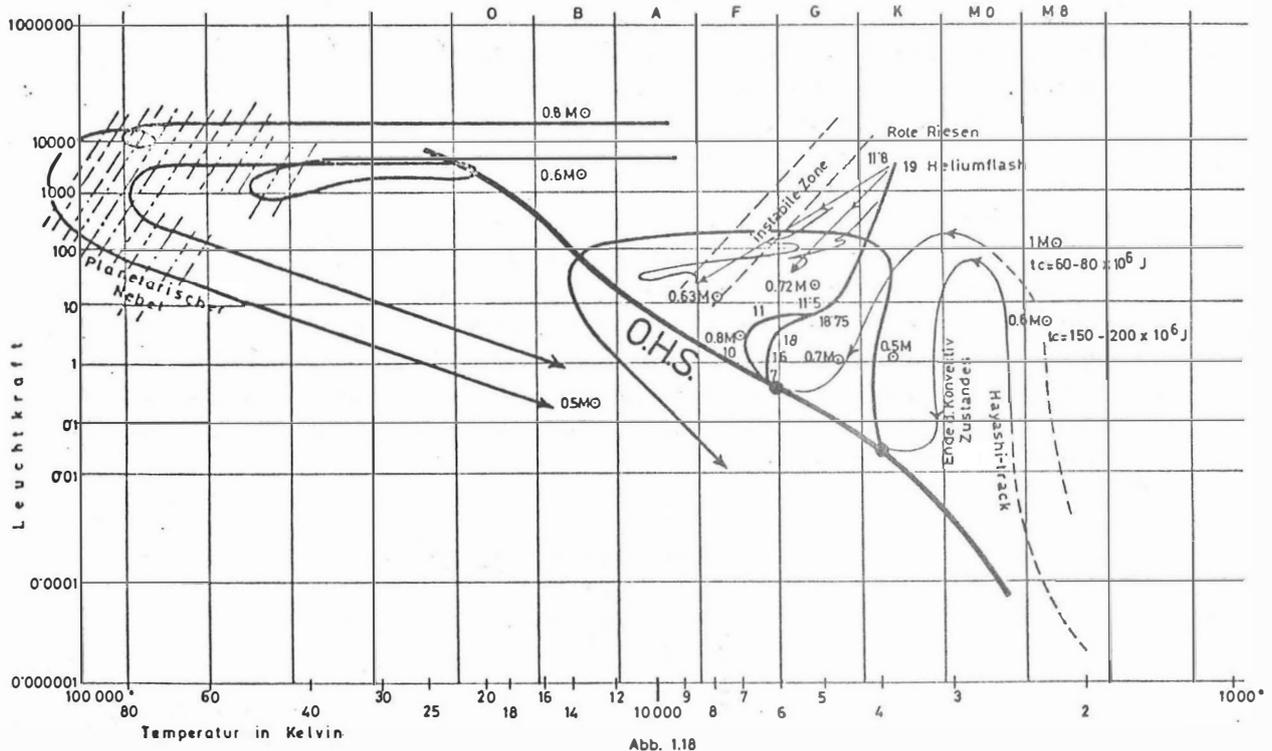
Das Hauptproblem mit dem Planetarischen Nebel liegt in dem Umstand, daß noch keine Explosion, die einen derartigen Nebel hervorbringt, beobachtet werden konnte, wiewohl es außer Zweifel liegt, daß die Gashülle expandiert, der jeweilige produzierende Stern im Zentrum dieser kosmischen Erscheinung liegt. Es ist zu vermuten, daß die Größe einer Novaexplosion mit der Häufigkeit dieses Geschehnisses korreliert ist. Dagegen jedoch spricht der Umstand, daß planetarische Nebel nicht immer als Doppelsterne erkannt werden können. Je größer die Explosion, desto seltener passiert sie. Nun enthält die abgestoßene Hülle, welche den planetarischen Nebel bildet, weit mehr Materie als bei einem gewöhnlichen Nova-Ausbruch emittiert wird, ergodessen kommen die Explosionen äußerst selten vor und sind von besonderer Mächtigkeit.

Die Sterne mit $1,5 M_{\odot}$ und kleiner erreichen nun nach diesem Ausbruch das Stadium der WEISSEN ZWERGE. Ihre Temperatur liegt zwischen 4 000 und 40 000 K. Sie sind sehr klein (etwa wie die Erde), ihre Dichte ist etwa die 10^6 fache von Wasser. Sie werden auch Elektronensterne genannt. Ihre Materie ist total degeneriert und stellt dadurch einen so guten Wärmeleiter dar, daß dadurch die Isothermie des Kerns gewahrt wird. Nur eine dünne Oberflächenschicht verhält sich wie normales Gas. Der Stern hat eine Einheitstemperatur. Einige WEISSE ZWERGE sind Komponenten von Doppelsternen. Der ungefähre Wert ihrer Masse liegt bei $0,5 M_{\odot}$. Der WEISSE ZWERG wird kühler und dunkler und verliert nur langsam thermische Energie, da die dünne Gasschicht als Isolator wirkt.

¹⁾ Der Doppelstern bzw. Novae-Mechanismus funktioniert nicht nur bei nahen Komponenten, auch ferne Doppelsterne leisten beim Novamechanismus das gleiche.

Die Chandrasekhargrenze sagt uns, daß kein WEISSER ZWERG mehr als $1,5 M_{\odot}$ besitzt. Das Ende ist ein völlig ausgekühlter SCHWARZER ZWERG mit einer Temperatur von nahezu absolut Null.

Die folgende Abbildung 1.18 zeigt den Weg von Sternen mit verschieden großer Masse im HR-Diagramm.



Erläuterung: Von rechts beginnend, ist zuerst für 2 Modellsterne von $0,6 M_{\odot}$ und $1 M_{\odot}$ die Protosternperiode dargestellt. Für den $0,6 M_{\odot}$ -Stern ist der HAYASHI-TRACK (Protosternphase) eindrucksvoll ersichtlich.¹⁾

Im Anschluß daran, nach links, ist für 2 Modellsterne von $0,7 M_{\odot}$ und $0,8 M_{\odot}$ der Abschnitt vom Verlassen der Hauptsequenz bis zum Heliumblitz dargestellt. Man beachte, der $0,8 M_{\odot}$ -Stern benötigt bis zum Umkehrpunkt, das ist der Zeitpunkt, wo auch in der Kugelschale Kernreaktionen beginnen, 10×10^9 Jahre, (Die Zahlen entlang dieses Wegabschnittes bedeuten Alter der Sterne in Einheiten von 10^9 Jahren) der $0,7 M_{\odot}$ -Stern hingegen benötigt 16×10^9 Jahre, bis zum Heliumflash weitere 3 Milliarden Jahre (16 - 19), der $0,8 M_{\odot}$ -Stern hingegen nur 1,8 Milliarden Jahre (10 - 11,8).

Nach dem Heliumflash, (für einen $0,8 M_{\odot}$ -Stern nach 11,8 Milliarden Jahren, für einen $0,7 M_{\odot}$ -Stern nach 19 Milliarden Jahren), siedeln sich erster ($0,63 M_{\odot}$... 10% Masseverlust) und zweiter ($0,72 M_{\odot}$... ebenfalls 10% Masseverlust) in der instabilen Zone oder deren Nähe an. Hier endet meist eine detaillierte Modellrechnung. Der Stern erreicht ein Stadium hoher Instabilität. Da die beiden Kernverschmelzungszonen zeitweise gegeneinander schwingen, wird ständig Materie abgestoßen, wir kommen in das Stadium der Planetarischen Nebel, in der Abb. links oben. Ihre Leuchtkraft ist 10 000 mal heller als die der Sonne. Schließlich ist noch der Weg eines $0,5 M_{\odot}$ -Sternes dargestellt (siehe auch Abb. 1.16).

1) Unter HAYASHI-Track versteht man jenen Zeitraum in der Sternevolution, wo eine signifikante Entkopplung von den Anfangsbedingungen stattfindet. Dieses Ereignis wird durch die Opazität (optisch dick werden) der Sternmaterie eingeleitet. HAYASHI hat gezeigt, daß durch den konvektiven Energietransport in diesem Stadium sich der Stern im HR-D nach unten bewegt.

OHS-STERNE - WEITERENTWICKLUNG UND ENDE:

Wir sahen, daß das SCHOENBERG-CHANDRASEKHAR-Kriterium (Kapitel 1.1.6) die Obergrenze für die Masse der Heliumkerne bedeutet, soll der Stern nach Verlassen der HS stabil bleiben.

Vorerst bewirkt das Wasserstoffbrennen in der Hülle rund um den Kern keine heftigen Reaktionen. Je mehr Helium jedoch dem Kern von der Hülle zugeführt wird, umso rascher wird das SCHOENBERG-CHANDRASEKHAR-Kriterium erreicht und nun kontrahiert der Kern rasch und der Stern bewegt sich im HR-Diagramm relativ schnell nach rechts, ähnlich wie die UHSS.

Der bedeutende Unterschied liegt jedoch in den sehr verschiedenen Kernstrukturen! Der OHS-Stern startet mit einer höheren Zentraltemperatur und geringeren Kerndichte. Daher beginnt das Heliumbrennen bevor das Kernmaterial degeneriert. Die Folge ist nur geringe Leuchtkraftänderung und dementsprechend geringe Bewegung im HR-Diagramm, die jedoch auch in die ROTE-RIESEN-Region führt; dennoch ist ein Unterschied zwischen massereicheren und masseärmeren Sternen der Oberen Hauptsequenz, wenn sie den Helium-Brennpunkt erreichen. Ein $15 M_{\odot}$ -Stern z.B. wandert sofort in den Überriesen-Ast.

Ein sehr wichtiger Umstand sei noch hervorgehoben:

Heliumbrennen in nichtdegeneriertem Material bringt keine Instabilitätsprobleme, jedoch interne Strukturänderungen, geht langsam vor sich und Sternmodelle können wesentlich leichter berechnet werden für die OHS-Sterne!

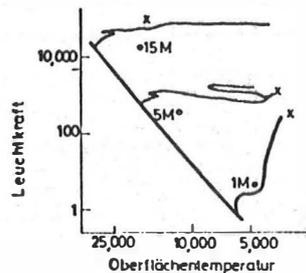


Abb. 1.19

Die Entwicklungslinien von Oberen Hauptsequenz-Sternen nach Verlassen der Hauptsequenz (x deutet den Beginn der Heliumverbrennung an.)

Die oberste Stufe in der Sternevolution soll die folgende Abbildung darstellen: ob ein massereicher Stern tatsächlich diese Stufe jemals erreicht, ist durch Beobachtungen bislang nicht nachzuweisen.

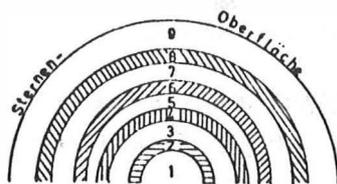


Abb. 1.20

Die mögliche Struktur eines hochentwickelten Sterns. 1. Eisenkern 2. Schicht aus Silizium 3. Schicht aus Magnesium u. Silizium 4. Schicht aus Magnesium, Silizium u. Schwefel 5. Schicht aus Sauerstoff u. Magnesium 6. Schicht aus Sauerstoff, Neon u. Magnesium 7. Schicht aus Kohlenstoff u. Sauerstoff 8. Schicht aus Helium 9. Schicht aus Wasserstoff (Diese Elemente überwiegen in der betr. Schicht) Zwischen jeder Schicht ist eine entsprechende Verschmelzungszone, z. B. zwischen 8 u. 9 ist die Verschmelzung von Wasserstoff zu Helium.

Sterne, die dieses Stadium erreichen, müssen auf der OHS liegen und zwar am oberen Ende, wenn die geschätzten Masseverluste richtig sind. Z. B. verliert ein $3,5 M_{\odot}$ -Stern möglicherweise $2 M_{\odot}$ während der letzten Lebensabschnitte. Ein Stern mit weniger als $5 M_{\odot}$ kann einen degenerierten Kohlenstoff-Kern entwickeln, ein Stern mit $10 M_{\odot}$ hingegen wird wahrscheinlich das Kohlenstoff- und Sauerstoffbrennen starten können, bevor der Kern degeneriert. Bei welcher Masse zwischen $5 M_{\odot}$ und $10 M_{\odot}$ jedoch dieser Evolutionswechsel eintritt, bleibt derzeit noch unbekannt. Der Effekt der Neutrinoemission ist beträchtlich: z. B. würden Neutrinos keine Energie abführen, so würde die Kohlenstoffbrennphase eines typischen OHS-Sterns 100fach verlängert werden. Solange die Materie nicht degeneriert, bleibt die Entwicklungsrichtung unverändert, daher sind Voraussagen nur für ausreichend massive Sterne sicher.

In den massereichsten Sternen beginnen bei Temperaturen von 10^9 K und mehr die Neutrinos einen Großteil der Energie abzuführen. Der Kern kontrahiert daher rascher, um den Energieverlust auszugleichen. Der Strukturwechsel tritt nun innerhalb weniger Jahre (!) ein und die Zentraltemperatur wächst auf einige 10^9 K an. Unter diesen Umständen könnte sogar der Zusammenbruch des Eisenkernes erfolgen und dies hätte ernste Folgen: wir verfolgten die letzten Stadien der Kernverschmelzung wobei *l a n g s a m*, vom Heliumkern beginnend, nach und nach Eisen aufgebaut wurde, der umgekehrte Vorgang erfolgt plötzlich! Das bedeutet, daß Energie, die in Jahrmillionen produziert wurde, nunmehr plötzlich zurückgefordert wird: Der Stern hat nur eine Möglichkeit dieser "Forderung" zu begegnen, nämlich seine Fähigkeit zu kontrahieren und seine Gravitationsenergie in thermische Energie zu verwandeln und dies in kürzester Zeitspanne. Dieser Prozeß ist ein plötzlicher Kollaps. Das Ergebnis ist vergleichbar mit einer ungeheuren "Kernexplosion", wobei die gesamte Sternmasse in den Raum geschleudert wird. Dieses Resultat ergibt die Modellrechnung.

1.1.7. SUPERNOVAE, NEUTRONENSTERNE,
SCHWARZE LÖCHER (SL), RÖNTGENSTERNE, DOPPELSTERNE

SUPERNOVAE:

Die Amerikaner COLGATE und WHITE haben 1966 einen Kollaps, der zur Supernova führt, durchgerechnet.

Wie bei früher besprochenen Entwicklungsphasen kontrahiert auch hier vor allem der Kern. Durch einen starken Sog entsteht am äußeren Kernrand eine nach innen laufende Stoßwelle. Die Gravitationsenergie, die frei wird, heizt den Stern auf etwa 10^{11} K auf. Eine Serie von Kernreaktionen ist die Folge, große Mengen Neutrinos entweichen vorerst in den Weltraum, bald erreicht jedoch die Hülle eine Dichte von 10^8 g/cm^3 (10^8 mal so dicht wie Wasser). Die freien Weglängen der Neutrinos schrumpfen auf einige 100 m, wodurch auch die äußere Hülle auf einige 10^9 K aufgeheizt wird. Dadurch setzen explosive Kernreaktionen von Kohlenstoff und Silizium ein, wodurch schwere Elemente gebildet werden, mit einer Verteilung, wie sie in der galaktischen Scheibe vorkommen. Die starke Kernerhitzung erzeugt eine zweite, nach außen laufende Stoßwelle. Diese bläst nun einen großen Teil der äußeren Schichten weg, wobei die obersten Teilchen auf relativistische Geschwindigkeit beschleunigt werden und dadurch einen wesentlichen Beitrag zur kosmischen Ultrastrahlung liefern.

Von einem $2 M_{\odot}$ -Stern bleibt weniger als $1 M_{\odot}$ übrig. Dadurch kann sich leicht ein Neutronenstern (s. folgender Abschnitt) bilden. Ähnliches passiert auch mit $10 M_{\odot}$ -Sternen, es bleibt immer genug Masse für einen Neutronenstern übrig.

Der Vorgang dauert nur 0,1 sec! In diesem Moment werden Energien von 10^{45} bis 10^{46} Joule frei und zwar etwa zu gleichen Teilen in Form von NEUTRINOSTRAHLUNG, THERMISCHER und KINETISCHER ENERGIE der weggeblasenen Gashülle und zu 20% in Form von KOSMISCHER ULTRA STRAHLUNG. Die Gashülle des sich bildenden Neutronensterns leuchtet durch diesen gigantischen Energieausbruch hell auf, die SUPERNOVA wird sichtbar als Stern, so hell wie 10^9 Sonnen. Bei Beobachtungen von Supernovae, vor allem auch außerhalb galaktischer (in unserer Galaxie sind sie nur alle 30 bis 500 Jahre zu erwarten), hat man 2 Typen unterschieden:

Typ I: (korreliert mit Sternen der alten Population II) erreicht eine absolute Helligkeit von -16^m , nach 20 - 30 Tagen ist diese um 2 bis 3 Magnitude abgesunken, verlöscht dann mit einer Halbwertszeit von rund 60 Tagen.

Masse des Ausgangssterne knapp unter $2 M_{\odot}$
Max. Leuchtkraft 10^{36} Watt
abgestoßene Masse bis max. $1 M_{\odot}$

Typ II: (korreliert mit Sternen der jungen Population I)

absolute Helligkeit bis -14^m
Masse des Ausgangssterne über $2 M_{\odot}$ bis zu den größten Sternen im Kosmos, etwa $60 M_{\odot}$
Max. Leuchtkraft 10^{35} Watt
abgestoßene Masse bis max. $10 M_{\odot}$

Die Überreste emittieren optische Strahlung, die bis zur Unsichtbarkeit abklingt, emittieren aber weiters sehr lange Zeit starke Radiostrahlung [6].

Folgende derartige Radioquellen wurden entdeckt:

Die stärkste ist CASSIOPEIA A, Typ II, Expansionsgeschwindigkeit 5 000 km/sec, Distanz 10 000 L.J., Alter 300 Jahre, Durchmesser 15 L.J., weiters der

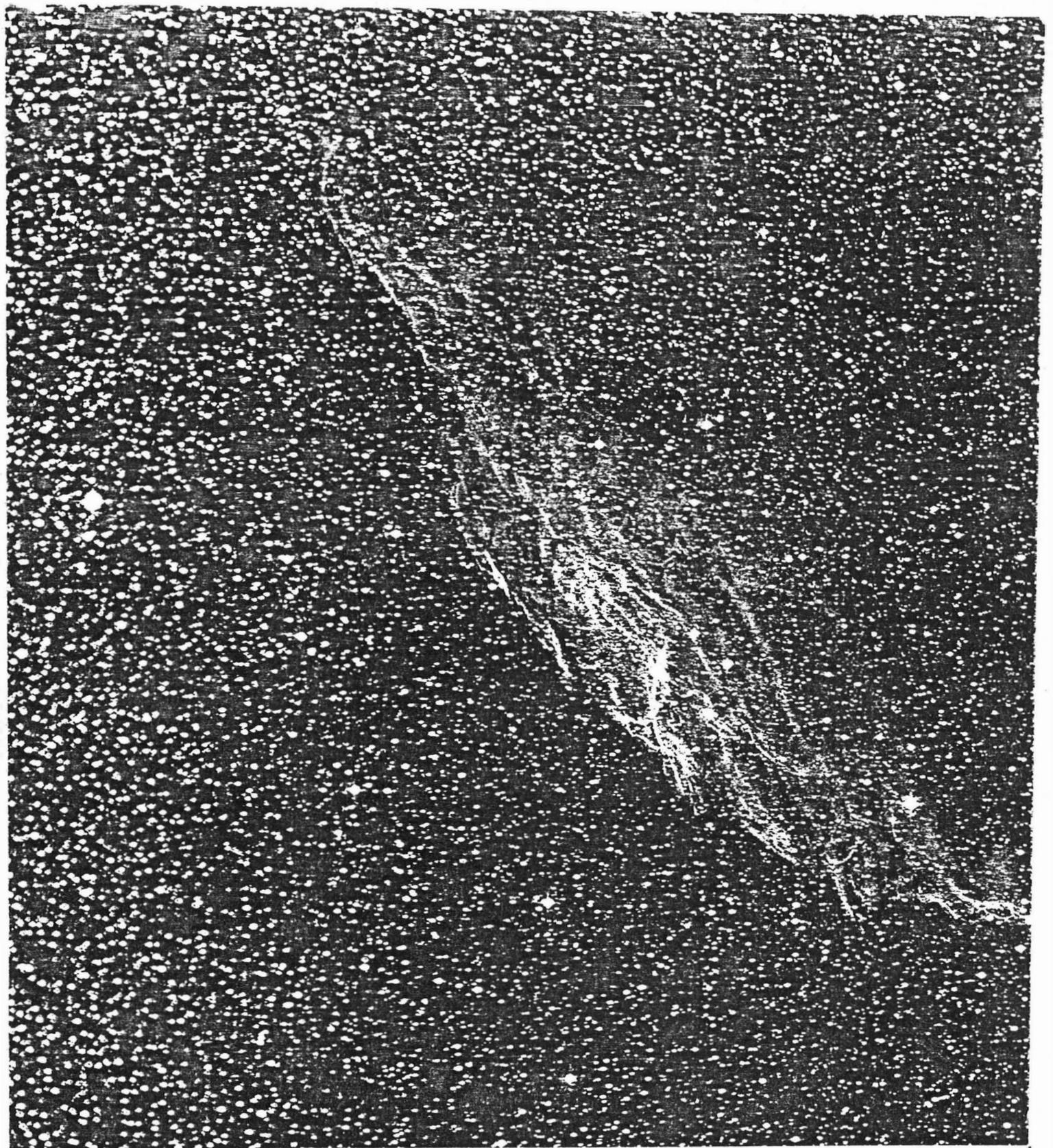
KREBSNEBEL, Typ II, Distanz 6 500 L.J., Alter 900 Jahre, Durchmesser 10 L.J.

Weiters wurden noch schwächere, wie etwa TYCHO's und KEPLER's Supernova, CYGNUS BOGEN- (50 000 Jahre alt) und VELA X- (10 000 Jahre alt) -Supernovae untersucht.

1958 entdeckte man außer der Radiostrahlung auch noch die Röntgenstrahlung, welche von Supernovae emittiert werden. Sowohl die Radiostrahlung als auch die Röntgenstrahlung nach Supernovae-Explosionen sind, nach J.S. SHKLOVSKY [16], Synchrotronstrahlungen wobei die Elektronen, die ausgeschleudert wurden, Energien von 10^{13} bis 10^{14} eV besitzen. Derart energiereiche Elektronen haben jedoch nur eine Lebensdauer von einigen Monaten, da aber z.B. der Krebsnebel insgesamt Energie von 2 bis 4×10^{31} Joule abstrahlt, lag der Schluß nahe, daß im Krebsnebel immer noch Energie produziert werden muß. Wie, blieb ein Geheimnis, bis zur Entdeckung der Pulsare. Abschließend sei noch die Weiterentwicklung einer Supernova geschildert und neueste Hypothesen über die Röntgenstrahlung erwähnt [6] :

- 1.) 10 Jahre nach der Explosion: Die Schockwelle dehnt sich mit 15 000 km/sec im Interstellarraum aus, die Materiemenge, die sie vor sich hertreibt, ist unvergleichlich gering, verglichen mit der ausgeschleuderten Materiemenge, dennoch wird die Expansionsgeschwindigkeit geringer.
- 2.) Nach etwa 100 Jahren ist die durch die Expansionswelle aufgesammelte Materiemasse etwa gleich der ursprünglich ausgeschleuderten Menge. Die Expansion wird sehr stark gebremst (8 000 km/sec), das ausgeschleuderte Material hinter der Schockwelle rast in die dichtere Hülle der Schockwelle von hinten, wird ebenfalls rasch gebremst, erhitzt dadurch das Gas vor sich und bildet eine 2. Schockwellenfront, hinter der dichten Hülle. Relativ zur 1. Wellenfront bewegt sich die 2. Front nach innen. Hier tritt Instabilität auf, die dichtere Hülle zerbricht in Filamente, welche beobachtbar sind, sowohl im optischen als auch im Radiobereich. In diesem Punkt tritt möglicherweise eine neue Erkenntnis über die Röntgenstrahlung auf den Plan. Die Zusammenhänge - Radiostrahlung und Röntgenstrahlung - bedürfen noch weiterer Klärung durch genauere Röntgenteleskope, aber es ist gegenwärtig angeblich schon evident, daß die Röntgenstrahlung durch schockwellenerhitztes Gas und nicht durch Synchrotronstrahlung entsteht [6].
- 3.) Mit dem Fortschreiten der Expansion ist das aufgesammelte Interstellarmaterial weit massereicher als das ursprünglich in der Explosion ausgeschleuderte. Zu diesem Zeitpunkt ist die Materie hinter der ersten Schockwelle auf 10×10^6 K abgekühlt. Bei dieser Temperatur besteht nur geringer Zweifel gegen die Röntgenemission durch das heiße Gas.
- 4.) Einige zehntausende Jahre später hat die expandierende Hülle den größten Teil der Energie verloren, die Geschwindigkeit der Teilchen hat sich auf 500 km/sec reduziert, die Temperatur ist unter 5×10^6 K gesunken und es wird nur noch weiche Röntgenstrahlung emittiert. Die äußere Hülle hat sich völlig in Filamente aufgelöst (TAFEL 5).

Die wenigen Jahre, in welchen die Röntgenstrahlung von Supernovaresten beobachtet wurde, genügten, um unser Verständnis für diese Objekte gründlich zu erneuern: Die Röntgenstrahlen-Darstellungen weisen sehr intensiv darauf hin, daß die Elektronen innerhalb der Supernovawolke, weit vom Pulsar entfernt, beschleunigt werden. Darüber hinaus scheinen junge Supernovaresten große Mengen heißen Gases zu enthalten, welche Röntgenstrahlung produzieren, was der alten Ansicht widerspricht, daß die Röntgenstrahlung nur durch einen Synchrotronprozeß entstehen könnte. Die weitere Erforschung dieser jungen Objekte soll klarstellen, inwieweit ein interaktiver Prozeß zwischen ursprünglich ausgeworfenem Material der Supernova und dem umgebenden interstellaren Gas besteht.



TAFEL 5: Der Nebelschleier im Cygnus ist der Rest der äusseren Schichten eines früheren instabilen Sternes. Die Eruption (Zerfall) hat vor etwa 50 000 Jahren stattgefunden. Die Reste des Sternes bilden eine Gaskugel von $ca\ 500 \times 10^{12}\ km = 16.21\ pc = 52.8\ LJ$

NEUTRONENSTERNE - PULSARE

Wir wissen heute mit Sicherheit, daß die Neutronensterne Reste von Supernovae sind. Das heißt jedoch nicht, daß jede Supernova als Rest einen Neutronenstern zurückläßt. Wenn die Masse des explodierten Sterns groß genug war (viel größer als $3 M_{\odot}$), ist auch die Bildung eines SCHWARZEN LOCHES möglich. Wir haben bereits in vorhergehenden Abschnitten gesehen, daß bei Sternen mit geringerer Masse das Endstadium ein Weißer Zwerg sein kann, wobei jedoch der Kollaps in einem Novaausbruch oder einem Planetarischen Nebel-Ausbruch endet. Wir kommen am Ende dieses Abschnittes noch auf die Massengrenzwerte zu sprechen.

Der erste Pulsar CP 1919¹⁾ wurde 1967 von der Astronomiestudentin S.J. BELL entdeckt, ohne daß man wußte, wie die Pulse mit extrem konstanter Frequenz entstehen. Die Periode ließ sich auf 9 Dezimalen genau angeben. Eine Normaluhr mit dieser Exaktheit würde in 3 Jahren um 1 Sekunde falsch gehen. Die Frequenz der meisten Pulsare liegt bei 1 sec, die Pulse dauern etwa 10 msec und variieren in der Struktur beträchtlich, wie die abgebildeten Beispiele zeigen.

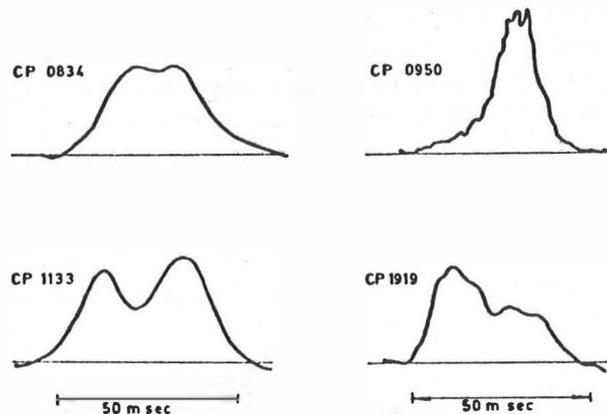


Abb. 1.21

Die mittleren Intensitätsprofile einiger Pulsar-Pulse.

Lange Zeit existierten im wesentlichen 2 Theorien über den Mechanismus der Pulsemission. Erst 1968 konnte anlässlich der Entdeckung des CRAB-PULSARS NP 0532 durch STAELIN und REIFENSTEIN mit dem Radioteleskop in ARECIBO Klarheit geschaffen werden (s. Abb. 1.33). Die Pulse von NP 0532 folgten in einem zeitlichen Abstand von 0,03309 sec, d.h., dieser Pulsar rotiert 30 mal je Sekunde um seine Achse (Abb. 1.33), viel rascher als alle bisher bekannten Neutronensterne. Dieser Pulsar war auch 1969 Anlaß zu einer neuen Pulsartheorie von GUNN und OSTRIKER [17], deren wesentliche Aussagen wie folgt lauten: Sie beobachteten eine Periodenverlängerung von 36 ns je Tag, d.h., die Rotationsgeschwindigkeit nimmt ab. Als meßbare Daten stehen uns im wesentlichen die Periode P und die Verlangsamung \dot{P} zur Verfügung. Der Quotient

$$\tau = \frac{P}{\dot{P}}$$

ist eine charakteristische Zeit für jeden Pulsar. Für NP 0532 ergibt sich ein $\tau = 7,9 \times 10^{10}$ sec oder 2 505 Jahre. Die Theorie von GUNN und OSTRIKER (siehe math. Anhang) besagt weiters, daß das Alter des Pulsars $\tau/2$ sein muß. Für NP 0532 ergäbe sich demnach ein solches von rund 1 250 Jahren gegenüber tatsächlich (aus der Beobachtung) von 916 Jahren (bezogen auf das Jahr 1970 n.Ch.). Die Differenz Soll - Ist von rund 25% rührt lt. GUNN und OSTRIKER davon her, daß in der ersten Zeit nach der Supernova-

¹⁾ Stern mit einer Dichte von 10^{12} bis 10^{15} g/cm^3 der rasch rotiert und dabei Radiowellen und auch harte Röntgenstrahlung emittiert (s. Abb. 1.33).

explosion ein großer Teil der Rotationsenergie in Form von Gravitationswellen abgestrahlt wurde. Diese entstehen bekanntlich dann, wenn eine große Masse um eine Achse rotiert, zu der sie nicht rotationssymmetrisch ist. (Etwa ein rotierender Stab - dieses Beispiel paßt auch sehr gut für die erzeugten Pulse, wie wir noch sehen werden).

Das Magnetfeld des Neutronensterns geht aus dem ursprünglichen Magnetfeld des Sterns, der zur Supernova wurde, hervor. Komprimiert man das Oberflächenfeld von rund 100 Gauß eines HS-Sterns im Verhältnis der RADIUSQUADRATE, HS-Stern zu Pulsar, also $(10^6)^2 : 10^2$, so erhält man 10^{12} Gauß, nämlich

$$\frac{(10^6)^2}{10^2} \times 100 \text{ Gauß}$$

Um die Pulse erläutern zu können, muß der Dipol-Strahlungsmechanismus erklärt werden:

Ein rotierender magnetischer Dipol erzeugt zunächst ein elektromagnetisches Feld mit einer Schwingung pro Rotation, beim NP 0532 also eine Frequenz von 30 Hz.

In der Tat beobachten wir hochfrequente Radiopulse, optische - und Röntgenpulse und außerdem ein kontinuierliches Synchrotronpektrum. Es muß demnach die niederfrequente elektromagnetische Energie zunächst in Teilchenenergie und weiters diese wieder in hochfrequente elektromagnetische Energie umgewandelt werden. GUNN und OSTRICKER haben gezeigt, daß solche Prozesse tatsächlich in der Umgebung eines magnetischen Neutronensterns ablaufen können. Der Neutronenstern gibt laufend Masse ab und zwar so, daß an der Oberfläche sich ein Teilchenstrom parallel zu den Magnetfeldlinien radial nach außen bewegt. Durch die hohe Rotationsgeschwindigkeit des Pulsars findet der entscheidende Beschleunigungsprozeß in jener Entfernung statt, wo die Umfangsgeschwindigkeit nahezu Lichtgeschwindigkeit erreicht. Dieser kritische Abstand R_c ist

$$R_c = \frac{P \cdot c}{2\pi}$$

bei NP 0532 ca 1 500 km. Dort erzeugen die bewegten Magnetfelder von immer noch 10^6 Gauß starke elektrische Felder (Dipolstrahlungsmechanismus). In den elektrischen Feldern können die mitgeführten Teilchen fast bis zur Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden. In etwa 10×10^6 km Entfernung ist die elektromagnetische Energie aufgebraucht, die Teilchen haben eine Energie von max. 5×10^{13} eV. Der größte Teil dieser Energie steckt in den Protonen, die im Teilchenstrom enthalten sind. Nur 10% wurde auf die Elektronen übertragen, woraus sich der Unterschied von rund einer Zehnerpotenz zwischen dem Verlust an Rotationsenergie und der Leuchtkraft des Krebs-Nebels erklärt. Um die Röntgenquelle zu erklären, muß ein Masseverlust von 20 000 kg/sec resultieren. Die gepulste Strahlungskomponente rührt von Teilchen her, die mit hoher Geschwindigkeit von der Sternoberfläche zur Beschleunigungszone aufsteigen und dabei tangential zu den Feldlinien, denen sie folgen, Synchrotronstrahlung aussenden.

Am intensivsten ist die Strahlung am Mantel eines Kegels mit einem Öffnungswinkel von $2\delta = 5^\circ$, dessen Spitze in einem der Magnetpole liegt (s. Abb. 1.33).

Die Beobachtungen des Krebs-Nebels liefern uns sowohl den Verlauf des kontinuierlichen Spektrums des Nebels selbst als auch des gepulsten Spektrums von NP 0532. In neuerer Zeit wurden auch weitere Pulsare entdeckt und untersucht, dabei konnte man bei PSR 0833-45 feststellen, daß innerhalb kurzer Zeit, etwa einer Woche, die Pulsfrequenz sich änderte. Man führte das auf sogenannte "Sternbeben" zurück, dabei ändert sich der Sternradius. Diese Änderungen liegen im Zentimeter-Bereich (!)

Einige Daten von NP 0532 seien noch angeführt:

$$P = \frac{1}{\text{Hz}} \quad 0,03309 \text{ sec/je Umdrehung}$$
$$\dot{P} \text{ (dimensionales)} 4,2 \times 10^{-13} \text{ s/s, d.i. 36 ns/Tag}$$

Radiostrahlung	2×10^{23} Watt
Distanz	2 200 pc (= 7 170 L.J.)
Magnetfeld	$2,6 \times 10^{12}$ Gauß (= 2 600 Milliarden Gauß, zum Vergleich, Erde = 0,5 Gauß)
$\tau/2$ (Alter)	1 250 Jahre

Die Entstehung solch kosmischer überdichteter Objekte wurde in den bisherigen Kapiteln des öfteren erwähnt. Zusammenfassend kann man folgende Generalregel anführen: Wir haben immer wieder von Stern- oder Materiekollapsen gesprochen. Bei diesen Kollapsen wird fast schlagartig ungeheure Energie - genauer Gravitationsenergie - frei, nämlich genau die Gravitationsenergie, die gegen das Schwerfeld des Sterns aufzuwenden wäre, um die Materie in jene Regionen zu heben, die sie vor dem Zusammenfall des Sterns besetzt hatte [10].

Wir wissen vorerst nicht gesichert wie die Vorgänge im Detail ablaufen, wie etwa Pulsare als Folge von Supernovae entstehen. Gewisse Ansätze zur Erklärung bestehen und sind schon etwa 30 Jahre lang bekannt und resultieren aus Überlegungen bezüglich des Verhaltens von Elementarteilchen und Atomkernen unter Bedingungen wie sie in Sternzentren vorherrschen.

Für den Astrophysiker stellt sich die Frage, ob es für einen kollabierenden Stern eine Möglichkeit gibt, wieder ein stabiles Stadium zu erreichen. Die Antwort kann uns die Theorie vom "Verhalten überdichteter (entarteter) Materie" geben. Hier gelten nicht mehr die Gesetze der klassischen Physik, vielmehr spielen quantenmechanische und relativistische Effekte, die jedoch noch berechenbar sind, eine wesentliche Rolle. Die Ergebnisse kurz gefaßt sind:

- 1.) Für einen Stern mit $1 M_{\odot}$ ist wieder ein Gleichgewichtszustand (Gravitation = innerer Druck) möglich, wenn der Durchmesser auf 15 000 km (d.i. 1% des derzeitigen Durchmessers) schrumpft. Die Dichte ρ im Zentrum ist dann 1 000 Tonnen/cm³ oder $\rho = 10^9$ g/cm³, die mittlere Dichte etwa 2×10^6 g/cm³.
Derartige Sterne existieren und wir kennen sie als WEISSE ZWERGE. Die kritische Massengrenze ist $1,5 M_{\odot}$, d.h., kein Weißer Zwerg kann mehr als $1,5 M_{\odot}$ besitzen.
- 2.) Objekte mit größerer als $1,5$ Sonnenmasse unterliegen weiteren Kontraktionen. Diese Kontraktionen nehmen solche Ausmaße an, daß sogar die Elementarbausteine umgewandelt werden: die freien Elektronen werden in die Protonen der Atomkerne hineingedrückt und vereinigen sich zu Neutronen, das entsprechende freie Neutronengas wird dann fast so dicht wie die Atomkerne. Dieses Neutronengas folgt eigenen Gesetzen und daraus resultieren für den Stern neue Möglichkeiten wieder zu einem stabilen Gleichgewichtszustand zu kommen, wobei wieder eine kritische Grenzmasse beachtet werden muß. Dieser Wert ist leider noch etwas unsicher, da die Physik dieser Materiezustände noch nicht genug entwickelt ist. Man nimmt etwa $3 M_{\odot}$ als Grenzmasse an, d.h., darunter sind stabile Neutronensterne möglich. Ihre Dichte ρ liegt bei 10^{12} bis 10^{15} g/cm³, der Durchmesser eines Sterns mit $1 M_{\odot}$ läge bei 10 km.¹⁾ Diese Verhältnisse finden wir eben bei Pulsaren. Warum Supernova so selten sind, läßt sich aus den Massezahlen leicht herleiten. Ihre Häufigkeit entspricht gerade der Anzahl von Sternen mit 5 bis $10 M_{\odot}$, die sich im entsprechenden Evolutionsstadium befinden.
- 3.) Nach dem heutigen Wissensstand gibt es für massereiche Sterne, die im Kollaps nicht soviel Materie verlieren, daß die kritische Grenze von $3 M_{\odot}$ unterschritten wird, keine Chance, einen stabilen Zustand zu erreichen. Sie enden unweigerlich in einem sogenannten SCHWARZEN LOCH, auch SCHWARZSCHILD-SINGULARITÄT (wenn sie nicht rotieren)

¹⁾ Man muß dies als theoretisches Rechenergebnis betrachten; es dient nur dem Vergleich, da ja Sterne mit $1 M_{\odot}$ keine Evolution zum Neutronenstern oder gar zum Schwarzen Loch erwarten lassen.

genannt. Die Dichte wird so groß, daß keinerlei Signal, auch keine elektromagnetische Welle, die Oberfläche verlassen kann, die Fluchtgeschwindigkeit übersteigt demnach 300 000 km/s (Vergleich Erde: 11 km/s). Für $1 M_{\odot}$ liegt dann der Radius bei 3 km (SCHWARZSCHILD-Radius). Da kein Signal das SL verlassen kann, sind diese Objekte nur mittelbar zu beobachten. Diese mittlere Beobachtbarkeit kann allerdings derzeit bereits durch quantentheoretische Aussagen relativiert werden.

SCHWARZE LÖCHER [7]

Beobachtungen im Bereich des sichtbaren Lichtes der Radiowellen und der Röntgenstrahlung zeigen an, daß das kosmische Objekt, CYGNUS X-1, wahrscheinlich ein SCHWARZES LOCH ist. Die Eigenschaften derartiger Objekte sind so grotesk, daß sich viele Astrophysiker auch heute noch weigern, derartige Objekte als Realität anzuerkennen. Erst kürzlich hat sich W. GREINER von der Universität Frankfurt (BRD) gegen die Existenz dieser Körper ausgesprochen. Wie ist nun der derzeitige Wissensstand die SL betreffend?

K.THORNE ist fast sicher, daß im Objekt CYGNUS X-1 ein Schwarzes Loch existiert und versucht dies auch wie folgt zu beweisen:

Wir haben im vorigen Abschnitt gesehen, daß oberhalb einer Grenzmasse, wir nennen $3 M_{\odot}$ an, die Gravitationskräfte am Ende der Sternevolution (etwa nach einem Supernova-Ausbruch) so stark sind, daß ein stabiler Zustand nicht mehr möglich ist, der Stern wird zum Schwarzen Loch. Die Größe der Masse ist bei CYGNUS X-1 wesentlich in der Argumentation für die Existenz eines SL. Nun ist die Massenangabe aber sehr schwer, da man, wie bereits erwähnt, über Materialeigenschaften oberhalb von Atomkerndichten ($2 \times 10^{14} \text{g/cm}^3$) noch nicht genug weiß. Dennoch kennen wir eine obere Grenze der kritischen Masse von $3 M_{\odot}$, die R. RUFFINI von der Princeton University berechnet hat.

Betrachten wir nun ein SL vom physikalischen und mathematischen Standpunkt: Die Materie, die bei der Entstehung der SL kollabierte, ist einfach verschwunden, sie übt keinen Einfluß auf die Oberfläche oder den Außenraum aus. Es ist egal, wie die kollabierende Materie beschaffen war, Wasserstoff oder Uran, Materie oder Antimaterie. Alle Eigenschaften werden jetzt durch EINSTEIN's Gesetz vom leeren Raum bestimmt.

Drei Physiker, W. ISRAEL (Universität Alberta), B. CARTER und St. HAWKIN (Universität Cambridge), haben gezeigt, wie sich ein SL bilden könnte: Der Horizont wird vorerst heftigst vibrieren, jedoch innerhalb des Bruchteils einer Sekunde sich völlig beruhigen und eine glatte Oberfläche bilden. Rotation bewirkt Abflachung an den Polen. Die Masse und der Drehimpuls bestimmen Form und alle übrigen Eigenschaften des SL.

Der Rotationsparameter a ist gegeben durch

$$a = \frac{c \cdot J}{GM^2}$$

darin ist J der Drehimpuls, G die Gravitationskonstante und M die Masse des SL, c die Lichtgeschwindigkeit. a liegt zwischen 0 und 1. Für $a = 0$ ist das SL sphärisch und rotiert nicht. Für $a = 1$ rotiert es maximal rasch; in der Praxis wird aber ein solches auf $a = 0,998$ abgebremst, wegen der Reibung mit der Materie, die in das SL fällt und wegen der emittierten Strahlung, die von dieser Materie vor dem Einfall in das SL ausgesendet wird.

Die wichtigsten Eigenschaften eines SL sind:

- 1.) Wenn ein SL entsteht, bleiben nur 3 Eigenschaften der Materie erhalten. Es entsteht "ein Loch im Vakuum" vom Radius R_s , mit Masse M , Drehimpuls J und elektrischer Ladung Q . Diese Größen genügen der Ungleichung

$$\frac{c^2 J^2}{GM^2} + Q^2 < GM^2$$

Man unterscheidet 2 Arten von SL

- a) "Schwarzschild-SL": rotiert nicht und hat keine elektrische Ladung
- b) "Kerr-SL": siehe nächster Punkt 2.)

Das Gravitationsfeld gehorcht den Gesetzen von NEWTON und EINSTEIN, wenn der Abstand eines Objektes von der SL-Oberfläche größer ist als der Durchmesser des SL. (D.s. $3 R_S$ vom Mittelpunkt.)

- 2.) Ein rotierendes SL (auch Kerr-SL genannt) erzeugt einen Wirbel im leeren Raum, der es umgibt, dadurch wird alle Materie, die sich nähert, auf Bahnen gebracht, welche dem Wirbel eines Abflußtrichters ähneln. Der Rotationsparameter ist proportional der Stärke, mit der die Materie in Rotation versetzt wird. Interessant ist noch die von R. KERR untersuchte Struktur der SL mit Masse und Drehimpuls. Diese Objekte haben gleichsam zwei Grenzflächen. Innen befindet sich der rotierende EREIGNIS-HORIZONT; das ist jene Oberfläche, von der kein Signal mehr nach außen gelangen kann (Fluchtgeschwindigkeit also $\geq 300\ 000$ km/sec): Weiter außen jedoch ist der Raum der stationären Außenwelt, die sogenannte STATIONARITÄTSGRENZE. An dieser ist die Rotverschiebung für ein einfallendes Teilchen bereits unendlich. Das Raum-Zeit-gebiet zwischen Ereignishorizont und Stationaritätsgrenze heißt "ERGOSPHERE". Beim Schwarzschild-SL fallen beide Flächen zusammen (siehe Abb. 1.22).

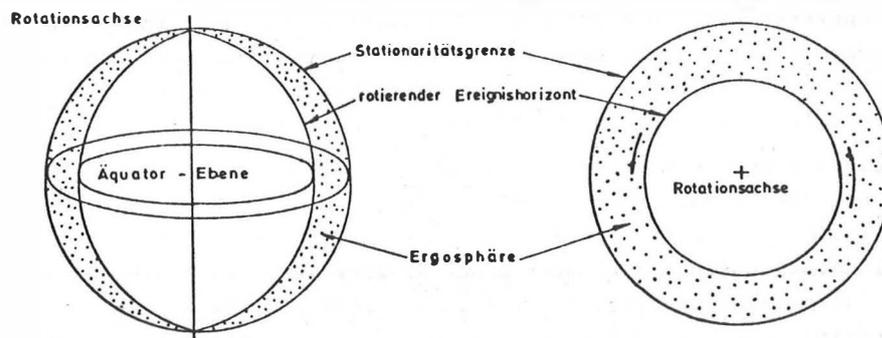


Abb. 1.22

Ereignishorizont und Stationaritätsgrenze sind bis auf die Pole überall getrennt.

- 3.) Ein SL bewirkt eine Raumkrümmung, entsprechend den Gesetzen der Relativitätstheorie.
- 4.) Ein SL hat einen eindeutig abgegrenzten Horizont, innerhalb dieses Ereignishorizonts existiert weder Materie noch Zeit.
- 5.) Der Umfang des Äquators eines SL beträgt:

$$U_{SL} = 19 \cdot \frac{M}{M_{\odot}} \text{ km} \quad \text{oder} \quad R_S = \frac{2 \cdot GM}{c^2} = 3 \frac{M}{M_{\odot}} \text{ km}$$

- 6.) Sobald sich ein Gegenstand innerhalb des R_S befindet, "fällt" er dauernd auf das Zentrum zu, da im SL kein stationärer Zustand herrschen kann. Innerhalb eines SL vertauschen nämlich Raum (Entfernung) und Zeit gewissermaßen ihre Rollen. Die Entfernung eines jeden Teilchens vom Zentrum muß stets und ständig abnehmen, ähnlich wie normalerweise die Zeit immer zunimmt oder anders ausgedrückt: der Raum stürzt unaufhörlich auf das Zentrum zu und zieht alles mit sich.

Typische SL sollten Massen zwischen $3 M_{\odot}$ und $50 M_{\odot}$ und daher Umfänge zwischen 57 km ($r = 9$ km) bis 950 km ($r = 151$ km) haben. (Die Radien sind nicht relativistisch berechnet.) Für $1 M_{\odot}$ ¹⁾ resultierte z.B. ein Radius von 3 km. Diese Radien bezeichnet man als Schwarzschild-Radien.

¹⁾ siehe Fußnote von Seite 39

Bis 1960 galten SL als rein theoretische kosmische Fiktionen!

Bis 1963 wurden keinerlei Anstrengungen unternommen nach SL zu suchen, geschweige denn, Forschung in dieser Richtung zu treiben. In den sechziger Jahren trat jedoch eine entscheidende Wende ein, nicht zuletzt durch die Entdeckung: von aktiven, ja "explodierenden" Galaxien (AMBARZUMJAN [1]), von Radiogalaxien, von Quasaren, der kosmischen Hintergrundstrahlung durch den Urknall (Big Bang), von Röntgensternen mit außergewöhnlichen Rotationsgeschwindigkeiten und ebensolchen Energiestrahlungen. All das lehrte uns, daß wir unsere bisherigen Vorstellungen vom Kosmos und seinen Objekten gewaltig ändern und erweitern müssen.

1967 wurden die ersten Pulsare, wie wir hörten entdeckt, 1968 konnte nachgewiesen werden, daß es sich hier um Neutronen-Sterne handelt, daher war die Existenz von SL durchaus vorstellbar geworden. Da sie selbst nicht "sichtbar" sind, weil sie

keinerlei Strahlung elektromagnetischer oder anderer Wellen entweichen lassen, können sie nur indirekt beobachtbar sein!¹⁾ Diesen Gedanken griffen die russischen Astrophysiker Ya.B. ZEL'DOVICH und O.Kh. GUSEYNOV auf und suchten in Katalogen von spektroskopischen Doppelsternen nach Systemen, die aus einem SL und einem gewöhnlichen Stern bestehen könnten. Die unsichtbaren Begleiter mußten entsprechende Massen (viel größer als $3 M_{\odot}$) aufweisen, die wieder aus der Gravitationsrotverschiebung (Dopplereffekt), die auf den Primärstern wirkt, ableitbar sind. Die beiden Russen fanden schließlich 5 gute Kandidaten für ein derartiges System (heller Primärstern und SL), diese wurden durch 3 weitere Systeme vermehrt, die K.S. THORNE und V. TRIMBLE vom Californian Institute of Technology fanden.

Keines dieser 8 Systeme jedoch gestattete die eindeutige Feststellung eines SL. Schon 1964 wurde erkannt, daß ein SL gasförmige Materie vom Begleiter abziehen und sie vor dem Einsturz in das SL stark erhitzen müßte, wodurch die Gasmaterie Röntgenstrahlung aussenden könnte. Daher konzentrierte sich die Suche nach SL auch auf die Suche nach Röntgenstrahlern; dies war jedoch nicht von der Erdoberfläche aus zu bewerkstelligen, sondern man benötigte dazu Satelliten, da ja bekanntlich die Erdatmosphäre die Röntgenstrahlung absorbiert. Wir wollen im nächsten Kapitel die Doppelsystemen, die Röntgenstrahlen emittieren, genauer besprechen.

Wie konnte nun ein SL "sichtbar" gemacht werden? Wir betrachten die folgenden Abbildungen 1.23

¹⁾ Nach der Theorie von S.W. HAWKING strahlen SL doch im thermischen Bereich, wenn auch mit sehr geringen Äquivalenttemperaturen.

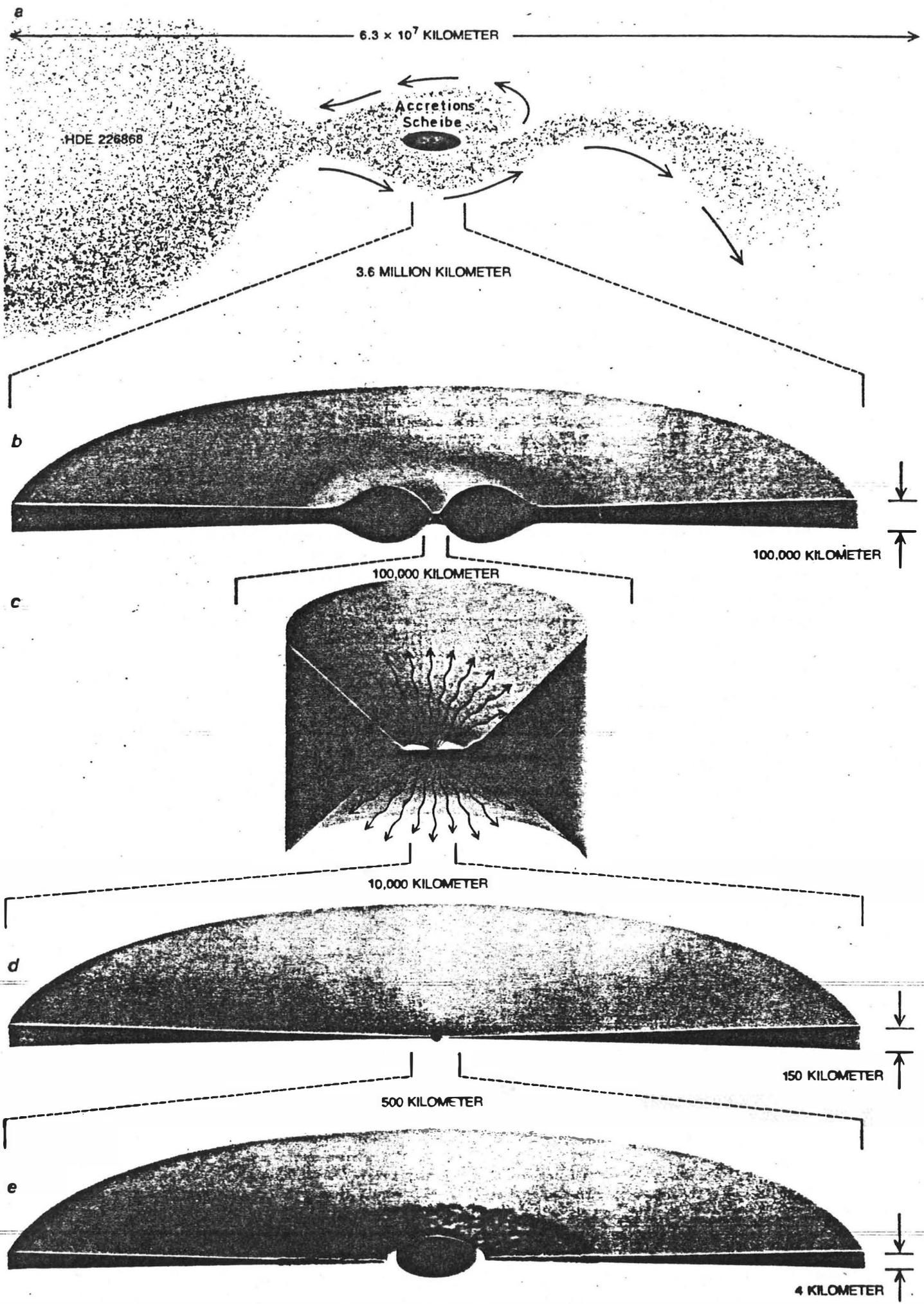


Abb. 1.23

- 1.) HDE 226 868 ist ein Überriese, von dem das SL kontinuierlich Gas abzieht und in Bahnen um das SL einspeist, wobei Corioliskräfte (Trägheitskräfte, die in einem rotierenden System auf sich bewegende Körper einwirken) es nach "rechts" ablenken.
- 2.) Zentrifugal- und Gravitationskräfte flachen die Gaswolke zu einer dünnen Scheibe um das SL ab (analog wie bei den Saturnringen) und bewirken überdies und vor allem die kreisende Bewegung.
- 3.) Ist einmal ein Gasfilament in den Ring gesaugt, würde es stets auf einer Bahn um das SL kreisen, jedoch die Reibung zwischen benachbarten Filamenten zwingt das Gas sich langsam spiralförmig nach innen, zum SL zu bewegen. Diese Geschwindigkeitskomponente ist etwa 1% der gesamten Bahngeschwindigkeit. Nach ein paar Wochen oder Monaten hat sich das Filament spindelförmig nach innen bewegt und nähert sich dem inneren Rand des Ringes und wird innerhalb des Bruchteils einer Sekunde durch den Horizont in das SL gesaugt.
- 4.) Ein Nebenprodukt der Reibung ist Wärme. Am Beginn des Einsaugprozesses hat das Filament eine Temperatur von etwa 25 000 K, die Oberflächentemperatur des Primärsterns. Auf den letzten hundertern von Kilometern der Reise durch den Ring erhitzt es sich auf mehr als 10^7 K. Die abgestrahlte Energie wird zu 80% als Röntgenstrahlung im Kilo-eV-Bereich auf den letzten 200 km (Radius des Ringes) emittiert. Die restlichen 20% sollten Röntgenstrahlung niederer Energie sowie UV-Strahlung und sichtbares Licht sein.

Zur Erläuterung der Abbildung auf Seite 42 sei erwähnt:

- b) zeigt die erwartete Form der Akkretionsscheibe. Die starken Gravitationskräfte des SL drücken die Scheibe zusammen und machen sie dünn. Gleichzeitig versucht der thermische Gasdruck dagegen zu wirken, das Ergebnis ist die Verdickung im Zentralwulst, wo der Druck genügend groß ist. Dieser ist in
- c) abgebildet. Der große Druck im Wulst wird durch die Hitze bei der Emission im Röntgenbereich in der Nähe des SL erzeugt.
- d) Im Kern der Akkretionsscheibe ist der thermische Druck noch größer als im Akkretionswulst. Die Gravitation ist jedoch so enorm, daß die Scheibe nicht dicker werden kann. Die beobachtete Röntgenstrahlung wird nur im Bereich etwa der innersten 200 km des Akkretionskernes, wie in
- e) abgebildet, erzeugt. Im Zentrum dieses Kernes liegt das SL. Die innersten 50 oder 100 km der Scheibe werden lichtdurchlässig, äußerst turbulent und extrem heiß. Die Scheibe endet in der Nähe des SL, das Gas kann nicht länger um das SL rotieren, die ungeheure Gravitationskraft des SL zieht es unter den Horizont. Die innere Struktur der Scheibe hängt von der Rotationsgeschwindigkeit des SL ab. Je geringer diese ist, um so größer ist die Röntgenstrahlen emittierende Zone, etwa 800 km im Durchmesser, im Vergleich zu rasch rotierenden SL, wo diese Zone nur etwa 400 km (s.o.) im Durchmesser mißt. Die Dynamik dieses Systems setzt eine Masse von $14 M_{\odot}$ voraus.

Es ist erstaunlich, daß trotz unseres geringen Wissens über die Physik dieser extremen Gegebenheiten, wie sie bei SL vorhanden sind, doch einigermaßen exakte Angaben über die wichtigsten Eigenschaften der Akkretionsscheibe gemacht werden können. Z.B. kann aus den Gesetzen der Energie- und Drehimpulserhaltung berechnet werden, wieviel Energie jeder Teil der Scheibe abstrahlt. Daraus resultiert das Ergebnis, daß auf den innersten 200 km bzw. 400 km, unabhängig von der Quelle, die meiste Strahlung produziert wird. Unberechenbar ist derzeit dort die Temperatur und das Soll-Spektrum. Dieses müssen wir beobachten. Daraus schließen wir erst auf eine Temperatur von 5 bis 500 mal 10^6 K. Solche Temperaturen sind wieder nur möglich, wenn die innere Region der Scheibe hef-

tigst turbulent und optisch dünn, d.h., strahlungsdurchlässig ist. Wir beobachten ferner, daß die Röntgenstrahlung unregelmäßig ankommt und die Intensität um einen Faktor 2 oder 3 schwankt, wobei das Zeitintervall von Millisekunden bis Tagen reicht. Dies paßt sehr gut mit einem turbulenten Energieemissär zusammen. Auf diese Weise, zwischen Theorie und Beobachtung iterierend, haben R. PRICE und K.S. THORNE diese brauchbare Beschreibung von der Struktur der inneren Scheibe von CYGNUS X-1 aufgebaut. Um bessere Modelle von Schwarzen Löchern entwerfen zu können, bedarf es besserer Röntgenteleskope. Auf der anderen Seite versuchen die advocati diaboli ihr äußerstes, um, wie schon eingangs zu diesem Kapitel erwähnt, nachzuweisen, daß SL nicht existent sind. Inzwischen geht aber die Suche nach weiteren SL mit großer Energie voran.

Als Abschluß noch eine Ergänzung zur Evolution eines SL:

Allgemein wird ein SL als absolutes Endstadium der Sternevolution angesehen. Dies ist nur bedingt richtig. S. HAWKING [13] gelang es 1974 prinzipiell meßbare Konsequenzen aus einer Verknüpfung der Allgemeinen Relativitätstheorie und der Quantentheorie herzuleiten. Denn im Bereich von atomaren Größen stimmen bekanntlich diese beiden Theorien nicht überein und dies führt bei SL insofern zu Widersprüchen, als es einerseits ein absoluter Absorber sein soll (keinerlei Strahlung entweicht) und damit nahezu verschwindende Entropie hätte und andererseits aber aus Materie mit von Null verschiedener Entropie gebildet wurde. Durch die Abstrahlung der Schwarzen Löcher (Fußnote S. 41) lt. HAWKING gilt nämlich der Erhaltungssatz der Baryonen nicht mehr. Die Berechnungen von HAWKING ergaben für Schwarze Löcher großer Masse ($M > 10^{34}$ g) eine Zerfallszeit durch Strahlung (vor allem Wärmestrahlung) $t_z = 10^{66}$ Jahre $\times (M/M_\odot)^3$. Sie sind also praktisch stabil. Für Mini-black holes sind die quantenmechanischen Korrekturen bedeutend: Für SL von $M = 5 \times 10^{14}$ g ergäbe sich eine Zerfallszeit von $t_z = 16 \times 10^9$ Jahre, d.h., Mini-black holes mit $M = 5 \times 10^{14}$ g wären heute gerade dabei, sich in Strahlung aufzulösen.¹⁾ (Vergleich Erdmasse 6×10^{30} g) [13].

DOPPELSTERNE-RÖNTGENSTERNE

Wir haben bereits bei der Besprechung von Supernovae gehört, daß hierbei Röntgenstrahlung emittiert wird und weiters die häufig dabei gebildeten Pulsare wieder z.T. starke Röntgenquellen sind. Es soll in diesem Abschnitt noch näher auf Doppelsternsysteme eingegangen werden, da diese fast immer starke Röntgenquellen sind, vorausgesetzt, die Sternpartner sind massereiche Sterne mit einer Masse viel größer als $3 M_\odot$.

Unsere Kenntnisse sind sehr bereichert worden, als 1970 der erste "Röntgensatellit"

"UHURU" von Kenia aus gestartet wurde. Im Mai 1975 wurde dann der SAS-3 Satellit gestartet, der eine Serie von X-Ray-Detektoren trug und der mit "UHURU" gewissermaßen das Zeitalter der Röntgenastronomie einleitete. Wir wollen uns zuerst den Lebensweg eines Doppelsternpaares vor Augen führen, wobei zu Vergleichszwecken 2 Doppelsternmodelle mit Massenverhältnissen von $20 M_\odot : 8 M_\odot$ bzw. $20 M_\odot : 6 M_\odot$ verfolgt werden: [2], [5]

Das Entwicklungsmodell stammt von den Astrophysikern E.P.J. van der HEUVEL und J. HEISE von den Universitäten Amsterdam bzw. Utrecht. Die Berechnungen haben de LOORE und de GREVE durchgeführt. Der Anfang des Systems ist gegeben durch den gegenseitigen Einfang zweier Hauptreihen- (Hauptsequenz)-Sterne, die dann mit einer Periode von 4,5 Tagen umeinander rotieren. Für den Fall 2 ist die Umlaufperiode 4,4 Tage. Im folgenden werden die homologen Daten für das 2. System in Klammern gesetzt.

1)

Siehe Fußnote auf den Seiten 39 und 41

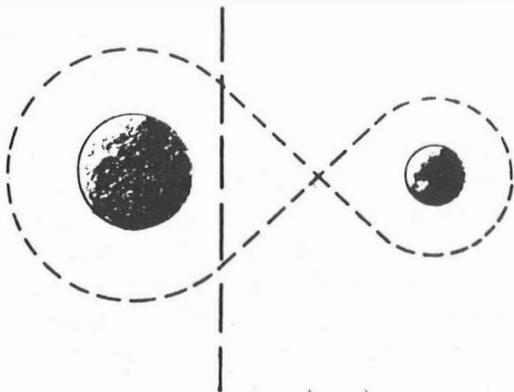


Abb. 1.24

Alter: Null Jahre (0)
 Umlaufperiode: 4,54 Tage (0,4)
 Sonnenmassen: 20:8 (20:6)

Die Geburt des Doppelsystems ist der gegenseitige Einfang. Zwei "normale" Sterne begegnen sich und beginnen, umeinander zu kreisen. Ihre Massen haben (als Beispiel) die zwanzig- und achtfache Sonnenmasse. Der gegenseitige Umlauf dauert für dieses Sternenpaar 4,54 Tage. Die Flächen, auf denen die Gravitation überall den gleichen Wert hat, die Äquipotentialflächen, haben je nach Abstand, unterschiedliche Formen. Die Äquipotentialfläche mit einem Schnittpunkt zwischen beiden Sternen heißt Rochesche Grenze. Der Schnittpunkt ist der Lagrange-Punkt L_1 .

Im Inneren der Sterne herrschen die normalen Temperaturen beim "Wasserstoffbrennen" von 30×10^6 K. Nach ca. 6×10^6 Jahren hat der massereichere Primärstern seine H-Kernfusion beendet (Abb. 1.25) und die noch wasserstoffreiche Hülle expandiert bis über die Roche-Grenze. Innerhalb von nur 80 000 Jahren werden $15 M_{\odot}$ (75%) vom Primärstern auf den Sekundärstern abgeladen (Abb. 1.26)

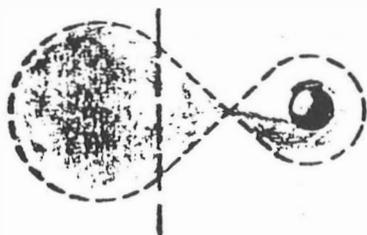


Abb. 1.25

Alter: 6,12 Mill. Jahre (6,16)
 Umlaufperiode: 4,54 Tage (4,4)
 Sonnenmassen: 20:8 (20:6)

Der Wasserstoff im Zentrum des Primärsterns ist zu Helium verbrannt, die Hülle dehnt sich bis zur Roche-Grenze aus. Über den Punkt L_1 fließt Materie zum Nachbarstern.

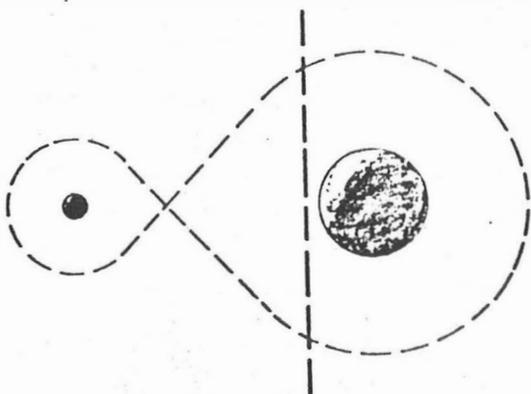
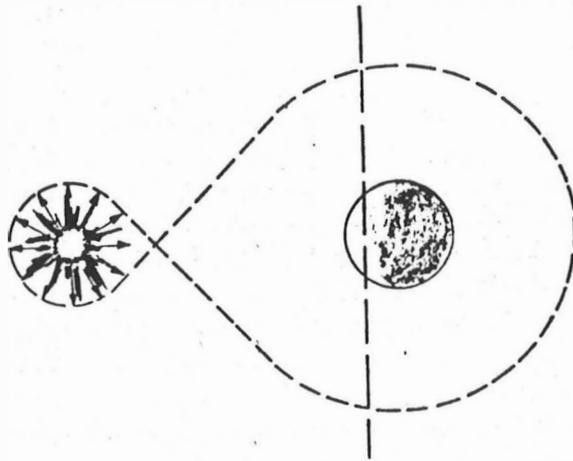


Abb. 1.26

Man beachte, daß sich die Umlaufperiode im 1. System wegen der Erhaltung des Drehimpulses auf 10,86 Tage verlängert hat, das ist mehr als die doppelte Zeit wie vor dem Massenaustausch. Im 2. System ist eine Zunahme der Umlaufzeit um nur rund 20% zu verzeichnen.



Alter: 6,76 Mill. Jahre (6,76)
 Umlaufperiode: 12,63 Tage (5,9)
 Sonnemassen: 2:22,66 (2:20,6)

Der Helium-Stern explodiert als Supernova. Übrig bleibt - je nach Masse - ein Schwarzes Loch oder ein Neutronenstern.

Das gesamte Doppelsystem erfährt eine Beschleunigung, so daß ein zusätzlicher Geschwindigkeitsvektor von 33 km s^{-1} (50 km s^{-1}) entsteht.

(Das System hat ja ursprünglich auch eine gerichtete Geschwindigkeit in der Galaxis besessen).

Abb 1.27

Der vom Primärstern übriggebliebene Kern, ein heller, heißer Helium-Stern mit ca. $5 M_{\odot}$, verbrennt nun sehr rasch in 560 000 Jahren sein Helium zu Kohlenstoff, der Sekundärstern hingegen, der zu Beginn des Massetransfers noch in seiner Wasserstoff-Kernfusionsphase war, wird gleichsam verjüngt, um etwa 5×10^6 Jahre. In immer kürzeren Intervallen entstehen durch Kernfusionen die schwereren Elemente (siehe Abschnitt 1.1.6) Neon, Sauerstoff etc., bis im Sternzentrum ein Eisenkern hoher Dichte entsteht. Der Stern kollabiert (Abb. 1.27) als Supernova und sprengt $3 M_{\odot}$ ab. Das System wird nicht auseinandergerissen (wenn der masseärmere Stern Materie abschleudert), erfährt aber doch zwei Änderungen:

Die Bahn des Remnants (Reststern) wird elliptisch mit einer numerischen Exzentrizität von $e = 0,11$ und das gesamte System erhält einen zusätzlichen Geschwindigkeitsvektor, dessen Größe

33 km/s beträgt.

Alter: 10,41 Mill. Jahre (12)
 Umlaufperiode: 12,63 Tage (6,9)
 Sonnemassen: 2:22,66 (2:20,6)

Der massereiche ehemalige Sekundärstern hat sein Wasserstoffbrennen im Zentrum abgeschlossen. Er bläht sich zu einem "Blauen Überriesen" auf.

Sein Sternwind erzeugt beim Einsturz auf den Partner intensive Röntgenstrahlung.

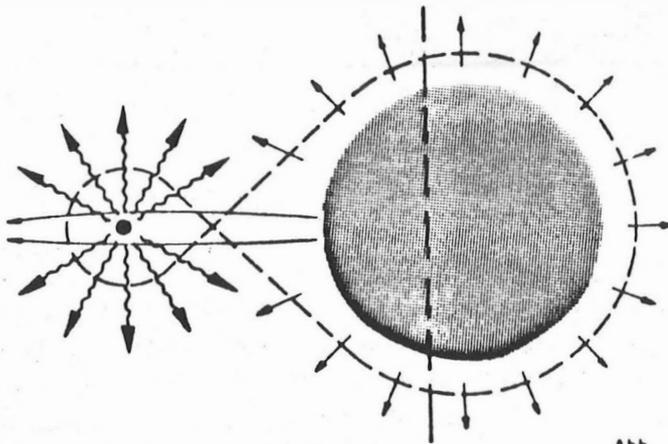
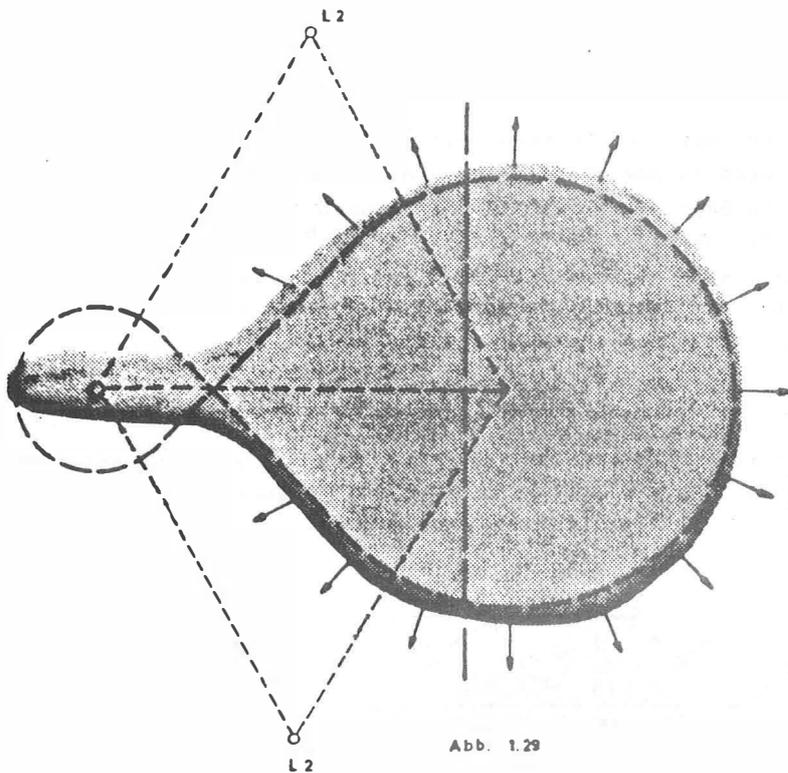


Abb. 1.28

Der Supernovaausbruch verlängert die Umlaufzeit auf 12,63 Tage, die Bahnellipse wird durch starke Gezeitenkräfte aber wahrscheinlich wieder kreisförmig. Der Sekundärstern benötigt weitere $3,65 \times 10^6$ Jahre, um das H-Brennen abzuschließen (Abb. 1.28). Die Supernova hinterläßt einen Neutronenstern oder ein SL (siehe Abschnitt über SL). Der massereiche Sekundärstern hat im Zentrum das H-Brennen beendet, wird nun ein "Blauer Überriesen". Sein "Sternwind" mit 200 km/sec erzeugt beim Einsturz auf den Partner intensive Röntgenstrahlung. Obwohl pro Jahr nur etwa $10^{-10} M_{\odot}$ als Sternwindmaterie auf den kompakten Partner einströmt, wird dieser dennoch eine intensive Rönt-

genquelle mit einer Energieabgabe vom 10^4 fachen der Sonnenenergie. Diese Phase dauert nur einige 10^4 Jahre, dennoch vermutet man, daß sich einige beobachtete Doppelsternsysteme wie CENTAURUS X-3, HERCULES X-1 und CYGNUS X-1 in diesem Zustand befinden. Die pulsierende Röntgenstrahlung von Centaurus X-3 und Hercules X-1 mit einer Periode von 4,8 bzw. 1,24 Sekunden deutet auf einen kleinen rasch rotierenden Pulsar hin, während bei Cygnus X-1 keine regelmäßigen Pulse auftreten, was auf das Fehlen eines rotierenden Magnetfeldes hinweist. Man glaubt daher, hier ein kompaktes Raumgebilde, eventuell ein SL, aus dessen Umgebung die Strahlung mit einer Fluktuation im Millisekundenbereich emittiert wird, vorgefunden zu haben. Wir stellen fest, daß das Stadium des Röntgensterns im Lebenslauf eines Doppelsternsystems ein ganz normales Stadium und kein "Sonderfall" ist.



Alter: 10,45 Mill. Jahre (12,03)
Umlaufperiode: 12,63 Tage (5,9)
Sonnemassen: 2:22,66 (2:20,6)

Ein zweiter Materie-Austausch beginnt, da jetzt der "Blaue Überriese" die Roche-Grenze erreicht hat. Eine dichte Materie-scheibe absorbiert alle Röntgenstrahlung. Der Überriese hüllt den kleineren Begleiter schließlich völlig ein.

Abb. 1.29

Hat sich nun der Sekundärstern über den neuen 1. Lagrangepunkt des Systems ausgedehnt, so erfolgt wieder ein Materieaustausch, dieses Mal jedoch so, wie es bereits im vorhergehenden Kapitel über SL beschrieben wurde (Abb. 1.29).

Trotz intensiver Forschung gibt es bis heute noch kein allgemein akzeptiertes Modell für die Physik solcher Akkretionsscheiben. Besonders das Stabilitätsproblem ist noch ungeklärt. Nach den Vorstellungen einer Gruppe von Astrophysikern am MPI in München wird das Plasma bei seinem spiralartigen Einsturz auf den Neutronenstern oder das SL durch dessen Magnetfeld in bestimmte Bahnen gezwungen (siehe Seite 41 ff.), wobei der Einsturz gebremst (am sogenannten ALFVÉN-Radius) und zeitweilig sogar gestoppt werden kann, wodurch die beobachtete Abschaltung der Röntgenstrahlung erklärt wäre. Dieses Phänomen wird als "magnetosphärisches Ventil" bezeichnet.

Die Röntgensternphase wird in dem Moment beendet, in dem die expandierende Hülle des Blauen Überriesen seine ROCHE-Grenze überschreitet. Dann fließt plötzlich eine enorme Materiemenge von 10^{-4} bis 10^{-3} Sonnenmassen jährlich auf den kompakten Partner und bildet eine dichte Scheibe, die alle Röntgenstrahlung absorbiert (Abb. 1.29); nur noch

sichtbare Strahlung wird emittiert. Der Überriese dehnt sich weiter aus, bis der kompakte Stern völlig eingehüllt ist und ferner der 2. bzw. 3. Lagrangepunkt erreicht wird, über den dann die abströmende Materie das Doppelsternsystem verläßt und in den Welt- raum entflieht. Dies reduziert auf äußerst effektive Weise die Umlaufperiode des Systems.

Innerhalb von etwa 20 000 Jahren verliert der expandierende Überriese seine Wasser- stoffhülle, dieser Vorgang spielt sich noch rascher ab, wenn der Überriese und der in seinem Inneren liegende Kompaktstern gegeneinander rotieren.

Die letzte Phase beginnt: Es bleibt vom ursprünglich $28 M_{\odot}$ betragenden Doppelsystem schließlich nach $10,47 \times 10^6$ Jahren ein Gesamtrest von $8 M_{\odot}$ (Abb. 1.30), bestehend aus einem Helium-Stern von etwa $6 M_{\odot}$, dem Heliumkern des Blauen Überriesen und ein enger kompakter Partnerstern (close-binary-System). Beide sind umgeben von einer langsam expandierenden Materieschale.

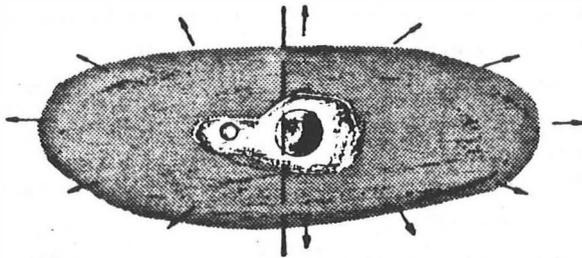


Abb. 1.30

Alter: 10,47 Mill. Jahre (?)
 Umlaufperiode: etwa 4 Stunden (?)
 Sonnemassen: 2:6 (2:5)

Die äußere Hülle des Überriesen wird abgestoßen und umgibt, langsam expandierend, das gesamte System. Von dem Überriesen ist ein kleiner Helium-Stern zurück- geblieben.

Rund 600 000 Jahre später steuert das System auf seine letzte attraktive "Vorstellung" zu. Der Helium-Sternpartner ($6 M_{\odot}$) hat alle Stufen der Kernfusion durchlaufen, analog zum Partner in dessen früherer Phase und explodiert nun seinerseits als Supernova (Abb. 1.31)

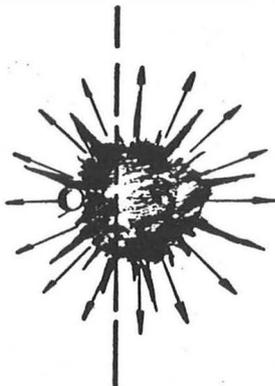


Abb. 1.31

Alter: 11 Mill. Jahre
 Umlaufperiode: etwa 4 Stunden
 (oder Trennung beider Sterne)
 Sonnemassen: 2:3 (oder 2:1)

Der Helium-Stern explodiert als Supernova. Zurück bleibt ein kompakter Stern, in diesem Fall ebenfalls ein Neutronenstern. Ob das Doppelsternsystem durch diese zweite Supernova-Explosion auseinandergerissen wird oder nicht, hängt von der Masse des zurückbleibenden kompakten Sternes ab.

Da nun die Explosion von der mas- sereichereren Komponente ausgeht ($6 M_{\odot}$), fragt sich, ob das Doppel- system dadurch zerstört würde. Dies ist dann der Fall, wenn die Masse des Reststerns, die nach der der Supernova des Helium-Sterns übrig bleibt, der Ungleichung

$$M_{\text{remn.}} < \frac{M_{\text{He}} - M_{\text{C}}}{2}$$

genügt.

(M_{C} = Masse des Kompaktsterns).

In unserem Beispiel 1 löst sich das System auf, wenn der Reststern weniger als $2 M_{\odot}$ hat (Abb. 1.32). Im 2. Beispiel ergäbe sich ein Grenzwert von etwas weniger als $1,5 M_{\odot}$. Im Jahre 1974 wurde mit dem 304 m Radioteleskop von Arecibo auf Puerto Rico erstmals ein Binärpulsar PSR 1913+16 entdeckt, der wohl die letzte wesentliche Entwick- lungsstufe von Doppelsternsystemen darstellt! Dieses Doppelsystem ist fast als "Laboratorium" für die Allgemeine Relativitätstheorie anzusehen, es enthält nämlich eine Superpräzi- sionsuhr - den Pulsar - die sich mit hoher Geschwindigkeit in extrem elliptischer

Umlaufbahn in einem starken Gravitationsfeld bewegt, wodurch eine starke Periheldrehung der Umlaufellipse erfolgt. Es ist vielleicht noch interessant, die Ergebnisse der einjährigen Beobachtung bekanntzugeben:

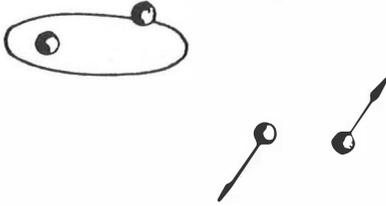


Abb. 1.32

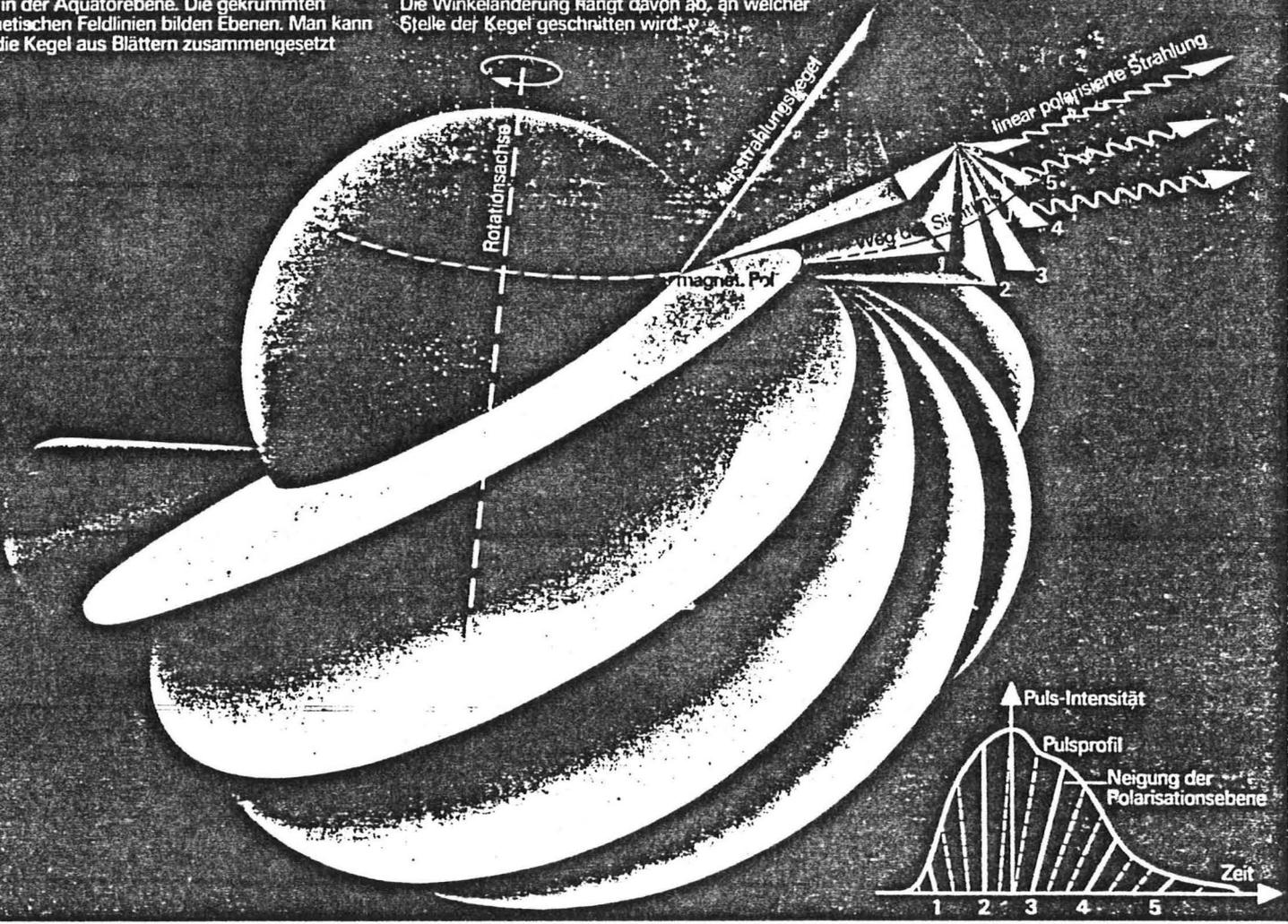
Das System ist 15 000 Lichtjahre entfernt, liegt nahe der galaktischen Ebene, hat eine stark elliptische Bahn mit $e = 0,615$ und einer Bahnperiode von 7,75 Stunden. Sein Aphel liegt 800 000 km, sein Perihel 440 000 km vom Zentralstern entfernt. Seine Geschwindigkeit variiert zwischen 120 und 200 km/sec (Erde bewegt sich mit 30 km/sec um die Sonne).

Würde dieser Pulsar die Sonne umkreisen, läge seine Bahn teilweise innerhalb der Sonne. Der Pulsar ist ein Neutronenstern mit $1 M_{\odot}$ und einem Radius von 10 km. Der Strahlungskegel (siehe Seite 36) überstreicht alle 0,059 sec die Erde, rotiert also je Sekunde 17 mal um seine Rotationsachse. Die Beobachtungen anderer Pulsare zeigten, daß die Radiostrahlung linear polarisiert ist, neu aber war, daß hier die Schwingungsebene über den Puls hinwegwanderte (Abb. 1.33). Weiters erwartet man sich eine langzeitige Pulsveränderung, weil sich die Neigung des Strahlungskegels zur Rotationsachse verändert. Diese Veränderung wird durch die sogenannte Spinpräzession (Thirring-Lense-Effekt) bewirkt, ein relativistischer Effekt, der in der NEWTONschen Gravitationstheorie fehlt. Danach bewegt sich die Rotationsachse einer Kugel (Neutronenstern) entlang eines Kegels, wenn diese sich durch ein Schwerefeld bewegt.

Polarisierte Radiostrahlung

Die Radio- und Röntgenstrahlung geht von den magnetischen Polgegenden aus, gebündelt in einem Kegel. Da magnetische und Rotationsachse normalerweise nicht zusammenfallen, drehen sich die beiden Kegel wie auf Breitenkreisen. Bei Hercules X-1 liegt die magnetische Achse zufällig etwa in der Äquatorebene. Die gekrümmten magnetischen Feldlinien bilden Ebenen. Man kann sich die Kegel aus Blättern zusammengesetzt

denken, die diese Ebenen darstellen. Die Strahlung ist in diesen Ebenen linear polarisiert. Bei der Rotation überstreicht der Kegel den Beobachter auf der Erde, wobei die Sichtlinie nacheinander die Polarisations Ebenen schneidet. Der Winkel der Polarisationsrichtung ändert sich kontinuierlich. Die Winkeländerung hängt davon ab, an welcher Stelle der Kegel geschnitten wird.



A bb. 1.33

Für den Binärpulsar PSR 1913+16 wurde von den Astrophysikern R.J. TAYLOR, G. BÖRNER, J. EHLERS und E. RUDOLPH vom MPI München eine Achsneigungswanderung von 1° im Jahr berechnet, d.h., schon in 20 Jahren erreicht der Strahlungskegel der Pulse nicht mehr die Erde. Man verspricht sich von weiteren eingehenden Beobachtungen Aufschluß über Details des noch zum Teil unverstandenen Ausstrahlungsmechanismus und damit über grundlegende Eigenschaften von Pulsarmagnetosphären. Da die Pulse ohne Unterbrechung beobachtbar sind, muß der Zentralstern ebenfalls ein Kompaktstern sein (mit kleinem Radius, da keine Abdeckung der Partner erfolgt), entweder ein Helium-Stern mit einem Radius von ca 10^5 km oder ein kleinerer Stern, etwa ein Weißer Zwerg mit einem Radius von einigen 10^2 km oder ein Neutronenstern oder gar ein SL mit einem Radius von weniger als 3 km. Weiters können auch die klassischen Tests der ART. EINSTEIN's überprüft werden:

- 1.) Ablenkung und Rotverschiebung elektromagnetischer Wellen im Gravitationsfeld.
- 2.) Periheldrehung (langsame Drehung der großen Ellipsenachse der Pulsarbahn) aufgrund relativistischer Effekte.
- 3.) Da dreimal täglich die Bahnellipse vom schwächeren in ein starkes Gravitationsfeld führt, kann dessen Einfluß auf die Präzisionsuhr (Pulsarrotation), die Pulse mit einer Frequenzgenauigkeit von 10^{-9} sec aussendet, leicht gemessen werden.
- 4.) Die langzeitige Pulsveränderung (s.o.).

Die relativistische Perihelverschiebung von PSR 1913+16 wird $4,24^\circ$ im Jahr betragen, dagegen beträgt die relativistische vom Planeten Merkur zum Vergleich nur $42''$ in 100 Jahren, das Verhältnis ist also rund 600:1!

Auch über die Gravitationsstrahlung erhofft man sich aufschlußreiche Ergebnisse, da die Abnahme der 7,75 Stundenperiode äußerst genau bestimmbar wird, wodurch die entsprechende Umwandlung von Energie und Drehimpuls in Gravitationsenergie eine Bestätigung erföhre. Die sehr geringe Abnahme der Bahnperiode entspricht den Werten aus der ART.

Die Einmaligkeit des Binärpulsars besteht vor allem darin, daß hier die relativistischen Effekte die Newton'schen Effekte bereits um Größenordnungen übertreffen, so daß hier die letzteren vernachlässigbar klein werden. So etwas hat es bisher bei astrophysikalischen Phänomenen noch nie gegeben.

Zum Abschluß dieses Kapitels soll noch über Röntgensterne in Kugelsternhaufen berichtet werden [9].

Wie bereits mehrfach erwähnt, sind erst in den letzten 15 Jahren durch Röntgenteleskope, die von Ballons, Raketen und Satelliten in den Raum getragen wurden, etwa 100 sehr helle veränderliche Röntgenstrahler entdeckt und lokalisiert worden. Ein typischer Röntgenstern strahlt 10^3 mal mehr Energie im Röntgenbereich ab, als die Sonne im gesamten elektromagnetischen Wellenbereich! Die Häufigkeit beträgt derzeit etwa $1:10^9$ Sterne, sie sind also sehr selten. Innerhalb von Kugelsternhaufen kommen sie 500 mal häufiger vor, als in der galaktischen Scheibe, d.h. also, das Verhältnis ist hier $1:2 \times 10^6$ Sterne.

Vor kurzem wurden mehr als 30 Röntgen-"BURSTERS" entdeckt: eine spezielle Art von Röntgenstrahlern, die kurze, aber "leuchtende" Ausbrüche von Röntgenstrahlen aussenden, die bis zu mehreren Sekunden dauern. Ein einzigartiger schneller Burster emittiert seine Ausbrüche mit einer Frequenz von mehreren tausend Ausbrüchen pro Tag. In einem typischen 10 Sekunden-Ausbruch kann der Röntgenfluß den gesamten Strahlungsfluß der Sonne von einer Woche (!) überschreiten.

Eine Eigenschaft, die alle Röntgensterne in Mehrfachsystemen gemeinsam haben, ist Jugend. Im allgemeinen sind diese Systeme jünger als ein paar 100×10^6 Jahre, so daß ein solches System die 13×10^9 Jahre des Alters eines Kugelsternhaufens nicht überlebt haben könnte. Eine mögliche Evolutionstheorie ist folgende: im Zentrum eines

Kugelsternhaufens befindet sich eine "Ansammlung von ultradichter Materie" oder mit anderen Worten, viele Neutronensterne oder SL. Dort verbleiben sie viele 10^9 Jahre, dunkle Objekte, bis eine "Materiequelle" sie in Röntgensterne verwandeln könnte. Diese Materiequelle könnte jedoch nur durch Einfang gewonnen werden, da ja die Mitglieder des Sternhaufens viel zu alt wären, um noch im Stadium des H-Verschmelzens zu sein. Es gibt hier verschiedene "Einfangtheorien", die durch Computersimulationen aufgrund von "Events" ¹⁾ in der Atomphysik gefunden wurden. Im wesentlichen wurden 2 Theorien approbiert (von A. FABIAN u.a., von J. HILLS). Mit vernünftigen Annahmen über die Anzahl der Neutronensterne oder SL sagen beide Hypothesen die Bildung mehrerer enger Doppelsysteme im Zentrum (Dichte etwa 10^3 Sterne je Kubiklichtjahr) voraus. Diese Systeme können viel länger Röntgenstrahlen emittieren, als die binären Systeme der galaktischen Ebene, weil die Quelle des Akkretionsmaterials ein sich langsam entwickelnder Stern niedriger Masse sein kann, dessen Expansionsphase nach Verlassen der Hauptsequenz mehrere 10^8 Jahre dauert.

Eine SL-Hypothese schlugen J.P. OSTRIKER und J.N. BACHALL von der Princeton University vor. Das Akkretionsmaterial soll, dieser Theorie entsprechend, vom Sternenwind der Sterne des Clusters kommen. Da es sich hierbei jedoch nur um ein sehr dünnes interstellares Gas handeln kann, muß das SL sehr massiv sein, etwa im Bereich von $100 M_{\odot}$ bis $1000 M_{\odot}$, um es mit solcher Geschwindigkeit (und dadurch erzeugter Hitze) anzuziehen, daß Röntgenstrahlung entstehen kann. Im Einklang mit allen Hypothesen steht jedoch die beobachtbare Tatsache, daß die Röntgenquellen bevorzugt in Sternhaufen mit dichtem Zentrum gefunden wurden.

1.2. DIE PROTOSTERNHYPOTHESE

Die Protosternhypothese hat ihre Wurzeln in den Arbeiten von AMBARZUMJAN über die Theorie der Sternassoziationen [1].

Ein weiterer enger Zusammenhang besteht auch mit den Erkenntnissen über die Nichtstationarität kosmischer Objekte im allgemeinen. Diese Theorie beschäftigt sich vor allem mit jener Entwicklungsphase eines Sterns, die vor dem Erreichen der HS liegt. Es muß besonders beachtet werden, daß der Begriff PROTOSTERN in diesem Kapitel materiell etwas anderes bedeutet, als in den bisherigen Kapiteln. Man darf jedoch diese Theorie keinesfalls als der Weisheit letzten Schluß ansehen. Sie erscheint in letzter Zeit eher schwächer fundiert als die klassische Kondensationstheorie.

1.2.1. NICHTSTATIONARITÄT

Die Dauer der kosmischen Prozesse ist in der Mehrheit der Fälle vergleichsweise groß gegenüber dem Zeitraum astronomischer Beobachtungen, so daß keine unmittelbaren Veränderungen, welche ein Ergebnis dieser Prozesse wären, bemerkt werden können. Trotzdem gibt es im Leben kosmischer Körper und ihrer Systeme auch Etappen, in denen in den Körpern im Laufe eines bestimmten Entwicklungsprozesses neue Kräfte entstehen, die in der Lage sind, den Zustand der Körper und Systeme gründlich zu ändern. Genau in einem solchen Fall sagen wir, daß sich das Objekt in einem nichtstationären Zustand befindet. Die Geschwindigkeit, mit der solche Ereignisse ablaufen, erlaubt es uns, diese Veränderungen unmittelbar zu beobachten (Ausbrüche von Novae, Supernovae u.a.) und eventuell Schlüsse aus sehr vielen indirekten Daten zu ziehen (Zerfall von Sternhaufen und Sternassoziationen, Ausbrüche von Galaxienkernen).

In der Geschichte der Wissenschaften gibt es ein interessantes Kuriosum: Die Astronomen, welche die Rolle nichtstationärer Objekte in der kosmischen Evolution nicht verstanden, schlossen gewöhnlich auch gern die Augen vor Schwierigkeiten, die mit

1)

Kollisionen von atomaren und subatomaren Partikeln im Teilchenbeschleuniger.

deren Deutung verbunden waren. Sie betrachteten diese Objekte als "Besonderheiten" gegenüber einer allgemeinen gesetzmäßigen Entwicklung.

Es ist z.B. bekannt, daß Ende des vergangenen Jahrhunderts die Hypothese verbreitet war, derzufolge Novae ausschließlich das Ergebnis der seltenen Erscheinung eines Zusammenstoßes zweier Sterne sind. Es wurde völlig außer acht gelassen, daß sie - wie wir heute wissen - auch das Ergebnis von Gesetzmäßigkeiten der Sternentwicklung sind. Der gleiche Fall wiederholte sich bei den Radiogalaxien, nur in vielleicht noch kläglicherer Form. Wieder hielt man die Radiogalaxien eine Zeitlang für das Ergebnis des Zusammenstoßes von zwei Galaxien, obwohl von Anfang an klar war, daß die statistischen Daten solchen Vorstellungen widersprechen.

Richtig ist jedoch der entgegengesetzte Standpunkt, daß nichtstationäre Prozesse eine gesetzmäßige Phase der kosmischen Entwicklung darstellen. Jedoch ist zu jedem Zeitpunkt der Anteil der kosmischen Objekte, die eine Wende ihrer Entwicklung durchmachen, gewöhnlich klein. Sie ist in jedem Fall bei weitem kleiner als der Anteil der Objekte, die sich in stationärem Zustand befinden (z.B. ist die Zahl der Sterne in Assoziationen klein, im Verhältnis zur Zahl der Sterne im allgemeinen Sternfeld der Galaxis). Die Erforschung der Röntgenquellen und der Pulsare in der Galaxis ließ keinen Zweifel daran, 1., daß diese Objekte überdichte Körper sind und 2., daß sie nichtstationär sind. Es ist interessant, zu bemerken, daß in der Regel Nichtstationarität gerade dann auftritt bzw. nicht auszuschließen ist, wenn in einem kleinen Volumen eine verhältnismäßig große Masse vorhanden ist.

Nichtstationäre Zustände stellen gewöhnlich eine jähe Wende in der Entwicklung eines Objektes dar. Sie sind mit der Geburt neuer Objekte (z.B. Sternassoziationen) oder mit dem Übergang des Objekts aus einer Klasse in die andere verbunden (Ausbrüche von Supernovae etwa, die zur Umwandlung des Sterns in einen Nebel führen).

Folglich eröffnet eine detaillierte Erforschung nichtstationärer Prozesse oder Übergangserscheinungen den Weg zu einem tieferen Verständnis der Entwicklung kosmischer Objekte. Bis zur Mitte der dreißiger Jahre, als man die ersten wichtigen Hinweise auf nichtstationäre Objekte fand, spielte die Evolutionsidee in der Astrophysik keine überragende Rolle, obwohl die Mehrheit der Astrophysiker sehr gut verstand, daß sich ihre Objekte verändern, d.h., entwickeln. Inzwischen ist heute in der ganzen Astrophysik die Vorstellung der Entwicklung der Sterne, Sternhaufen und Galaxien selbstverständlich. Das war unzweifelhaft eines der Ergebnisse der Erforschung nichtstationärer Objekte im Weltall, die mit größter Aufmerksamkeit vorgenommen wurde.

1.2.2. ENTSTEHEN DIE STERNE AUS DIFFUSER MATERIE?

Wir haben in den Kapiteln über die Sternentstehung die Mechanismen angegeben, welche die Sternentstehung bewirken können und auch auf die Schwierigkeiten hingewiesen, mit denen die Theorien zu kämpfen haben, da die bisherigen Beobachtungen keine ausreichenden Bestätigungen liefern konnten. Es soll jedoch an jene Passagen der Kondensationstheorie erinnert werden, in welchen das Vorhandensein entsprechend großer "Brocken" bzw. Kondensationskerne gefordert wurde (Punkt 1.1.4). Im folgenden sind nun die neuen Vorstellungen erläutert:

Während die Erkenntnis, daß die Sternentwicklung in der Galaxis in Gruppen und Assoziationen noch andauert, kaum noch bestritten wird, ist die Frage nach dem praestellaren Zustand der Materie eine Quelle ernster Meinungsverschiedenheiten.

Großer Popularität erfreut sich die klassische Vorstellung einer Sternbildung durch Kondensation diffuser gas- oder staubförmiger Materie. Es wird also angenommen, daß die Entwicklung der kosmischen Materie von wenigen dichten zu dichteren Zuständen verläuft.

Der Ausgangspunkt dieser Vorstellung ist die große Verbreitung diffuser Materie in denjenigen Gebieten der Galaxis, in denen gegenwärtig der Sternbildungsprozeß noch andauert.

Die Beobachtungen zeigen tatsächlich in vielen Fällen, daß ein enger Zusammenhang zwischen jungen Sternen und diffuser Materie besteht.

In einer großen Serie von Arbeiten über diffuse Nebel erbrachten die russischen Astronomen SCHAIN und HASE [1/262, 263] überzeugende Beweise für einen genetischen Zusammenhang dieser Nebel mit Sternen der Spektralklassen O und B (siehe auch 1.1.5.)

Die Resultate ausgedehnter Untersuchungen von diffusen Nebeln und deren Verbindung mit heißen Sternen faßten SCHAIN und HASE in der Aussage zusammen, daß in einem Gebiet, in dem die Vorbedingungen zur Bildung großer Gruppierungen heißer Sterne oder kleiner Sterngruppen (Assoziationen) oder auch von einzelnen heißen Sternen vorhanden waren, offensichtlich auch die Bedingungen zur Bildung (?) von Gasnebeln, vielleicht sogar aus ein und derselben Quelle, existierten.

Der genetische Zusammenhang der Veränderlichen vom Typ T TAURI, die die T-Assoziationen bilden, mit diffusen Nebeln wurde von AMBARZUMJAN und anderen Astrophysikern gefunden.

Aus der Untersuchung einer großen Zahl photographischer Aufnahmen einer ganzen Reihe von Fasernebeln, zog man den Schluß, daß ununterbrochen Sterne in den Gasfasern der Nebel entstehen. Die mittlere Dichte des Gases in den Nebelfasern schätzte man auf etwa 10^{-19} g/cm³, was nach Berechnungen zur Bildung von Sternketten aus den Gasfasern ausreicht, wobei die mittleren Abstände zwischen den Sternen von der Größenordnung 0,1 pc sind.

Radioastronomische Beobachtungen des neutralen Wasserstoffs in Sternhaufen, die der amerikanische Radioastronom DRAKE ausführte, zeigen, daß der Gasgehalt der Haufen mit dem Alter des Systems abfällt; er betrachtete dies als Bestätigung der Konzeption der Sternbildung aus diffuser Materie. Es läßt sich jedoch auch zeigen, daß dieses Ergebnis nur die Existenz eines genetischen Zusammenhanges der jungen Sterne mit den diffusen Nebeln anzeigt.

Schließlich kann man noch viele Arbeiten erwähnen, deren Autoren den Reichtum der irregulären spiralförmigen Galaxien an interstellarem Gas als Beweis für die Vorstellung einer Sternbildung durch Kondensation diffuser Materie ansehen.

Man muß jedoch darauf hinweisen, daß alle oben angeführten Resultate, die nur einen genetischen Zusammenhang der jungen Sterne mit diffusen Nebeln eindeutig beweisen, andere mögliche Entwicklungswege der kosmischen Materie nicht ausschließen.

Beispielsweise war in den dreißiger Jahren das beobachtete stetige Ausströmen von Materie aus den WOLF-RAYET- und P CYGNI-Sternen sowie den heißen Riesen mit Emissionslinien im Spektrum, wie auch der Auswurf von Gashüllen bei Nova- und Supernovaausbrüchen Veranlassung, die Hypothese aufzustellen, daß die diffusen Nebel aus Materie entstehen, die von den Sternen ausgestoßen wurde. Nach Berechnungen können die Sterne in 10^9 Jahren eine Gasmasse abstoßen, die mit der Masse des Gases in der Galaxis vergleichbar ist.

Eine Abschätzung der Masse an diffuser Materie, die von Sternen der verschiedenen Typen infolge von Flares ¹⁾, kontinuierlicher Masscabströmung und Korpuskularstrahlung abgestoßen wird, gab später der deutsche Wissenschaftler BIERMANN [1/270] an:

¹⁾ Materiefilamente, die zeitweilig von Sternen in den instabilen Phasen ihrer Entwicklung abgestoßen werden.

Die Gesamtmasse des von allen Sternen der Galaxis ausgestoßenen Gases liegt demnach bei einer Sonnenmasse im Jahr.

Während die oben angeführten Ergebnisse also nur den genetischen Zusammenhang von Sternen mit diffuser Materie in Galaxien bezeugen, glaubt AMBARZUMJAN einige ausreichend starke Hinweise zu besitzen, sich von der Hypothese einer Bildung der Sterne aus dieser Materie loszusagen:

Darnach [1/4] widersprechen folgende Fakten der Hypothese, daß Assoziationen aus Gas gebildet werden:

- 1.) Die Assoziation Perseus I (h und χ Persei), die eine große Anzahl junger Sterne enthält - sie ist eine der reichsten O-Assoziationen in unserer Galaxis - liegt in einem Gebiet, das besonders arm an interstellarem Gas ist. Die Annahme, daß die Entstehung dieser Assoziation die Ursache für das Erschöpfen des Gases ist, erscheint gekünstelt, da aus dem Vorkommen sehr heißer, höchstens 10^6 Jahre alter Überriesen folgt, daß die Sternbildung in dieser Assoziation noch andauert. Das vollständige Fehlen von Gas in der Assoziation und die noch andauernde Sternbildung sind mit der Hypothese der Entstehung der Sterne aus dem Gas völlig unvereinbar.
- 2.) Blaue Sterne hoher Leuchtkraft kommen ab und zu in Kugelsternhaufen vor, in denen wegen des großen Abstandes von der galaktischen Ebene die Dichte des interstellaren Gases sehr gering sein muß.

Neuere Beobachtungen des mexikanischen Astronomen HARO [1/280] zeigen, daß in der Galaxis eine bedeutende Anzahl von Flaresternen existiert, die im HERTZSPRUNG-RUSSELL-Diagramm unterhalb der Hauptreihe liegen. Nach HARO bedeutet dies zumindest, daß nicht alle Sterne durch gravitative Kondensation diffuser Materie entstehen. Die relativ jungen Flaresterne dürften sich ja nach der Theorie von der gravitativen Kondensation der diffusen Materie nur oberhalb der Hauptreihe befinden und müßten allmählich auf sie herabwandern.

Die Existenz dynamisch instabiler Sternsysteme ist gleichfalls schwer mit der Kondensationshypothese in Einklang zu bringen. Wenn diese Systeme aus diffuser Materie entstünden, hätten sie in allen Fällen negative Gesamtenergie und können deshalb in keiner Weise später zerfallen.

Die erwähnten und auch viele andere Beobachtungstatsachen erhalten eine befriedigende Erklärung im Rahmen der Hypothese der Protosterne, wonach hypothetische Körper die Sterne erzeugen, meint AMBARZUMJAN.

1.2.3. EINE NEUE THEORIE DER STERNENTSTEHUNG ?

DIE PROTOSTERNHYPOTHESE

Die vorhandenen starken Hinweise auf den genetischen Zusammenhang von Sternassoziationen und gasförmiger Materie führt nach AMBARZUMJAN zu dem Schluß, daß Sterne und interstellares Gas gemeinsam entstehen.

Die Theorie der Sternassoziation geht deshalb von der Annahme aus, daß Sterne und diffuse Materie gemeinsam aus Materie nichtstellarer Natur entstehen. Mit anderen Worten: in dieser Theorie wird angenommen, daß im Weltall Körper bisher unbekannter Natur existieren, aus denen sowohl Sterne als auch diffuse Materie entstehen. Diese hypothetischen Körper erhielten den Namen Protosterne. Wir werden sehen, daß viele Tatsachen, die sich auf junge Sterne und das interstellare Gas beziehen, insbesondere auf ihre Bewegungen, auch für diese Vorstellung sprechen.

Expansion und Zerfall der Sternassoziationen, das Auseinanderlaufen der Sterne aus den

Zentren der Sternbildung (Mehrfachsysteme vom Trapeztyp, O-Haufen usw.) sprechen dafür, daß die Sterne aus Körpern kleiner Dimension und hoher Dichte entstehen. Die Vorstellung, daß im Weltall sehr massive, überdichte oder sehr dichte Körper unbekannter Natur existieren, wurde in den letzten Jahren in Arbeiten weiterentwickelt, die dem Problem der Evolution der Galaxien gewidmet waren. Eine unmittelbare Beobachtung von Protosternen mit gegenwärtig bekannten Methoden ist aller Wahrscheinlichkeit nach unmöglich. Deshalb haben indirekte Hinweise auf die Existenz unbekannter Materiezustände im Weltall einen gewissen wissenschaftlichen Wert. Die geeignetsten kosmischen Objekte in der Galaxis, bei denen man hoffen kann, solche Hinweise zu finden, sind offensichtlich die jungen instationären Sterne. In gewissen Fällen könnten die jungen Sterne Reste der praestellaren Materie enthalten, aus der sie sich vor kurzem bildeten.

Die Beobachtungen der instationären Sterne bestätigen möglicherweise diese Annahme. Die irregulären Helligkeitsänderungen dieser Sterne können in vielen Fällen nur erklärt werden, wenn man annimmt, daß in den oberflächennahen Schichten der Sterne von Zeit zu Zeit eine Strahlungsquelle unbekannter Natur erscheint. Dabei muß man annehmen, daß die Energie nicht aus den in den oberflächennahen Schichten des Sterns vorhandenen Reserven entnommen, sondern aus dessen inneren Schichten durch einen unbekanntem Energieträger herausgebracht wird. Außerordentlich bemerkenswert ist die Tatsache, daß die Strahlung der instationären Sterne nicht durch thermonukleare Reaktionen bedingt sein kann, zumindest in den Perioden starker irregulärer Helligkeitsschwankungen. Es gibt Gründe, anzunehmen, daß die Energieabgabe in den Oberflächenschichten der Sterne mit Atomzerfallsprozessen zusammenhängt. Dafür spricht insbesondere die große Häufigkeit instabiler Kerne in den Atmosphären einiger instationärer Sterne.

Die Entwicklung einer Sternassoziation stellt sich dar als aufeinanderfolgende Umwandlung einzelner Protosterne des primären Systems in instabile, zerfallende Sterngruppen (Sternhaufen, Mehrfachsysteme vom Trapeztyp und Sternketten) sowie in diffuse Nebel. Bei der Entstehung der instabilen Sterngruppen erhalten die Sterne Geschwindigkeiten (von der Größenordnung 10 km/s), die ausreichen, um nicht nur die Anziehung der Sterne derselben Gruppe, sondern auch die der gesamten Assoziation zu überwinden und aus dem System in das allgemeine galaktische Sternfeld zu entweichen. Die Sterne müssen in diesem Falle ihre kinetische Energie auf Kosten der Differenz der inneren Energie des Protosterns und der gesamten inneren Energie der aus ihm entstandenen Sterne erhalten.

Im allgemeinen Fall besteht dabei in jeder gegebenen Entwicklungsperiode die Sternassoziation sowohl aus Protosternen, die sich noch nicht in Sterne umgewandelt haben, als auch aus engen Sterngruppen, aus Sternen schon zerfallener Gruppen, die noch nicht das Gebiet der Assoziation verlassen haben, und aus diffuser Materie (siehe auch Abschnitt 1.1.5).

Die Protosternhypothese, die eine logische Folge aus der Theorie der Sternassoziationen ist, erklärt die Gesetzmäßigkeiten des Aufbaus und der Entwicklung dieser Systeme qualitativ gut. Sie ist jedoch noch nicht genügend ausgearbeitet. Vor allem fehlen noch Vorstellungen über die konkreten Eigenschaften der Protosterne. Das Problem ist dadurch sehr kompliziert, daß Protosterne nicht unmittelbar beobachtet werden können. Die Unkenntnis der konkreten Eigenschaften der hypothetischen Protosterne verhindert ihrerseits die Entwicklung von Vorstellungen über die konkreten Sternbildungsmechanismen in den Assoziationen.

Andererseits sind für das Phänomen der physischen Teilung und des Zerfalls der Protosterne bekannte Mechanismen nicht anwendbar, wodurch diese Frage noch weiter kompli-

ziert wird.

Die neue Vorstellung über die Natur des praestellaren Materiezustandes – die Protosternhypothese – soll sich nichtsdestoweniger als außerordentlich fruchtbringend erwiesen haben und hat wesentliche Vorzüge vor der klassischen Konzeption, die vom diffusen Zustand der Materie ausgeht, behaupten ihre Verfechter.

1.2.4. OFFENE FRAGEN UND AUSBLICKE

Wir haben nun versucht, die klassische Theorie der Sternevolution kurz darzustellen. Gleichzeitig war es jedoch notwendig, die Widersprüche, die sich aus der Protosternhypothese der Bjurakaner Schule ergeben, aufzuzeigen, da ja keine der Hypothesen widerspruchsfrei mit den Beobachtungsergebnissen übereinstimmt bzw. durch diese genügend Bestätigung erfahren.

Es soll im folgenden noch kurz das Wesentliche der beiden Auffassungen zusammengestellt werden: Die klassische Konzeption in der Kosmogonie geht von Prinzipien aus, die der Bjurakaner Richtung in einigen Fällen direkt widersprechen. Diese Prinzipien blieben jedoch nicht unverändert. Das geschah nicht zuletzt auch unter dem Einfluß der "Herausforderung" durch die Bjurakaner Konzeption.

Die wichtigsten Annahmen in den Theorien der klassischen Richtung sind folgende:

- 1.) Die JEANSsche Idee, daß Sterne und Sternsysteme aus diffuser Materie entstanden sind, gilt als einzig mögliche Grundlage einer Theorie. Dabei wird vorausgesetzt, daß sie aus dem vorhandenen Beobachtungsmaterial konkretisiert wird. (Steht im direkten Widerspruch zur Protosternhypothese und wird in der Bjurakaner Konzeption nicht erwähnt).
- 2.) Die Hauptenergiequelle der Sterne während des größten Teils ihres Lebens (mit Ausnahme des Anfangs- und Endstadiums der Entwicklung) sind thermonukleare Reaktionen der einen oder der anderen Art. Die Protosternhypothese sah besonders im Anfangsstadium eventuell Prozesse vor, die mit den seinerzeitigen physikalischen Erkenntnissen nicht erfaßbar waren. Der heutige Stand der Physik schließt allerdings Wechselwirkungen unbekannter Natur nahezu völlig aus.
- 3.) Alle Prozesse der Sternkosmogonie können mit den heute bekannten Grundgesetzen und Theorien erklärt werden, weil Sterne aus den gleichen Elementarteilchen bestehen, die auch im Labor untersucht werden. (Steht im krassen Widerspruch zur Protosternhypothese).

Diese Thesen bestimmen auch oft die Auswahl der Beobachtungsdaten. Dazu gehört von Anfang an besonders der Zusammenhang zwischen der räumlichen Verteilung der Gruppen junger Sterne und diffuser Nebel, ferner das HERTZSPRUNG-RUSSEL-Diagramm für Sterngruppen verschiedener Haufentypen.

- 4.) Instationäre Prozesse in Sterngruppen wurden zuerst nicht berücksichtigt, weil man sie für "anomale" Abweichungen vom "Standardweg" der klassischen Entwicklung hielt. (Direkter Widerspruch zur Bjurakaner Konzeption Punkt 6)

Mit anderen Worten, die klassische Sternkosmogonie ging anfangs von einem vollkommen anderen empirischen Material aus, als die Konzeption AMBARZUMJAN's. Man muß hinzufügen, daß man die Kondensation von Sternen und Sternsystemen aus einem verdünnten Gas-Staub-Medium in den zwanziger und dreißiger Jahren für so selbstverständlich hielt, daß nur vereinzelt versucht wurde, sie empirisch zu begründen.

Die These, daß nichtstationäre Erscheinungen nicht irgendeine Abweichung, sondern vielmehr eine gesetzmäßige Phase der kosmogonischen Entwicklung sind, erhielt in den letzten Jahren eine weitgehende Anerkennung.

Die Kritik an der Hypothese der Sternbildung aus diffuser Materie zwang die Vertreter der klassischen Richtung, die Hauptvoraussetzung ihrer Ansichten neu zu formulieren und in wesentlichen Postulaten abzuschwächen (Vergleich mit obigen Feststellungen).

1. Es existiert eine enge Verbindung zwischen jungen Sternen und Gas. In letzter Zeit wurden sogenannte Protosterne entdeckt; das sind Objekte, die sich im Kontraktionsstadium befinden. (Hat nichts mit der "Protosternhypothese" zu tun.)
2. Die Tatsache, daß sich die jungen Sternassoziationen nicht von der galaktischen Ebene entfernen, läßt vermuten, daß ein Magnetfeld sie festhält. Dies legt auch nahe, daß die Assoziationen aus Gas entstehen.
3. Wesentlich ist der gesamte Bau der Untersysteme unserer Galaxis. Die ältesten Objekte bilden sphärische Untersysteme, jüngere dagegen, abgeflachte. Vielleicht erkennen wir hier den Kontraktionsprozeß der Materie; die Sterne befinden sich jetzt in der Hauptsache in der galaktischen Ebene. Nur wenn Gas kinetische Energie verliert, kann es sich zusammenziehen. Zugunsten der Sternbildung aus Gas spricht auch die starke Konzentration der jungen Sterne in den Spiralarmen.
4. Die Änderung der chemischen Zusammensetzung der Sterne mit dem Alter läßt sich schwer erklären, wenn sie aus denselben Fragmenten dichter Körper entstanden wären und dieser Prozeß in einigen Fragmenten früher, in anderen aber später ablief.

Historisch gesehen, ging man in der ersten Entwicklungsetappe der klassischen Theorie davon aus, daß sich die Grundeigenschaften der Entstehungsprozesse von Sternsystemen und Sternen im Rahmen der mechanischen und hydrodynamischen Schemata erklären lassen. Aber alle diese Schemata stießen auf zahlreiche Schwierigkeiten und Widersprüche. Auch im Rahmen der relativistischen Astrophysik wurden Versuche unternommen, einige Stadien der Entwicklung von Sternen, Galaxienkernen und Quasaren zu erklären, wobei zwei verschiedene Konzeptionen entstanden.

Die zweite Konzeption (HOYLE, OORT, M. SCHWARZSCHILD, von WEIZSÄCKER, FOWLER, G., ferner E. BURBIDGE, M. SCHMIDT, SANDAGE, PIKELNER, OSERNOI und andere) erhielt die größte Anerkennung. Sie umfaßt als Theorie die Entstehung der Sterne und Sternsysteme aus verdünntem Gas, die Sternentwicklung und Synthese der chemischen Elemente im Kern der Sterne, die Herausbildung der verschiedenen Untersysteme in Galaxien. Gerade diese letzte Konzeption wird oft - zumindest in ihren Grundzügen - als gut begründet angesehen. Man betrachtet sie sogar als eine der wichtigsten Errungenschaften der modernen Astronomie und Astrophysik und im gewissen Sinne als ihr theoretisches Fundament.

AMBARZUMJAN und zum Teil auch andere Autoren erhoben gegen diese Theorie eine Reihe kritischer Einwände (wobei Punkt 2. durch neueste Erkenntnisse bereits hinfällig wurde) und zwar:

1. Weil in den klassischen Theorien von Anfang an die Konstruktion von Modellen eine große Rolle spielt, nannte AMBARZUMJAN den gesamten klassischen Zugang manchmal "Modellmethode", im Gegensatz zur Bjurakaner "Beobachtungsmethode".
2. Die Erkenntnis der thermonuklearen Energiequellen der Sterne, denen die Gravitationskontraktion der diffusen Materie vorausgeht, ist kein Postulat mehr, wie von AMBARZUMJAN und anderen behauptet wurde, da diese Erkenntnisse in Beschleunigerexperimenten nachvollzogen werden konnten.
3. Diese Theorie von der Entstehung der Sterne und Sternsysteme aus diffuser Materie ist nicht nur ungenügend empirisch bestätigt, sondern viele Fakten widersprechen ihr auch.

4. Die Schöpfer dieser Theorien kommen in ihrem Bestreben, sofort auf alle Grundfragen der Sternkosmogonie eine Antwort zu finden, zu s p e k u l a t i v e n T h e o r i e n , die sich auf vorgefaßte Hypothesen stützen.
5. Sternentstehungsprozesse scheinen auch noch in Gebieten anzudauern, wo keine merklichen Gasmengen existieren.
6. Und schließlich ein sehr wichtiger Einwand, der jede naturwissenschaftliche Theorie erschüttert: Es gibt keine Vorhersage irgendwelcher wesentlicher Erscheinungen, die vor dem Aufstellen der Theorie nicht bekannt gewesen wären. Das betrifft sogar den am besten ausgearbeiteten Aspekt der Theorie, der mit den Beobachtungen korrespondiert: die Sternentwicklung.

AMBARZUMJAN faßt zusammen:

1. Seine Hypothese beruhe auf empirischen Komponenten, welche ein anderes - sprich höheres - Gewicht hätten als die theoretischen Komponenten der klassischen Methode.
2. Die Logik beim Aufstellen der Theorien der beiden Richtungen wären verschieden. Beide Richtungen verwenden zwar induktive wie deduktive Methoden, jedoch kann man verschiedene ausschlaggebende Tendenzen wahrnehmen und zwar:
 - 2.1 In den klassischen Theorien wird die spekulative Idee später empirisch bestätigt (was übrigens in der Naturwissenschaft gang und gäbe ist).
 - 2.2 Die Bjurakaner Richtung geht den umgekehrten Weg. Sie ist z.B. bestrebt, die Fragen zu klären, woraus kosmische Objekte gebildet wurden, ohne sie im voraus mit Hypothesen zu verknüpfen (?)
3. Die Forschungsniveaus wären verschieden, ein großer Teil der klassischen Arbeiten gehört zum theoretischen Niveau, d.h., daß man Modelle und Schemata betrachtet, die man rekonstruieren will (siehe Modellrechnung bei Sternen).

AMBARZUMJAN gibt jedoch zu, daß er selbst keine geschlossene Theorie vorschlägt, sondern vielmehr eine "halbempirische" Konzeption wünscht, die ständig auf der Grundlage neuer Beobachtungen weiterentwickelt und verbessert werden muß, gewissermaßen ein Forschungs-Iterationssystem.

Die wesentlichen Schlußfolgerungen der BJURAKANER KONZEPTION sind daher die nachstehenden:

- 1.) Sterne entstehen gemeinsam in Gruppen. (Durch die JEANSSche Instabilität ist ein Aufbrechen in Gruppen gegeben, allerdings in zu große Gruppen.)
- 2.) Der Prozeß der Sternentstehung in unserer Galaxis begann vor einigen Milliarden Jahren und dauert heute noch an (Übereinstimmung).
- 3.) Die Sternentstehungsherde sind im jetzigen Stadium unserer Galaxis die Sternassoziationen (fehlt in der alten klassischen Theorie).
- 4.) Viele Sternassoziationen sind nicht stationär, sie zerfallen relativ rasch (ist durch die Statistische Mechanik bereits seit den vierziger Jahren erhärtet).
- 5.) Nicht alle Sterne der Assoziationen entstehen gleichzeitig; Trapezsyste und Sternketten in Assoziationen sind besonders jung (fehlt in der klassischen Theorie).
- 6.) Die Anfangsstadien der Sternentwicklung werden durch eine aufflackernde Aktivität charakterisiert. (Instabilität!) (wurde in der klassischen Theorie als Anomalie in der Sternevolution bezeichnet).
- 7.) Sternuntersysteme entwickeln sich unabhängig voneinander (fehlt in der alten klassischen Theorie).

DIE KOSMOGONIE AUF DER SUCHE NACH DER THEORIE

Die Kosmogonie geht jetzt vorwiegend von der alten, zum großen Teil spekulativen Lösungsmethode zur Analyse und Verallgemeinerung der Beobachtungsdaten über. Sie durchlebt die Epoche des "anfänglichen Sammelns" von Fakten, die in keiner Wissenschaft ausgelassen werden darf. Erst dann entsteht ein strenges System von begründeten theoretischen Vorstellungen.

Wir verfügen bereits über viele Fakten für die verschiedenen Phasen der kosmogonischen Prozesse. Diese Fakten erlauben es uns bereits, sehr nahe (in einigen Fällen buchstäblich "dicht") an die Lösung des schwierigsten Problems heranzugehen, nämlich, an die Frage nach der physikalischen Natur der "Protomaterie", aus der sich die verschiedenen Generationen von kosmischen Objekten bilden. Aber es gelang bisher noch nicht, den Prozeß der Galaxien- oder Sternentstehung unmittelbar zu beobachten.

Einerseits hat noch niemand mit Sicherheit den Kondensationsprozeß von diffuser Materie zu dichten kosmischen Körpern und Systemen beobachtet. Oft entstand der Eindruck, daß die Verdichtung von verdünntem Gas zu Sternen eine empirische Tatsache geworden sei. Aber bei genauer Untersuchung solcher Fakten zeigte sich immer, daß dem nicht so ist. Andererseits sind auch keine Fakten bekannt, die einer solchen Vorstellung direkt widersprechen.

Aber die Beobachtungen liefern immer mehr Fakten, die gerade für das Vorherrschen der entgegengesetzten Prozesse sprechen: Zerstreuung, Desintegration, Zerfall und Explosionen. Das führte zur Konzeption von den massiven und dichten Protokörpern, deren Natur uns noch unbekannt ist. Bisher gelang es auch noch nicht, solche Objekte direkt zu entdecken.

Wir werden am Ende des nächsten Kapitels nochmals auf die heutigen Probleme der Kosmogonie, auf der Suche nach neuen Theorien, zu sprechen kommen.

2. PROBLEME DER GALAXIENENTWICKLUNG [1]

In diesem Kapitel bin ich bemüht, in gebotener Kürze, die neueren Erkenntnisse über die Kosmogonie der Galaxien mitzuteilen. Ich möchte dabei über statistische Daten wie Einteilung, Distanzen, Leuchtkräfte, Quantitätsfeststellung etc. nur ganz kurze Angaben machen.

In den letzten Jahren sind besonders die Aktivitäten in Galaxienkernen im Mittelpunkt der Forschungsprogramme gestanden. Hier haben sich vor allem AMBARZUMJAN und sein Mitarbeiterstab besondere Verdienste erworben. Man kann vielleicht die Bjurakaner Schule als Urheber einer geschlossenen Galaxienkosmogonie bezeichnen. Zweifelsfrei sind noch eine Reihe von Problemen ungelöst, dennoch ist gerade in den letzten Jahren durch Vergrößerung der Öffnung des "elektromagnetischen Fensters" eine Fülle neuer Informationen zugänglich geworden. Es seien hier vor allem die UV- Röntgen- und Infrarot-Astronomie genannt. Durch weitere Verbesserungen der Antennen einerseits und durch vermehrten Einsatz von Satelliten andererseits sind in nächster Zukunft besonders aufschlußreiche Beobachtungsergebnisse zu erwarten.

In der umfangreichen Geschichte der Galaxienforschung seien nur drei Namen genannt: 1750 hat TH. WRIGHT und 1755 I. KANT den Begriff von entfernten Sternsystemen, also Galaxien, in die Vorstellungswelt des Abendlandes eingeführt. 1850 schuf HUMBOLDT den Begriff der "Sterninseln" im Raum des Alls.

Eine entscheidende Wende in der Galaxienforschung setzte 1918 ein, als auf dem Mt.

Wilson der 100 Zoll (= 254 cm) Reflektor in Betrieb genommen wurde, an dem E.P. HUBBLE seine Erforschung der extragalaktischen Welt aufnahm. Der Name HUBBLE ist mit der Galaxienforschung deshalb so eng verknüpft, weil er es war, der die bis dahin unbewiesenen Vermutungen, daß Galaxien aus Milliarden von Sternen bestehen, experimentell bestätigt hat. Immer wieder wird in diesem Kapitel der Name Edwin HUBBLE genannt werden:

Im Jahre 1927 wurde unter anderem von E. HUBBLE ein Vorschlag zur Klassifikation der Galaxien gemacht, der bis heute die Grundlage verschiedener Systeme bildet, die allesamt nur weitere Parameter zu den "klassischen" HUBBLEschen Grundformen einführen.

Nach der Klassifikation von HUBBLE teilt man die Galaxien in drei Grundtypen ein: elliptische (E), spiralförmige (S) und unregelmäßige oder irreguläre (I).

Die Spiralsysteme und die elliptischen Galaxien unterteilt HUBBLE in Unterklassen. Bei den Spiralgalaxien entsprechen die Unterklassen im wesentlichen dem verschiedenen Ausbildungsgrad der Spiralarme. Galaxien mit schwach ausgebildeten Armen werden der Klasse Sa zugeordnet, solche mit sehr stark entwickelten und offenen Armen der Klasse Sc, während die Klasse Sb (Milchstraße) eine Zwischenstellung einnimmt. Beim Übergang Sa - Sb - Sc nimmt auch die Ausdehnung der zentralen Verdichtung (bulge) der Galaxien immer mehr ab.

Es gibt eine besondere Art von Spiralgalaxien, bei denen die Spiralarme nicht im Zentrum beginnen, wie bei den normalen Spiralen, sondern an den Enden eines aus Sternen bestehenden zentralen "Balkens". Das sind die sogenannten Balkenspiralen (SB), deren Unterklassen in Analogie zu den gewöhnlichen Spiralen mit SBa, SBb und SBc bezeichnet werden. Die Anzahl dieser Galaxien ist relativ gering.

Die Klasseneinteilung der elliptischen Galaxien geschieht nach ihrer Abplattung. Die am wenigsten abgeplatteten, elliptischen Galaxien entsprechen der Klasse E0 und besitzen nahezu Kugelgestalt, die am stärksten abgeplatteten der Klasse E7.

Später wurde noch eine Klasse S0 eingeführt, für Galaxien, die noch stärker abgeplattet sind als E7 und eine deutliche zentrale Verdichtung besitzen, aber keine Spiralarme.

Die TAFEL 6 zeigt schematisch die Folge der Galaxientypen nach HUBBLE.

Die angeführte Klassifikation der Galaxienformen ist ziemlich grob; eine detailliertere Klassifikation erarbeitete in letzter Zeit DE VAUCOULEURS [1/59]. Aber auch die ausführlichste Klassifikation erschöpft nicht die Vielfalt der Galaxienformen, die im Weltall beobachtet werden.

Eine neue Klassifikation der Galaxienformen, in der versucht wurde, eine möglichst enge Korrelation zu der Sternpopulation des inneren hellen Teiles der Galaxie zu erreichen, erarbeitete MORGAN 1958, indem er von integralen Galaxienspektren ausging, die er gemeinsam mit MAYALL untersucht hatte. Als Hauptkriterium dient der Grad der Helligkeitskonzentration im Zentrum der Galaxien. Zu den Grundtypen der HUBBLEschen Klassifikation - Spiralen, Balkenspiralen, Ellipsen und Irreguläre - kommen in der MORGANschen Klassifikation vier neue: elliptische Systeme mit deutlicher Extinktion (Ep), rotationssymmetrische Systeme ohne deutlich ausgeprägte spiralförmige oder elliptische Struktur (D), Systeme mit geringer Oberflächenhelligkeit (L) und Systeme, die kleine helle Kerne auf einem wesentlich schwächeren Hintergrund zeigen (N). Zum TYP D gehören auch Galaxien ohne Spiralstruktur mit symmetrischer Verteilung der absorbierenden Staubwolken. Die Untertypen entsprechen den verschiedenen Konzentrationsgraden der Helligkeit. Für das weitere sind hievon die N-Galaxien wichtig. Dieses neuere System ist als "Yerkes-System" weit verbreitet.

Eine große Vielfalt beobachtet man auch in den Dimensionen, den Leuchtkräften und den Massen der Galaxien. Während in den Zwerggalaxien die Zahl der Sterne von der Größen-

ordnung einer Million ist (in einer von ZWICKY im Steinbock gefundenen Galaxie sogar unter 100 000), befinden sich in unserer Galaxis mehr als 100 Milliarden, und in der uns nächsten Überriesengalaxie, dem Andromedanebel, mehr als 400 Milliarden Sterne. Die Zahl der Sterne in den größten Galaxien ist also millionenfach größer als in Zwerggalaxien.

Überriesengalaxien haben eine um das Hunderttausend- und sogar Millionenfache höhere Leuchtkraft als Zwerg- und Unterzwerggalaxien. Von etwa der gleichen Größenordnung sind auch die mittleren Massen der Galaxien.

Stark unterschiedlich sind auch die Durchmesser der Galaxien; sie liegen zwischen einigen 100 Parsec und einigen 10 000 Parsec. Die Zahl der Galaxien mit niedrigen Leuchtkräften ist wesentlich größer als jene mit hohen Leuchtkräften.

Später wurde deutlich, daß sich alle "Radiostrahler" von den sogenannten normalen Galaxien beginnend, über Radiogalaxien bis zu den Quasaren, in eine deutliche Sequenz, entsprechend ihrer Radioleuchtkraft einordnen lassen, wobei das Yerkes-System sehr nützlich ist.

Unter der Wirkung des Gravitationsfeldes aller übrigen Sterne einer Galaxie bewegt sich jeder Stern um den Schwerpunkt des gesamten Systems. Der Einfluß der Gravitation benachbarter Galaxien führt nur zu geringen Störungen dieser Bewegungen, da die gegenseitigen Abstände der Galaxien ihre linearen Abmessungen wesentlich übersteigen. Die Zahl der Sterne im intergalaktischen Raume ist verschwindend klein.

Dennoch haben die Amerikaner A. und J. TOOMRE (MIT, Cambridge USA) die gegenseitige Beeinflussung von einander passierender Galaxien mit sehr leistungsfähigen Rechenanlagen genau untersucht. Die folgende Abbildungsreihe zeigt, was geschieht, wenn z.B. zwei unterschiedlich massereiche Galaxien einander begegnen: Die Bahn der kleineren Galaxie ist unter 45° zur galaktischen Ebene der größeren Galaxie geneigt. Zur Zeit der größten Annäherung, Abb. 2.1 (0.0) sind beide Systeme immer noch räumlich ziemlich weit getrennt und die Verbindungslinie der beiden Massenzentren liegt soweit als möglich außerhalb der Rotationsebenen der beiden Systeme. Man sieht, wie sich aus den vor der Passage runden Scheiben deutliche Spiralen formen.

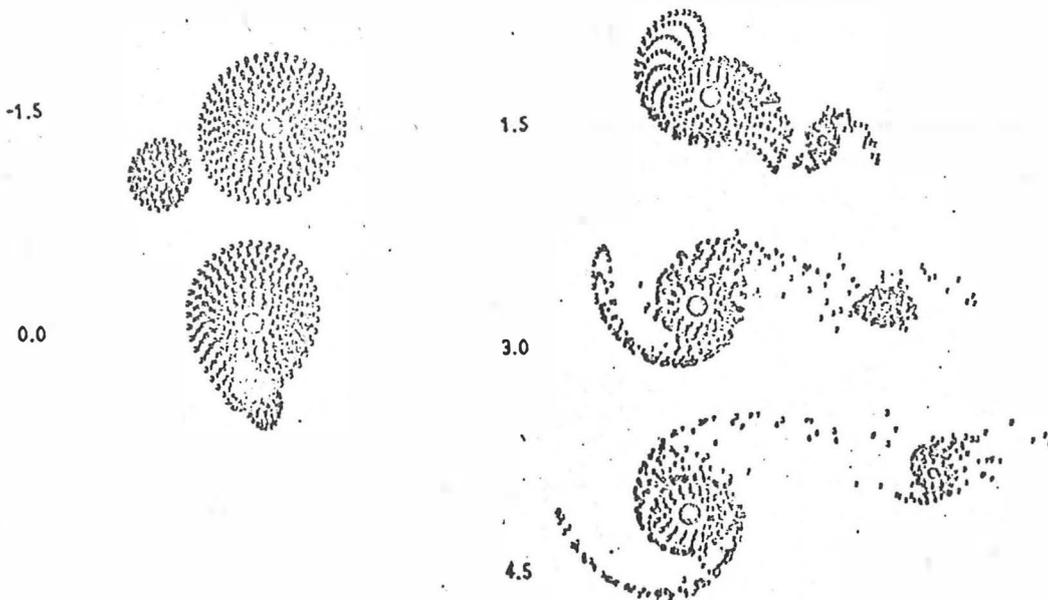


Abb. 2.1

Die Tafel 7 zeigt Galaxien, die offenbar in „Wechselwirkung“ stehen, wobei allerdings keine Kollision (Tafel 7 oben) sondern eine Teilung stattfindet.

FORMEN UND KLASSEN DER GALAXIEN

Elliptische Galaxien

E0 Typ (kugelf.) E7 Typ (durch Rotation abgeplattet)

Sa-Typ

Sb-Typ

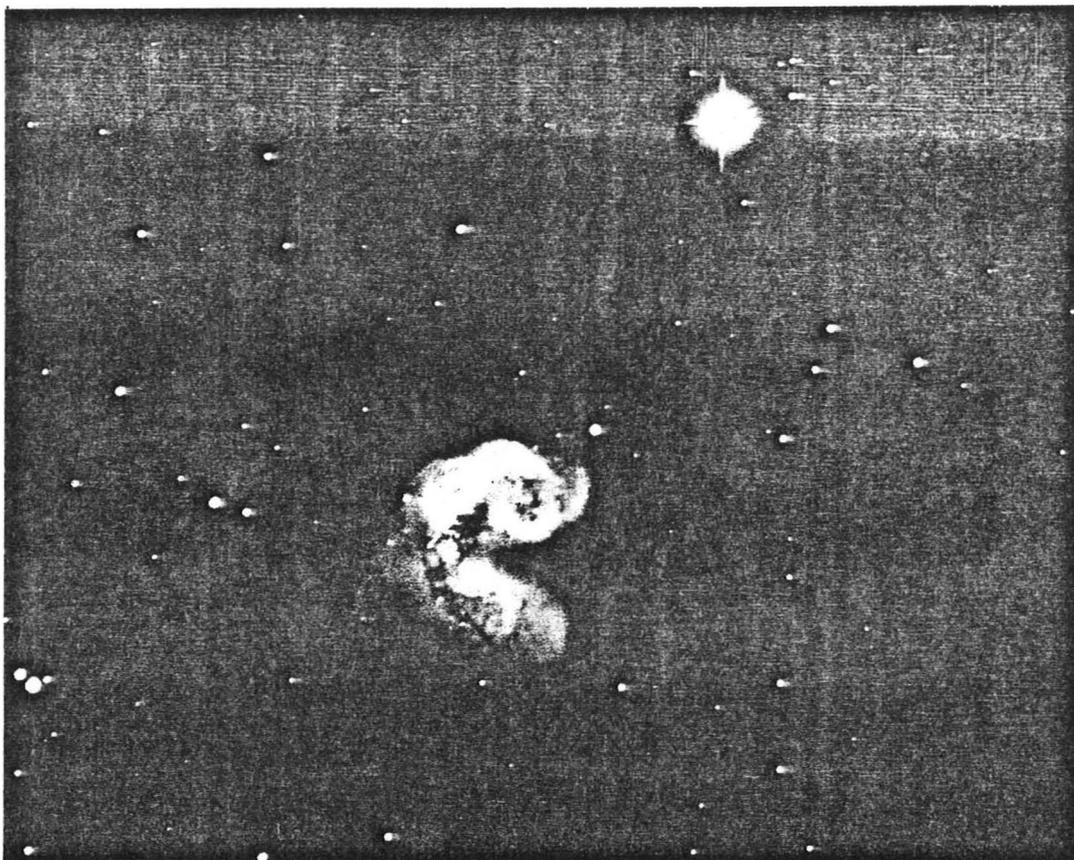
Sc-Typ

Spiral-Galaxien

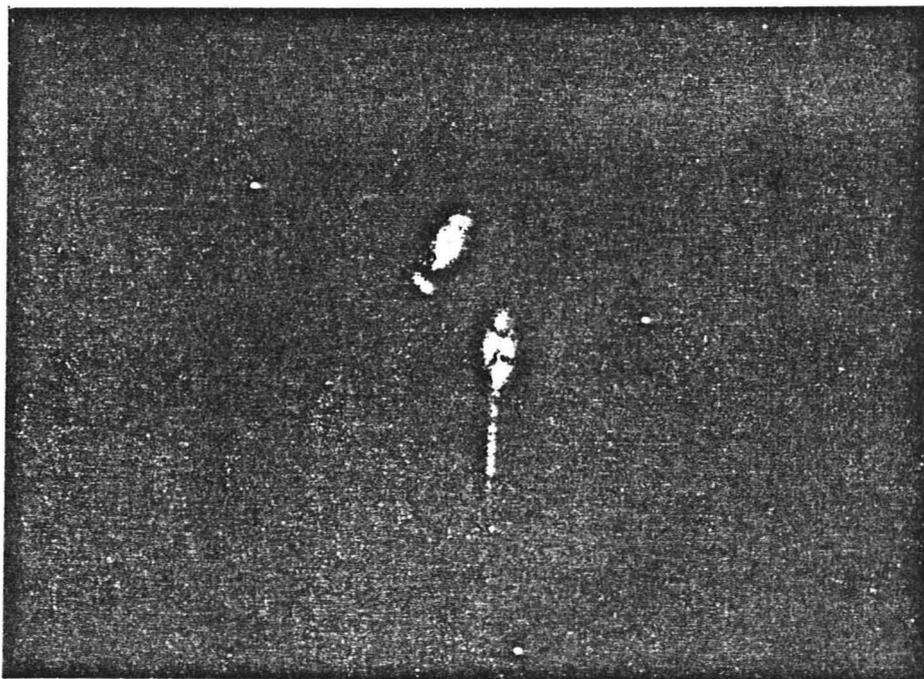
Balkenspirale

Irreguläre Nebel

Drei Galaxien im Leo und zwar:
links oben: elliptische Galaxie NGC 3193
mitte: Spiral-Galaxie NGC 3190
rechts: Balkenspirale NGC 3187



Die beiden Galaxien NGC 4038 und 4039 emittieren 100x mehr Radioenergie als eine normale Galaxie. Offenbar sehen wir hier den Beginn einer Aufsplitterung (eine Kollision ist auszuschließen)



2 Galaxien, die offenbar aus demselben Kern entstammen und sich bereits voneinander weiter entfernt haben.

Sehr verschiedenartig sind die Galaxien auch in ihrem Gehalt an diffuser Materie. Die Menge der diffusen (gasförmigen) Materie in unserer Galaxis beträgt vermutlich etwa 2 Prozent der Gesamtmasse. Noch geringer ist der relative Gehalt an diffuser Materie im Andromedanebel. Es gibt jedoch Galaxien mit einem wesentlich größeren relativen Gehalt an diffuser Materie. So umfaßt z.B. in den benachbarten Begleitern unserer Galaxis, den Magellanschen Wolken, die Gesamtmasse der diffusen Materie etwa 10 Prozent der Gesamtmasse dieser Systeme, vielleicht sogar mehr. Allein die Masse des riesigen Nebels 30 Doradus in der großen Magellanschen Wolke beträgt etwa 10 Millionen Sonnenmassen. Derartig große Nebel gibt es in unserer Galaxis nicht.

Es gibt jedoch viele Galaxien, in denen der relative Gehalt an diffuser Materie verschwindend gering ist. In elliptischen Galaxien fehlt z.B. diffuse Materie nach allen vorliegenden Daten fast völlig.

BAADE und SPITZER nahmen an, daß für das Fehlen von diffuser Materie in SO-Galaxien, die hauptsächlich in reichen Galaxienhaufen vorkommen, Zusammenstöße der Galaxien verantwortlich sind, wobei das in ihnen enthaltene Gas in den intergalaktischen Raum getrieben wird.

Wir wollen im folgenden auf die eigentlichen Probleme der Galaxienentwicklung eingehen.

2.1. KURZER ÜBERBLICK ÜBER DIE EXISTIERENDEN HYPOTHESEN

Im Jahre 1919 stellt JEANS eine Hypothese über die Entstehung von Galaxien unter Benützung der LA PLACEschen Idee einer kondensierenden Gaswolke und deren Zerfall auf. JEANS ging davon aus, daß die Galaxien durch Kondensation eines verdünnten, den Raum ausfüllenden Gases gebildet werden. Das Ergebnis dieses Verdichtungsprozesses ist zunächst eine riesige, rotierende Gaswolke, die im Laufe des Kondensationsvorganges ihre Rotation vergrößert und sich abplattet. Aufgrund der wachsenden Dichte und der Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit beginnt ein Ausströmen von Materie aus der Äquatorregion der Kondensation, in der nach weiterem Zerfall in kleinere Verdichtungen später Sterne entstehen. JEANS nahm also an, daß die Kerne der Galaxien Gas und Sterne, die sich aus diesem Gas bilden, enthalten, daß sich aber die Spiralarme aus Verdichtungen formieren, die aus dem Kern herausgeworfen werden. Während ihrer Entwicklung verliert die Galaxie allmählich ihre ursprüngliche Gestalt und geht in das Stadium einer irregulären Galaxie über.

JEANS betrachtete die elliptischen Galaxien als Systeme, die völlig aus Gas bestehen, und stellte sich einen Entwicklungsweg für Galaxien in folgender Richtung vor:

elliptische - spiralförmige - irreguläre.

Nach JEANS' bestätigt die unterschiedlich starke Konzentration von diffuser Materie bei elliptischen und spiralförmigen Galaxien dieses Entwicklungsschema.

Die modernen astrophysikalischen Beobachtungsdaten veranlaßten jedoch die Astronomen, die JEANSsche Hypothese abzulehnen. Es zeigte sich nämlich, daß die elliptischen Galaxien aus Sternen bestehen und praktisch keine diffuse Materie enthalten. Auch die zentralen Kondensationen der spiralförmigen Galaxien besitzen eine stellare Komponente; die kleineren Verdichtungen, die die Spiralarme bilden, stellen Ansammlungen heißer Sterne dar.

Man kann jedoch auch gegenwärtig nicht gänzlich die Bedeutung des JEANSschen Schemas für die Entwicklung der Galaxien verneinen. Ernste Diskrepanzen existieren allerdings über die Richtung dieser Entwicklung.

In seiner Hypothese nimmt von WEIZSÄCKER an, daß das der Entstehung der Sterne

und Sternsysteme vorausgehende Stadium durch einen chaotischen Zustand der diffusen, stark turbulenten gasförmigen Materie gekennzeichnet ist.

Die Bildung der Galaxien beginnt unter dem Einfluß großräumiger, turbulenter Wirbel, die im Urgas entstehen. Die sich herauskristallisierenden gewaltigen turbulenten Wolken flachen allmählich ab und verwandeln sich zu spiralförmigen Galaxien mit zentralem Kern. Während der weiteren Entwicklung dieser Systeme lösen sich die Spiralarme auf; es beginnt das "elliptische" Stadium. Die Bildung von Sternen in den Galaxien erfolgte nur in der Anfangsepoche, als das Gas kalt war, d.h., ursprünglich gab es im System keine Sterne. Andererseits erhitzen die entstehenden Sterne die diffuse Materie, und allmählich hört der Bildungsprozeß von Sternen auf. Davon ausgehend, gelangt von WEIZSÄCKER zu dem Schluß, daß alle Sterne und Sternsysteme gleichzeitig in entfernter Vergangenheit entstanden und daß die Formen der Galaxien sich unverändert bis in die Gegenwart erhalten haben.

Die Hypothese von OORT trägt einen anderen Charakter als die bisher erwähnten Hypothesen über die Entwicklung der Galaxien, weil er die verschiedenen Formen der Galaxien nicht als aufeinanderfolgende Entwicklungsstadien betrachtet, sondern sie als das Ergebnis unterschiedlicher Anfangsbedingungen während der Entstehungsphase der Galaxien ansieht. Er nimmt an, daß die "Protogalaxie" aufgrund der Wechselwirkung zwischen den Materieströmungen, die in der Urgaswolke existieren, in Rotation kommt, wobei das Gas zu Sternen kondensiert. In Abhängigkeit von der Größe der Gesamtdrehimpulse wandelt sich die "Protogalaxie" in eine Galaxie eines bestimmten Typs um, und zwar bei hinreichend großem Anfangsdrehimpuls in eine spiralförmige, bei kleinem Anfangsdrehimpuls in eine elliptische Galaxie. Im letzten Fall findet ein ungeordneter Verdichtungsprozeß des gasförmigen Materials statt, wobei das gesamte Gas zu Sternen kondensiert. Dagegen verläuft bei rascher Rotation wegen der großen Zentrifugalkraft das Verdichtete der Materie lokal geordnet; infolgedessen verbleibt in der betreffenden Galaxie, insbesondere in ihren äußeren Regionen, eine beträchtliche Menge diffuser Materie. Wenn der Drehimpuls jedoch so groß ist, daß die Gravitationskräfte einer Galaxie die Materie nicht halten können, kann es zu Materieabtrennung kommen, die vielleicht ein Aussehen wie die irregulären Galaxien erhalten können; als Beispiel hiefür sei die kleine Magellansche Wolke angeführt. Es existieren noch eine Reihe weiterer Theorien, aber keine einzige all dieser Hypothesen hält den Beobachtungsergebnissen der letzten Jahrzehnte stand. Wir wollen daher im folgenden sehen, inwieweit man die Beobachtungen in Übereinstimmung mit etwa neuen Hypothesen bringen kann.

2.2. ÜBER DIE KERNE DER GALAXIEN

DYNAMISCHE INSTABILITÄT BEI GALAXIEN

Aus der Fülle von Veröffentlichungen, die AMBARZUMJAN in den letzten 20 Jahren publiziert hat, behandelt er die Probleme der Entstehung und Entwicklung von Galaxien auf eine neue Art, indem er die Fülle der realen Informationen, die die moderne Wissenschaft über die Galaxien erhalten und aufgesammelt hat, analysiert. Dabei konzentrierte er sich vor allem auf jene Daten, die eine Analogie zu stellaren Verhältnissen aufweisen und die bereits zu bedeutenden Ergebnissen für die Kosmogonie der Sterne geführt haben.

Immer wieder wurde dabei auf die Instabilität in Mehrfachsystemen hingewiesen, die eine entscheidende Rolle bei der Sternentwicklung gespielt haben. Bei der Überprüfung der Betrachtungen von Galaxien zeigt es sich, daß hier dynamische und physische Instabilität in großem Ausmaß höchst charakteristische Erscheinungen sind. Mehrfachsysteme, etwa Galaxien-Trapezsysteme, ein Analogon zum Sterntrapezsystem, haben nur ein Alter von einigen Galaxienumläufen, also einigen 10^9 Jahren. Viele Beobachtungsbefunde deuten darauf hin, daß einige Mehrfachsysteme und Galaxienhaufen eine positive Gesamtenergie besitzen, d.h., daß sie instabile Systeme darstellen. Praktische Messungen (Rotver-

verschiebung) haben die Auflösung einiger Systeme nachweisen können.

Die Daten über die dynamische Instabilität vieler Mehrfachsysteme von Galaxien und die starke Abweichung vom dissoziativen Gleichgewicht bei Doppel- und insbesondere bei Dreifachgalaxien (der prozentuelle Anteil an Doppel- und Dreifachgalaxien übertrifft um ein Mehrfaches den bei dissoziativem Gleichgewicht zu erwartenden) führten zu der Schlußfolgerung, daß die Galaxien der Mehrfachsysteme und Galaxienhaufen zusammen entstanden sind.

Schließlich bildete sich auf der Basis aller dieser Vorstellungen die prinzipiell wichtige Erkenntnis, daß auch in unserer Epoche neue Galaxien in der Metagalaxis entstehen.

AMBARZUMJAN ging von der Tatsache aus, daß instabile Galaxiensysteme (also Systeme mit positiver Gesamtenergie) existieren. Ferner nahm er an, daß ähnliche Überlegungen auf sie zutreffen, wie sie bereits bei stellaren Systemen angestellt wurden. Er kam zu dem Schluß, daß sich Galaxien und Galaxiensysteme aus massiven Körpern nichtstello- larer Natur und kleiner Ausdehnung (mit Durchmessern von der Größenordnung Parsec) gebildet haben. ¹⁾

Es ist eine Alternative zu dieser Hypothese möglich: nämlich die Bildung der Galaxien- systeme aus einer einheitlichen amorphen Masse, die einen Durchmesser von der Größen- ordnung einiger tausend Parsec besitzt (das ist der Durchmesser einer Galaxie mitt- lerer Größe). Jedoch gibt es gegenwärtig nicht genügend Beobachtungsmaterial für die Begründung dieser Alternative.

Die Mehrzahl der beobachteten elliptischen und spiralförmigen Galaxien hat neben den für die Struktur des jeweiligen Typs charakteristischen Details (Spiralar- me, Stern- assoziationen und -haufen usw.) ziemlich scharf abgegrenzte zentrale Verdichtungen, die in das allgemeine Sternfeld eingebettet sind. Diese Verdichtungen nennt man die Kerne der Galaxien. Sie besitzen eine unvergleichlich größere Sterndichte als die Galaxien selbst, und ihre Durchmesser sind etwa ein hundertstel der der jeweiligen Ga- laxie. Auch hinsichtlich der Helligkeit gibt es zwischen Kern und Galaxie beträcht- liche Unterschiede. Zum Beispiel ist für den Andromedanebel die Helligkeit des Kerns nur einige zehntausendstel des gesamten Nebels, dagegen hat der Begleiter des Andromedanebels, die Galaxie M 32, eine Kernhelligkeit, die immerhin ein hundertstel der Gesamthelligkeit von M 32 beträgt.

Viele irreguläre Galaxien, darunter die Magellanschen Wolken, haben keine erkennbaren Kerne. Auch bei elliptischen Galaxien mäßiger Helligkeit und bei Zwerggalaxien fand man keine Kerne. Der Versuch, den Kern unserer Milchstraße zu erforschen, ist mit Ausnahme von Radiostrahlung in allen anderen Frequenzen bisher nicht gelungen. Die interstellaren Staubmassen in der galaktischen Ebene verwehren den Einblick in diese Region, sogar die Versuche im nahen Infrarot blieben erfolglos. Im Radiobereich konnte eine intensive Quelle gefunden werden, die offenbar mit dem Kern unserer Galaxis in Verbindung steht. Diese Strahlung hat 2 Komponenten, eine thermische aus der Kern- region und eine nichtthermische aus einer um 2 Größenordnungen größeren Region. AMBARZUMJAN ist der Meinung, daß bei den Galaxienkernen neben Sternen und diffuser Materie auch Körper "unbekannter Natur"²⁾ existieren, welche eine wichtige Rolle in der Entwicklung der betreffenden Galaxien spielen. Dies war für ihn der Anlaß, eine neue Galaxienkosmogonie, die auf der Aktivität der Kerne beruht, zu entwickeln.

¹⁾ Es ist hierbei zu bedenken, daß die Milchstraße etwa 30 000 Parsec mißt.

²⁾ Subjektive Meinung AMBARZUMJANs.

2.3. RADIOGALAXIEN

Nachdem BAADE und MINOWSKY 1952 einige starke Quellen kosmischer Radiostrahlung mit Galaxien identifizieren konnten - es handelt sich hierbei u.a. um die Radioquelle FORNAX A mit der Galaxie NGC 1316 - äußerte AMBARZUMJAN 1954 die Vorstellung von der kosmogonischen Aktivität der Kerne von Galaxien. Diese Identifizierungen waren im wesentlichen gleichbedeutend mit der Entdeckung der Radiogalaxien, einer neuen Klasse von Galaxien mit sehr intensiver Radiostrahlung.

Nach BAADE und MINOWSKI verursachen Zusammenstöße von Galaxien das Auftreten der starken Radiostrahlung; sie stützen ihre Vorstellungen vor allem auf die beobachteten Doppelstrukturen einiger Radiogalaxien. Diese Kollisionshypothese war theoretisch von dem sowjetischen Wissenschaftler SHKLOWSKY ausgearbeitet und von vielen anderen befürwortet worden. Jedoch konnte AMBARZUMJAN wenig später zeigen, daß diese Hypothese mit vielen Fakten im Widerspruch steht. Er unterbreitete eine neue, auf der kosmogonischen Aktivität der Galaxienkerne basierende Interpretation für die Existenz dieser intensiven Radiostrahlung.

Die Wahrscheinlichkeit eines Zusammenstoßes zweier Galaxien in der Metagalaxis ist äußerst gering, und sie ist noch geringer, wenn es sich um Riesen- und - wie bei den Radiogalaxien um Überriesengalaxien handelt.

Tabelle 2.2. Optische Helligkeiten von Radiogalaxien 1/324

Quelle	Radialgeschwindigkeiten für die Hubble Konstante:		m	M _{ph}	D Mpc	D 10 ⁶ L.J
	H = 75 km/sec Mpc	H = 55 km/sec Mpc				
Cygnus A	17 098 km/sec	12 540 km/sec	14,8	-22,0	228	743
Perseus A	5 293	3 883	11,7	-22,4	70,6	230
Centaurus A	261	192	6,1	-21,6	3,5	11
Virgo A	1 218	880	9,6	-21,4	16	52
Fornax A	1 728	1 265	9,7	-22,1	23	75

$$\log D_{pc} = \frac{m_i - M_{ph}}{5} + 1; D.H = v \quad \text{Mittel} \quad - 21,9 \pm 0,2$$

- D ... Distanz in pc
- H ... Hubble Konstante in km/sec·Mpc
- m ... scheinbare Helligkeit
- M_{ph} ... wahre Helligkeit
- v ... Fluchtgeschwindigkeit, bezogen auf die Erde

Die Zahlenwerte in obiger Tabelle 2.2. mit H = 75 km/sec Mpc - besser wäre 55 km/sec Mpc zeigen, daß die Radiogalaxien in der Tat Überriesengalaxien sind. Ihre Helligkeiten übersteigen sowohl die unserer Galaxis als auch die von M 31 (M_{ph} = - 21.^m1 Andromedagalaxis). Deshalb ist es berechtigt anzunehmen, daß die große Häufigkeit der Radiogalaxien die Interpretationsmöglichkeit als kollidierende Galaxien ausschließt. Jedoch zeigt sich auf Fotografien, die mit dem 5-m-Teleskop des Palomar Observatoriums gewonnen wurden, daß etwa 80% der Radiogalaxien offensichtlich Merkmale einer Doppelnatur besitzen. Zum Beispiel sind auf der Aufnahme der Radiogalaxie Cygnus A (TAFEL 8) deutlich zwei Kerne zu erkennen. Im Spektrum dieser Radiogalaxie werden Emissionslinien beobachtet, in denen fallweise über 50% ihrer optischen Strahlung konzentriert ist. Seit 1966 sind bei 75% der beobachteten Radiogalaxien derartige Emissions-

linien gefunden worden. Das Radiobild dieser Galaxien unterscheidet sich erheblich von ihrem optischen; es besteht aus zwei ausgedehnten Radioemissionsgebieten, zwischen denen sich das optische Bild dieser Galaxie befindet (Abb. 2.3)

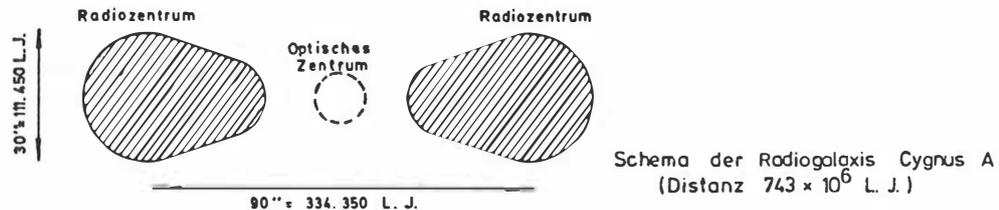


Abb. 2.3

Merkmale einer Doppelnatur werden auch bei den Radiogalaxien Perseus A (NGC 1275) und Centaurus A (NGC 5128; siehe dazu die TAFEL 9a) beobachtet.

Diese interessante Tatsache von der Doppelnatur der Radiogalaxien wird entsprechend der Konzeption von der Aktivität der Kerne entweder auf eine Teilung des Mutterkernes (TAFEL 8) oder auf das Herausschleudern großer Materiekondensationen aus den ursprünglichen Kernen zurückgeführt. Das bedeutet, daß man erstens die Radiogalaxien als extrem enge Doppelsysteme ansieht, die vor relativ kurzer Zeit aufgrund der Aktivität der Kerne entstanden sind, und daß man zweitens die Radiostrahlung dieser Galaxien auf turbulente physikalische Vorgänge zurückführt, die mit der Entwicklung dieser Systeme im Zusammenhang stehen.

Für diese neuen Vorstellungen spricht überzeugend auch das Beispiel der Radiogalaxie Virgo A (NGC 4486-M 87). Von dem zentralen Kern dieser Galaxie geht ein Materiestrahl aus (6 000 L.J. lang), der drei Verdichtungen mit starker Radioemission aufweist (TAFEL 9).

Die Mehrzahl der extragalaktischen Radioquellen ist mit optischen Objekten identifiziert worden. Eine beträchtliche Anzahl an Radioquellen sind Radiogalaxien. Es ist höchst bemerkenswert, daß die meisten Radiogalaxien diese oder jene Besonderheit in der Struktur zeigen. Nach MATTHEWS findet man bei 7% der Radiogalaxien Materiestrahlen, bei 9% faserförmige Gebilde an der Außenseite, bei 17% Irregularitäten in der Struktur, bei 9% Wolken in der Kernregion, bei 47% eine asymmetrische Hülle usw. Obwohl es gegenwärtig noch nicht klar ist, welche der vielen Besonderheiten tatsächlich wichtig sind, so ist jedoch gewiß, daß einige von ihnen (z.B. der Materieausstoß im Falle der Radiogalaxie Virgo A) eine große Bedeutung besitzen.

Die absolute Stärke der Radiostrahlung dieser Kondensationen ist über 100 millionenmal größer als die Intensität der Radiostrahlung, die aus einer der stärksten Radioquellen unserer Galaxis, dem bekannten Krebsnebel stammt. Die DOPPLER-Verschiebung des ionisierten Sauerstoffs weist auf eine Radialgeschwindigkeit für den nach außen gerichteten Materiestrahl von der Größenordnung 900 km/s hin, bezogen auf den Schwerpunkt der Galaxie. Außerordentlich wichtig ist die Tatsache, daß die Helligkeiten der Verdichtungen in diesem Materiestrahl Werte erreichen, die der Gesamthelligkeit einer Galaxie mittlerer Leuchtkraft entsprechen.

Wenn die Radiogalaxie Cygnus A - und möglicherweise auch die Radiogalaxie Centaurus A - in der dargelegten Weise als extrem enges System betrachtet werden kann, das durch Teilung des Kerns entstanden ist, dann ist die Radiogalaxie Virgo A ein Beispiel für den anderen Fall, wo ein Materiestrahl mit Verdichtungen aus dem Kern herausgeschleudert wird.

Es ist offensichtlich, daß sowohl die Komponenten des geteilten Kerns als auch die Gase des Materiestrahls der Radiogalaxie Virgo A in der Anfangsperiode eine hohe Relativgeschwindigkeit (Größenordnung Hunderte und Tausende von km/s) gehabt haben müssen, da sonst die Anziehungskräfte nicht hätten überwunden werden können.

Die Erscheinung sich voneinander entfernender Komponenten ist besonders deutlich bei der Radiogalaxie Perseus A ausgeprägt, in deren Spektrum Emissionslinien die starke kontinuierliche Emission überlagern. Nach MINKOWSKI ist der Unterschied in den Radialgeschwindigkeiten der Komponenten bei diesem sehr engen System von der Größenordnung 3 000 km/s.

Vom Standpunkt der neuen Konzeption können die Radiogalaxien Perseus A und Cygnus A als Systeme betrachtet werden, in denen zwar die Teilung der Kerne abgeschlossen ist, der gänzliche Zerfall der Galaxien jedoch noch nicht begonnen hat.

Somit läßt sich festhalten, daß die intensive Radiostrahlung in allen betrachteten Fällen durch heftige physikalische Prozesse bedingt ist, die in diesen Systemen stattfinden und die in engem Zusammenhang mit der Entwicklung dieser Systeme stehen.

Es gibt gewichtige Beweggründe (als Beispiele seien die Galaxien M 51 (TAFEL 10) und NGC 7752-7753 genannt) für die Annahme, daß ein enger Zusammenhang zwischen dem Teilungsprozeß des ursprünglichen Kerns und der Spiralarmstehung existiert. Die Beobachtungsdaten sprechen dafür, daß die Kerne der Galaxien sich nicht nur teilen können und dabei Paare extrem enger Systeme erzeugen (die Radiogalaxien von Typ Cygnus A, Perseus A, möglicherweise auch Centaurus A), sondern daß sie auch in der Lage sind, Materie strahlenförmig nach außen zu schleudern, um Spiralarme mit einzelnen Verdichtungen zu formen (Virgo A, M 51).

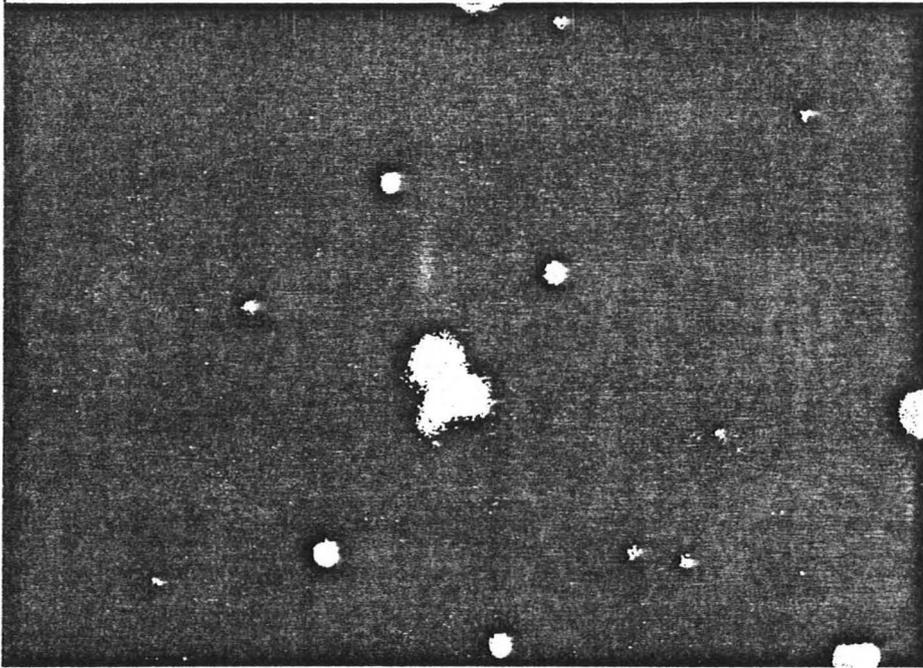
Deshalb geht die neue Konzeption von der Annahme aus, daß auch die Entstehung neuer struktureller Details (Spiralarme oder ganze Begleiter) auf die Aktivität der Kerne der Galaxie zurückzuführen ist.

Es sind weiters Fälle bekannt, wo gasförmige Materie kontinuierlich aus den Kernen von Galaxien ausströmt, auch bei unserer Galaxis strömt neutraler Wasserstoff aus den zentralen Regionen aus, wie OORT aus Beobachtungen der 21 cm-H-Strahlung entdeckt hat. Es treten jedoch bei Galaxien mit kleinem Kernvolumen eigenartige stellardynamische Widersprüche auf, die AMBARZUMJAN zu folgender Äußerung veranlaßten:

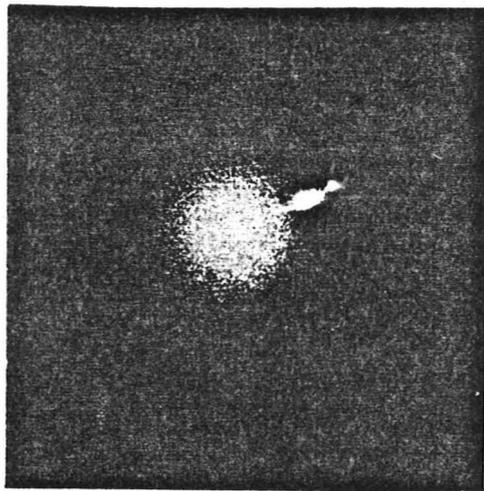
"Wir gelangen zu dem Schluß, daß in den Zentren der Galaxien, in deren Kernen also, Körper vorhanden sind, die an Masse die gewöhnlichen Sterne um viele Größenordnungen übertreffen und die weder diffuse Nebel noch Sterne sind. Diese Schlußfolgerung bezüglich des Vorhandenseins dichter Körper ungewöhnlich großer Masse in den Zentren einiger Galaxien ergibt sich zwangsläufig aus den Beobachtungsdaten".

Für die Deutung der von der Radiogalaxie Virgo A ausgesandten Strahlung (sowohl der Radio- als auch der kontinuierlichen optischen Strahlung des "jets") schlug SHKLOWSKIJ Synchrotronstrahlung vor. Nach einer im Galaxienkern erfolgten Explosion werden in zwei entgegengesetzten Richtungen Wolken relativistischer Elektronen herausgeschleudert. Diese Elektronen liefern eine besonders intensive Radiostrahlung. Mit wachsender Entfernung von der Galaxie wird die Strahlung schwächer, und die Wolken lösen sich allmählich im Raum auf. Deshalb dauert die Radiostrahlungsphase in der Entwicklung einer Galaxie vermutlich etwa 10^6 Jahre.

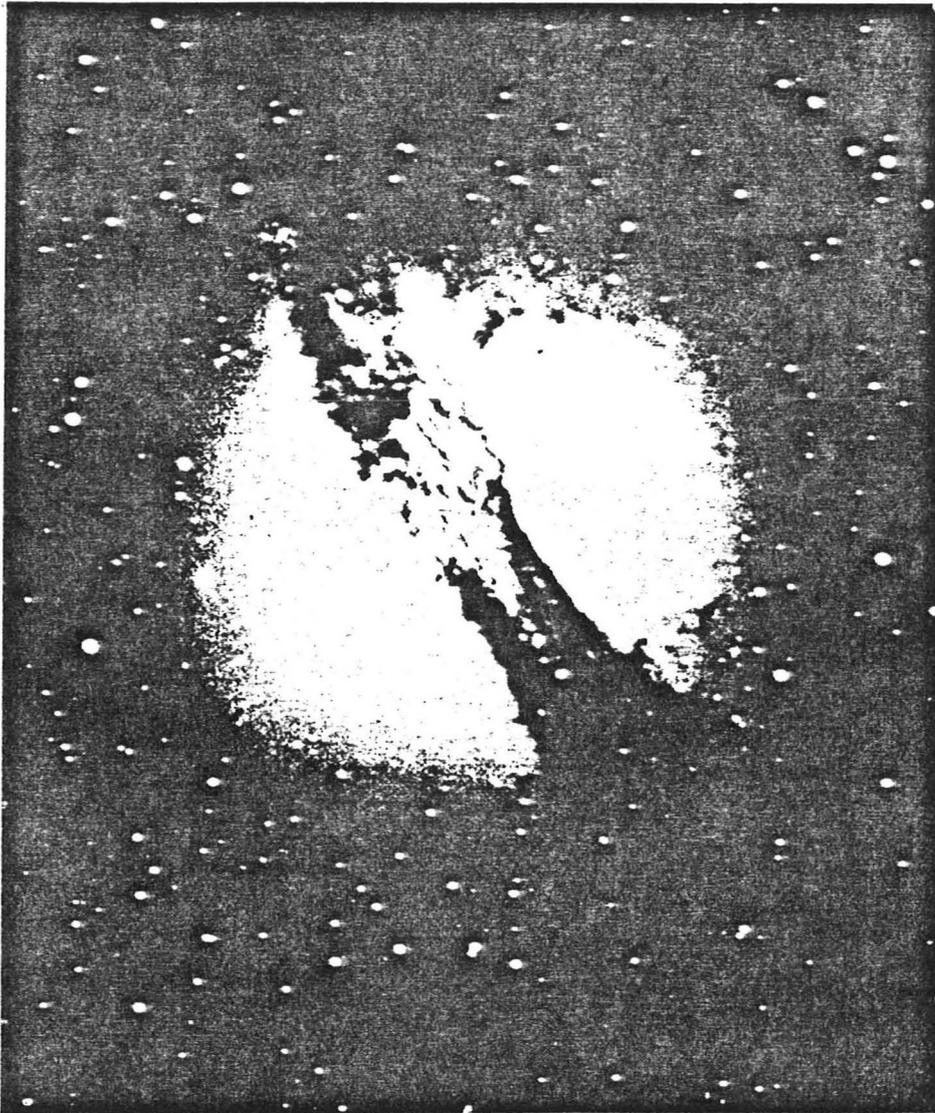
Die Radiogalaxie Virgo A ist kein Einzelfall. Es existieren auch andere Galaxien, in denen ein Ausstoß von Materie aus der Kernregion stattfand. Zum Beispiel geht von der sphärischen Galaxie NGC 3561a ein Materiestrahl aus, der an seinem Ende eine Verdichtung ungewöhnlich blauer Färbung besitzt. Etwa 20 blaue "jets" und Begleiter wurden bei elliptischen Galaxien gefunden. Wegen ihrer blauen Farbe nennt man diese Gebilde blaue Galaxien. Diese blaue Farbe zeugt - unabhängig von ihrer Ursache (viele heiße, blaue Sterne oder kontinuierliche Emission im Violetten) - von einer eigentümlichen Zusammensetzung dieser Objekte und ist ein Merkmal des relativ geringen Alters der blauen Galaxien. Dies liegt eben daran, daß die Farbe der gewöhnlichen Galaxien rot und orange (elliptische Galaxien), gelb oder gelborange (spiralförmige Galaxien) und



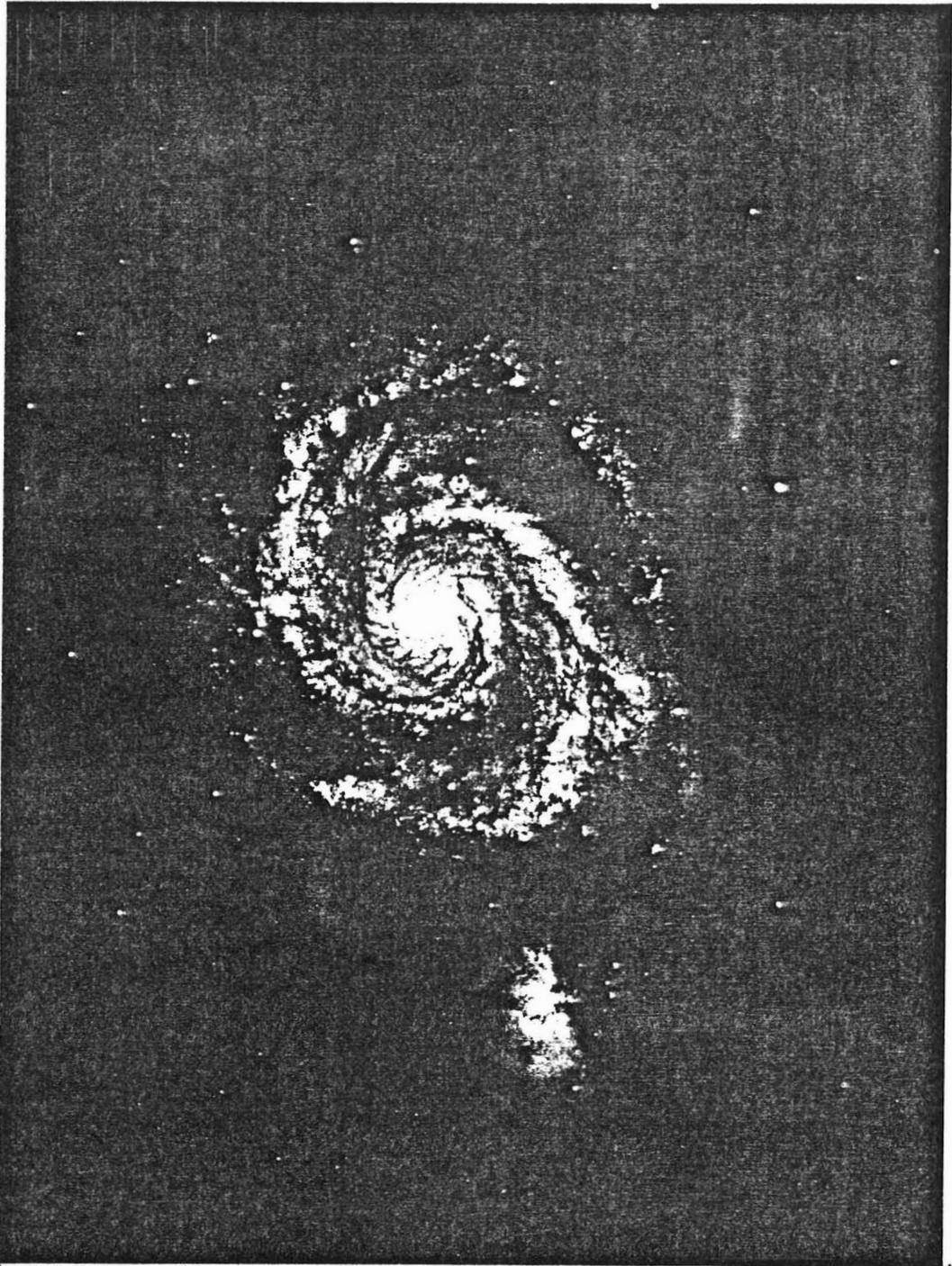
TAFEL 8: Doppelkern der Radiogalaxie Cygnus A



TAFEL 9: Der "Jet" von M 87



TAFEL 9a: Die Radiogalaxie Centaurus A (NGC 5128) mit Merkmalen einer Doppelnatur



.TAFEL 10: Die Galaxie M 51 und ihr Begleiter NGC 5195

gelbweiß (irreguläre Galaxien) ist und daß man in der Regel unter den gewöhnlichen Galaxien keine blauen Objekte antrifft.

Entsprechend der Vorstellung über die Teilung der Kerne von Galaxien und über das Auseinanderrücken der Komponenten darf man die von ZWICKY entdeckten Materiefasern und -brücken (die die Komponenten der Mehrfachsysteme von Galaxien untereinander verbinden), aber auch die Formen der "wechselwirkenden Galaxien" (TAFEL 7) häufig nicht als Folgeerscheinung einer Gezeitenwechselwirkung betrachten, sondern muß sie als das Ergebnis der sich voneinander entfernenden, aus demselben Kern entstandenen Galaxien betrachten (TAFEL 7).

Aus den angeführten Daten kann man schließen, daß sich neue Galaxien und ihre Strukturelemente (z.B. Spiralarme) auf Kosten der in den Kernen eingeschlossenen Materie bilden, die sich im wesentlichen in einem *n i c h t s t e l l a r e n* Zustand befindet. Eine große Bedeutung in diesem Zusammenhang hat jene Tatsache, daß Radiogalaxien, die ja Überriesengalaxien sind, gewöhnlich eine zentrale Lage im Innern von Galaxienhaufen einnehmen.

Der komplizierte Aufbau und die räumliche Anordnung der Spiralarme einiger Galaxien können als Beweis dafür angesehen werden, daß in Kernen dieser Galaxien Materieausstoß- und -ausströmungsprozesse mehrmals abgelaufen sind. Man sollte vermuten, daß sich ein Kern nach einer aktiven Periode beruhigt, aber ein potentiellles Zentrum für aktive kosmogonische Prozesse bleibt, die nach einer gewissen Zeit erneut angeregt werden. Offensichtlich dauert die kosmogonische Aktivität der Kerne - gemessen am Gesamtalter einer Galaxie - nicht sehr lange. Deshalb muß es unter den Galaxien Objekte geben, die diese Fähigkeit bereits verloren haben. Es müssen sogar kernlose Galaxien existieren, deren Kernaktivität erloschen ist.

Andererseits kann man auch annehmen, daß es Galaxien gibt, in denen die kosmogonische Aktivität der Kerne noch nicht in Erscheinung getreten ist. Zu den Galaxien mit beginnender Aktivität muß man offenbar die elliptischen Riesengalaxien und die linsenförmigen zählen. Man darf vermuten, daß sich ein Teil von ihnen in einem frühen Entwicklungsstadium befindet und erst in einem späteren Entwicklungsstadium Spiralarme bilden werden.

2.4. QUASARE UND BL LACERTIDEN - DAS ANFANGSSTADIUM DER KERNENTWICKLUNG

Dank der Entdeckung der quasistellaren Radioquellen (= Quasare) durch die amerikanischen Astronomen GREENSTEIN und MATTHEWS (1/351) sowie M. SCHMIDT (1/352) erhielt die Vorstellung über die kosmogonische Aktivität der Kerne von Galaxien im Jahre 1963 eine neue bedeutsame Bestätigung. Quasare sind extragalaktischer Natur¹⁾, sind sternartige Objekte mit mächtiger optischer und Radiostrahlung, die um ein Vielfaches die Strahlung von Überriesengalaxien übertrifft. Diese Strahlung hat eine ungewöhnlich hohe Intensität im UV-Bereich. Die Emissions- und Absorptionslinien im Spektrum zeigen außergewöhnlich hohe Rotverschiebungen. Sie besitzen verhältnismäßig geringe Ausmaße. Von Zeit zu Zeit erscheinen offensichtlich in ihnen stark konzentrierte Strahlungsquellen, die eine beträchtliche Änderung des Strahlungsstromes sowohl im optischen als auch im Radiobereich bewirken. Auch im Infrarot-Bereich ist die Strahlung extrem intensiv, wie neueste Beobachtungen zeigen.

Weiters stellte SANDAGE (1/353) fest, daß die Mehrzahl der sternförmigen blauen Objekte, welche schwächer als $16.^mO$ sind und sich in hohen galaktischen Breiten befinden, extragalaktische Objekte sind und eine neue Klasse darstellen.

Sie ähneln in ihren optischen Eigenschaften den Quasaren, man hat jedoch *k e i n e* Radiostrahlung gefunden. Nach SANDAGE sind diese Objekte rund 500mal häufiger als Quasare. Danach müßten Quasare ein kurzes Stadium in der Entwicklung der quasistellaren

¹⁾ Es gibt allerdings auch Versuche, die Objekte unserer Galaxis zuzuordnen, wiewohl dies jedoch äußerst unwahrscheinlich ist.

Objekte darstellen. Wir wollen aber im folgenden auch diese Objekte als Quasare bezeichnen.

Zur Entfernungsbestimmung der Quasare ist zu bemerken, daß es eine kosmologische und eine durch "Doppler-Bewegung" (Eigenbewegung ohne Expansion) hervorgerufene Distanzbestimmung gibt. Nehme ich an, daß die Rotverschiebung

$z = \frac{\lambda}{\lambda_0}$ eine rein kosmologische ist, d.h., durch die Expansion der Metagalaxis (ohne Eigenbewegung) hervorgerufen wird, so ergibt sich die Entfernung

$D = \frac{cz}{H}$ worin $c.z = v$ die Fluchtgeschwindigkeit darstellt.

Es ist jedoch noch zu beachten, daß bei großen z -Werten (> 1) die Abhängigkeit der Distanz von der Rotverschiebung für diverse Weltmodelle unterschiedlich ist (siehe 4. Kapitel). Für Weltmodelle $q_0 = \sigma_0 = 1$ ($q_0 =$ Verzögerungsfaktor, $\sigma_0 =$ Dichteparameter) ergeben sich für nahe bzw. sehr ferne Quasare folgende Werte: (reine Rechenwerte!)

Tabelle 2.4 Rotverschiebung und Entfernung einiger Quasare ($H = 75 \text{ km/s Mpc}$)

Objekt	z	v_{Doppler}	D (Mpc)	10^6 L.J.	D (Mpc) relativistisch	10^6 L.J.
Ton 256	0.131	0,122 c	523	1 700	488	1 590
3 C 273	0.158		630			
PKS 2135-14	0.200		798			
PKS 1217+02	0.240		957			
3 C 9	2.012	0,801 c	8 026	26 164	3 204	10 445
PHL 1305	2.064		8 234			
PKS 0106+01	2.107		8 425			
PKS 1116+12	2.118		8 449			
PKS 0237-23	2.223	0,824 c	8 868	28 900	3 296	10 744
fernster Quasar	3.6	0,909 c	14 400	46 944	3 636	11 853

Beim Übergang zu anderen Weltmodellen, also bei Änderung der Parameter σ_0 und q_0 (s. 71 Fußnote) muß man die von MC VITTIE [19] bestimmten Übergangskoeffizienten benutzen (Math. Anh.). Bei kleinen Rotverschiebungen sind die Diskrepanzen in den für verschiedene Modelle berechneten Entfernungen unbedeutend, sie wachsen jedoch stark an, mit zunehmenden z . Zum Beispiel variieren die Entfernungswerte für den Quasar 3 C 273 ($z = 0.158$), der zu den nächstgelegenen gehört, von 570 bis 740 Mpc. Dagegen ergeben sich für den Quasar 3 C 9 ($z = 2.012$) Entfernungen zwischen 4558 und 24174 Mpc.

Wenn man annimmt, daß die beobachteten Rotverschiebungen nicht kosmologischer Natur sind, sondern durch die DOPPLER-Bewegungen der lokalen Objekte oder durch Bewegungen des Gases, das die Quasare umgibt, verursacht werden, so hat man die entsprechenden Radialgeschwindigkeiten aus den beobachteten z -Werten mit Hilfe der Formel

$$v_D = c \frac{(z + 1)^2 - 1}{(z + 1)^2 + 1}$$

zu berechnen. Diese Beziehung erfolgt aus dem DOPPLER-FIZEAUSchen Gesetz für relativistische Geschwindigkeiten

$$\lambda = \lambda_0 \sqrt{\frac{1 + \frac{v_r}{c}}{1 - \frac{v_r}{c}}}; \quad \frac{\lambda}{\lambda_0} = 1 + z$$

Die Formel zeigt, daß bei $z = 0.73$ die DOPPLER-Geschwindigkeit v_D die halbe Lichtgeschwindigkeit erreicht; bei $z = 2$ beträgt sie 0.8 c.

Wenn die Quasare kosmologische Objekte sind, dann stellen sie die weitestentfernten beobachteten kosmischen Objekte im Universum dar. Daraus folgt, daß sie extrem hohe Radio- und optische Helligkeiten besitzen. Die optische Helligkeit dieser Objekte übersteigt selbst die Helligkeit der Überriesengalaxien beträchtlich.

Nachfolgend sind die visuellen scheinbaren und absoluten Helligkeiten von zwei bekannten Quasaren, der Helligkeit der normalen Radiogalaxie Cygnus A gegenübergestellt worden. Die Daten stammen von MATTHEWS und SANDAGE [1/358].

Tabelle 2.5

	m	M _{ph}	log F	F
3 C 48	16.2	-24.9	1.28	20
3 C 273	12.6	-26.2	1.8	60
Cygnus A	14.1	-21.7	0	-

$$\log F = \frac{M_i - M_{\text{cyg}}}{2,5}$$

Es zeigt sich, daß die Helligkeit von 3 C 48 fast 20mal und die Helligkeit von 3 C 273 mehr als 60mal größer ist, als die Helligkeit der Radiogalaxie Cygnus A, die bekanntlich selber eine Überriesengalaxie ist.

Die Interpretation dieser gewaltigen Leuchtkräfte der Quasare im Rahmen der bekannten physikalischen Vorstellungen bereitet in energetischer Hinsicht praktisch unüberwindbare Schwierigkeiten. Diese Schwierigkeiten vergrößern sich noch erheblich nach der Entdeckung der starken Infrarotstrahlung dieser Objekte. Eine Reihe von Interpretationsversuchen, was denn die Quasare wirklich seien, bzw. sie als lokale Objekte mit starker Gravitationsrotverschiebung zu interpretieren, schlugen fehl, so daß gegenwärtig kaum noch jemand an der großen Entfernung und den daraus abzuleitenden außergewöhnlichen Eigenschaften zweifelt. Untersuchungen von ARAKELJAN [1] haben eine überzeugende Bestätigung für die kosmologische Natur der Quasar-Rotverschiebung gebracht. Der Grundgedanke der Untersuchungen war folgender: wenn die Quasare im Raum eine gleichmäßige Verteilung aufweisen (etwa alle Quasare einer mittleren angenommenen Helligkeit), so kann die kosmologische Natur der Rotverschiebung als gesichert angenommen werden. Die folgende Tabelle zeigt dies sehr klar:

Tabelle 2.6

Räumliche Dichte D_k (Anzahl der Quasare je Mpc^3) - für Quasare der mittleren Helligkeit $23,8^m$, für $\lambda = 2500 \text{ \AA}$

Quasar	z	$D_k \cdot 10^9$	Quasar	z	$D_k \cdot 10^9$
3C273	0,158	8,05	3C205	1,534	0,41
3C175	0,768	0,47	3C432	1,805	0,40
3C454,3	0,860	0,58	3C191	1,952	0,42
3C298	1,439	0,35	3C9	2.012	0,47

Anmerkung: Die Rechnungen wurden durchgeführt mit einer HUBBLE-Konstanten

$$H = 100 \text{ km/s/Mpc und für ein Weltmodell}^{1)} \text{ mit } q_0 = + 1.$$

Die Ergebnisse hängen jedoch schwach von dem angenommenen Wert q_0 ab [1/367].

f_{2500} ist die Strahlungsintensität bei der Wellenlänge $\lambda = 2500 \text{ \AA}$.

1) Siehe 4. Kapitel. In der modernen Kosmologie auf EINSTEIN's Feldgleichungen basierende Differentialgleichungen, die Parameter wie kosmologischer Radius ("Radius des Weltalls") R, seine Änderung mit der Zeit $\frac{dR}{dt}$, kosmische Dichte σ_t , Verzögerungsfaktor der Expansion des Weltalls q , Weltalter $\frac{dt}{dt} T$ und ursprünglich auf EINSTEIN zurückgehende kosmologische Konstante λ (entfällt in modernen kosmologischen Modellen) verbinden.

Eine bemerkenswerte Besonderheit der Quasare ist die Veränderlichkeit der Strahlung. Eine optische Veränderlichkeit ist mindestens bei einem Dutzend Quasaren festgestellt worden (1/370-379). Wenn man jedoch bedenkt, daß die Quasare nur sporadisch beobachtet wurden, ihr Lichtwechsel aber ziemlich häufig registriert worden ist, muß man annehmen, daß die optische Veränderlichkeit eine weitverbreitete Eigenschaft der Quasare ist. Die Größenordnung der Amplitude des Lichtwechsels beträgt ungefähr 1,5 Magnitude.

Die kurze Zeitskala des Lichtwechsels im optischen und im Radiowellenlängenbereich weist auf sehr kleine Ausmaße der Quasare hin. Die Grenzen für die Größe R der Quasare lassen sich aus der Zeitskala, mit welcher der optische und der Radiostrahlungsstrom variieren, nach

$$R \leq c \tau$$

bestimmen. Hier bedeuten: c die Lichtgeschwindigkeit und τ die Periode der Helligkeitsschwankungen im Koordinatensystem des Beobachters.

Die raschesten Änderungen im optischen Bereich (Wochen und Tage) wurden bei den Quasaren 3C345 und 3C446 beobachtet. Daraus konnten für diese Objekte Durchmesser von der Größenordnung 10^{15} cm, d.s. ca 10 Lichtstunden, abgeleitet werden. (Zum Vergleich: unser Sonnensystem hat einen Durchmesser von ca 5 Lichtstunden).

Die ungewöhnliche Farbe und die Veränderlichkeit, die kleinen Ausmaße und die enorme Helligkeit sind gewichtige Argumente zugunsten der Vorstellung über die ungewöhnliche Natur der Quasare.

Nach AMBARZUMJAN (1/317) lassen sich diese und andere Eigenschaften der Quasare erklären, wenn man annimmt, daß sie tatsächlich isolierte Kerne sind, die noch kein Sternfeld um sich herum gebildet haben. Man muß diese Objekte als die frühesten Entwicklungsstadien der Galaxien betrachten.¹⁾

Der beobachtete rasche und unregelmäßige Lichtwechsel der Quasare läßt sich nicht erklären, wenn man annimmt, daß die Strahlung dieser Objekte von der stellaren Komponente in ihren Kernen stammt. Vielmehr bestätigt die Variabilität, daß die optische Strahlung der Kerne teilweise, im Falle der Quasare jedoch hauptsächlich nicht durch die Ausstrahlung der stellaren Kernpopulation verursacht wird, sondern durch die Ausstrahlung eines massiven Körpers unbekannter Natur, dessen Helligkeit die der hellsten Überriesensterne millionenfach übertrifft. Es ist evident, daß auch die Masse solcher Körper mindestens eine millionmal größer sein müßte, als die Masse der massereichsten Sterne.

Diese Schlußfolgerungen lassen auch die Vorstellung zu, daß in den Kernen praestellare Körper mit hoher Dichte vorhanden sind.

Zum Abschluß seien noch 2 Quasarmodelle kurz erwähnt [14].

Im Jahre 1977 brachte eine Beobachtung des nahen Quasars 3C273 den Beweis, daß nahe und ferne Quasare gleichartige Objekte sind. Der Beweis gelang durch das UV-Spektrum, welches für nahe und extrem ferne sehr ähnlich ist. Eine wesentliche Erkenntnis in der Quasarforschung.

In dem beschriebenen Modell wird angenommen, daß im Quasarkern, der etwa 1 bis 2 Lichtjahre Durchmesser hat, Materie von 10^6 bis $10^9 M_{\odot}$ konzentriert ist, und zwar in Form von

- 1.) dichten Sternhaufen
- 2.) schnell rotierenden Riesensternen, sogenannten Spinaren oder Magnetoiden
- 3.) Materie-Einsturz auf Super-SL (Schwarzes Loch)

Die Folge davon wäre:

- a) Supernovaexplosionen in den dichten Sternhaufen

¹⁾ Wird derzeit schon sehr in Frage gestellt.

b) Die stark rotierenden Riesen geben Energie durch Instabilität, die das Zerschneiden bewirkt, ab.

c) Die größte Strahlung erwartet man jedoch durch den SL-Effekt.

Dieses SL-Modell für Quasare wird heute von vielen Astrophysikern akzeptiert. Die beiden Modelle "Springbrunnen" und "Doppel-Auspuff" versuchen gewisse Erscheinungsformen wie z.B. die Doppelradiogalaxien zu erklären. Jedoch sind hier sehr viele "spekulative" Momente enthalten. Wir werden sehen, daß diese Modelle kaum haltbar sind!

2.5. SEYFERT- UND N-GALAXIEN

Lange bevor die Idee von der Aktivität der Galaxienkerne entwickelt wurde, beschrieb der amerikanische Astronom SEYFERT (1/384) eine Klasse von Galaxien, die sich bezüglich ihrer Kernspektren deutlich von den zu jener Zeit (1943) bekannten Galaxien unterschieden. Diese Galaxien erhielten die Bezeichnung "SEYFERT-GALAXIEN". Sie besitzen helle, sternförmige Kerne. In den Spektren dieser Kerne treten außerordentlich breite Emissionslinien auf, die von Atomen hoher Anregungsstufe stammen. Die Untersuchung dieser Kernspektren ergab, daß in den SEYFERT-Galaxien heftige Bewegungen gasförmiger Materie vorkommen. Z.B. erreicht bei der Galaxie NGC 1275 (Perseus A) die Geschwindigkeitsdispersion der inneren Bewegungen einen Wert von 4 500 km/s, und sie ist bei den Galaxien NGC 3516, NGC 415 und NGC 7496 mit Werten von 7 500 bis 8 500 km/s sogar noch größer. Häufig haben diese Bewegungen, worauf wir noch eingehen werden, den Charakter von regelrechten Materieauswürfen (jets) aus dem Kern.

Einige SEYFERT-Galaxien erwiesen sich später als Radiogalaxien. Hierauf setzte eine weitere Erforschung der bekannten Galaxien dieser Klasse sowie die Suche nach neuen Objekten ein. Es wurde offenkundig, daß die Kerne der SEYFERT-Galaxien eine große kosmogonische Aktivität besitzen.

In weiterer Folge wurden die N-Galaxien (Abart der SEYFERT-Galaxien) entdeckt, die ebenfalls helle, sternartige Kerne haben. Die meisten N-Galaxien konnten mit starken Radioquellen identifiziert werden. In weiterer Folge erwiesen sich viele Quasare als N-Galaxien.

Aus dem angesammelten Beobachtungsmaterial folgte eindeutig, erstens, die Gleichartigkeit der Prozesse, die in den quasistellaren Objekten, in den SEYFERT-Galaxien und in den N-Galaxien ablaufen, sowie zweitens, die große Ähnlichkeit der Quasare mit den Kernen der eben genannten Galaxien.

2.6. MARKARJAN-GALAXIEN

Diese Galaxien zeichnen sich durch extrem hohe UV-Strahlung aus. Unter diesen Objekten findet man die verschiedenartigsten Objekte, wie etwa BLAUE Galaxien von HARO entdeckt, KOMPAKT-Galaxien von ZWICKY, SEYFERT-Galaxien und QUASARE.

Die meisten dieser Objekte sind kompakte und kondensierte Gebilde von sphärischer oder sphäroidischer Gestalt. Viele haben sternförmige Kerne. Starke Unterschiede gibt es in den Helligkeiten. So variiert z.B. die absolute fotografische Helligkeit der näher untersuchten Objekte zwischen $-14.^m7$ und $-21.^m0$, die absolute Blauhelligkeit zwischen $-14.^m2$ und $-21.^m9$. Diese Daten zeigen, daß einige dieser Objekte, hinsichtlich ihrer Helligkeit den Radiogalaxien nicht nachstehen und den Quasaren ähneln. Das Vorhandensein eines starken Ultraviolettcontinuum und eines damit eng korrelierten Emissionsspektrums bei diesen Objekten spricht unbedingt für hochgradig aktive Kerne.

Die bereits bekannten Daten über die MARKARJANSchen Objekte lassen den Eindruck entstehen, daß offenbar diese Objekte entwicklungsgemäß zwischen den Quasaren und den

normalen Galaxien liegen.

Aus diesem Grunde garantiert das gesamte Beobachtungsmaterial eine sichere Basis für die Annahme, daß die normalen Galaxien, die SEYFERT-Galaxien, die N-Galaxien und die QUASARE von gemeinsamer Natur sind, daß jedoch ihre Verschiedenheit im wesentlichen durch den unterschiedlichen Umfang der in ihnen auftretenden nichtstationären Erscheinungen bedingt werden, d.h., durch den unterschiedlichen Grad der Kernaktivität. Zugleich wird die Vorstellung bekräftigt, daß zwischen Objekten mit unterschiedlich starker Kernaktivität ein kontinuierlicher Übergang besteht (1/123).

Alle diese Daten befinden sich in guter Übereinstimmung mit der Vorstellung über die kosmogonische Aktivität der Galaxienkerne. Nach dieser Vorstellung nimmt die Aktivität der Kerne im Laufe der Entwicklung der Galaxien ab. Folglich sind die Radiogalaxien und die Quasare, die ja den höchsten Grad an Aktivität aufzuweisen haben, als Anfangsstadium der Galaxienentwicklung zu betrachten.

2.7. DIE ENTWICKLUNG DER GALAXIEN (Zusammenfassung)

Schon im Jahre 1958 veröffentlichte AMBARZUMJAN eine vollständige Darstellung seiner Forschungsergebnisse über die Entwicklung der Galaxien. Seine Untersuchungen basierten auf der Idee von der Aktivität der Kerne. Diese Idee erhielt u.a. eine Bestätigung durch die Entdeckung der unregelmäßigen Galaxie M 82 mit ihren faserförmigen Gebilden am Galaxienrand, welche LYNDEN und SANDAGE (1/426) als Gas, welches mit etwa 1 000 km/s von der Zentralregion entflieht, erkannten. Diese Erscheinung läßt sich dadurch erklären, daß vor etwa $1,5 \times 10^6$ Jahren eine Gaswolke von ca $5 \times 10^6 M_{\odot}$ aus dem Kern von M 82 (TAFEL 11) herausgeschleudert wurde. Auch in anderen Kernen konnten derartige "Explosionen" beobachtet werden. Sehr wichtig ist die Feststellung, daß derartige explosionsartige Prozesse nicht nur in Radiogalaxien ablaufen können, sondern auch in Galaxien, die keine merkliche Radiostrahlung zeigen. Nach AMBARZUMJAN untermauern die Beispiele für mögliche exzentrische Explosionen in einigen Galaxien (z.B.: Große Magellansche Wolke, NGC 3955, NGC 4486, M 87 (TAFEL 9) u.a.) die Schlußfolgerung, daß die Explosionen in den Galaxienkernen mit sehr massiven Körpern u n g e w ö h n l i c h e r Natur zu verbinden sind. Er hält es auch für möglich, daß noch Formen der Aktivität existieren, die bislang noch nicht direkt feststellbar waren und zwar:

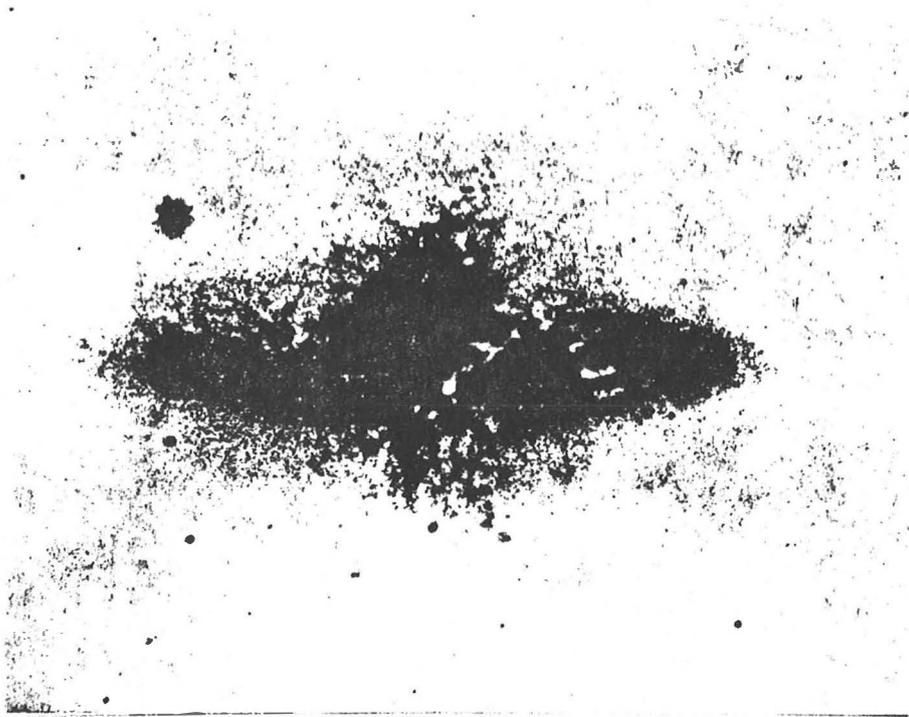
- 1.) Ausströmen von Materie, aus der sich später Spiralarme bilden
- 2.) Auswürfe, der in den Balken der SB-Galaxie lagernden Materie
- 3.) Auswürfe von Materie, aus der die stellare Population der sphärischen Untersysteme hervorgeht.

Diese Prozesse laufen unter Umständen rasch ab und dauern 10^3 bis 10^8 Jahre. Der Grad der Kernaktivität wird durch den Kernzustand bestimmt, offenbar existieren 3 Grundarten, nämlich

- a) ruhige Kerne
- b) angeregte Kerne
- c) explosive Kerne

Nach AMBARZUMJAN gibt es folgende Kategorien von Galaxien:

- 1.) Galaxien ohne Konzentration in der Zentralregion.
Dazu gehören viele irreguläre und elliptische Zwerggalaxien (ev. Magellansche Wolken und die sehr nahe Skulptorgalaxie).
- 2.) Galaxien mit ruhigen Kernen relativ geringer Helligkeit.
Zu dieser Klasse gehören viele spiralförmige und elliptische Galaxien, beispielsweise M 31, NGC 5194, M 33 und eventuell auch unsere Galaxis (TAFEL 12).



TAFEL 11: Die Galaxie M 82, in der sich vor 1.5×10^6 Jahren eine gewaltige Eruption (Explosion) ereignet hat (LYNDS u. SANDAGE). Oben und unten im Bild sind Gaswolken, die aus dem Kern herausgeschleudert wurden und die jetzt noch eine Geschwindigkeit von über 1000 km/sec haben.



TAFEL 12: Der Andromedanebel (M 31) mit seinen elliptischen Begleitern M 32 und NGC 205

- 3.) Galaxien mit ruhigen Kernen großer Helligkeit.
Vertreter dieser Klasse sind u.a. die Galaxien NGC 4303 und NGC 3162, aber auch eine Reihe von spiralförmigen und elliptischen Galaxien (TAFEL 13).
- 4.) Galaxien, bei denen sich der Anteil der Kernhelligkeit an der Gesamthelligkeit bis auf 50% beläuft. Hierher gehören die nicht sehr zahlreichen SEYFERT-Galaxien mit angeregten Kernen.
- 5.) Galaxien, bei denen praktisch die gesamte Helligkeit im Kern konzentriert ist. Zu dieser Klasse rechnet man die Kompaktgalaxien einschließlich der Quasare (3C 48, 3C 273 usw.). Die Strahlung dieser Galaxien ist offenbar nicht thermisch und sie haben äußerst starke UV-Strahlung, wodurch auch die ungewöhnliche Bläue der Quasare erklärt werden kann. Dieser UV-Exzeß ist für SEYFERT-Galaxien charakteristisch.

Generell kann festgestellt werden:

- 5.1 die nichtthermische Strahlung und die Aktivität der Galaxienkerne wird durch die Ergebnisse der Radiobeobachtung bekräftigt.
- 5.2 intensive Radiostrahlung wird nur dann beobachtet, wenn eine Galaxie im Kern explosive Prozesse aufweist oder einen sternförmig ausgeprägten Kern besitzt.
- 5.3 die Radiostrahlung kommt vorzugsweise aus zentralen Regionen, die um ein Vielfaches kleiner sind als das optische Bild der Galaxie, dies deutet zweifelsfrei auf Kernaktivität hin. Bei sehr wenigen Spiralgalaxien, ist die Radiokorona viel größer als die Galaxie selbst.

Akzeptiert man die Vorstellung, die Radiostrahlung sei ein gewisser Indikator der Kernaktivität, dann deuten diese Daten darauf hin, daß die Kerne der Galaxien früher morphologischer Typen einen höheren Grad an Aktivität haben als spätere und daß der höchste Grad an Aktivität bei den Kernen der SEYFERT-Galaxien und den Quasaren vorliegt. Alle diese Fakten muß man nach AMBARZUMJAN als Beweis dafür nehmen, daß in den Kernen der Galaxien massive Körper "unbekannter Natur" existieren.

(Wenn wir uns die beiden Quasarmodelle kurz in Erinnerung rufen, so wird ja auch dort immer wieder ein SL oder ein Super-SL verantwortlich für die ungeheure Energieemission gemacht, nun, wie wir in früheren Kapiteln schon gesehen haben, beherrschen wir die Physik dieser übermassiven Objekte, SL genannt, nur zum Teil. Wir stellen nur gewisse Eigenschaften fest und wissen, oder besser ahnen, wie sie sich auf ihre Umgebung auswirken, aber ihre physikalischen Eigenschaften im Inneren kennen wir nicht und diese Objekte nennt AMBARZUMJAN offenbar "Massive Körper unbekannter Natur").

Einige Fragen der Galaxienentwicklung lassen sich mit den bereits heute bekannten Daten über die Kerne teilweise beantworten (TAFEL 14). So kann beispielsweise die Besonderheit der Kerne, während einer "Explosion" Gaswolken und Wolken relativistischer Teilchen auszustoßen, für die Entstehung gasförmiger und radiostrahlender Strukturelemente der Galaxien verantwortlich sein. Man muß ferner davon ausgehen, daß das Material für die Spiralarme in den Galaxienkernen erzeugt wird. Dafür spricht zumindest die Tatsache, daß die Spiralarme der Galaxien in den Kernen beginnen.

AMBARZUMJAN [1/317] leitet aus der Analyse der Daten über den unterschiedlichen Grad der Kernaktivität in den verschiedenen Entwicklungsstadien der Galaxien folgende Entwicklungsrichtung der Galaxien ab:

	spiralförmige	
elliptische		irreguläre
	Balkenspiralen	

Dies bedeutet, daß Sc-, SBC- und irreguläre Galaxien (wie z.B. die Magellanschen Wolken), die alle Sterne der Population I enthalten, die genetisch ältesten Galaxien sind. Damit erklärt sich auch die Seltenheit an Kernen hoher Leuchtkraft bei Sc- und SBC-Galaxien sowie das völlige Fehlen der Kerne in einigen irregulären Galaxien.

In den letzten Entwicklungsstadien der Galaxien verringert sich die Helligkeit der Kerne erheblich; die Kerne erschöpfen sich und verschwinden.

Den Entwicklungsweg der Galaxien kann man sich, wenn diese Hypothese richtig ist, schematisch wie folgt vorstellen: Die Riesengalaxien beginnen ihre Entwicklung im Stadium elliptischer Galaxien mit jungen Kernen. In diesem Stadium besitzt die Galaxie eine hinreichend starke stellare Population. Mit der Kernaktivität wächst die Helligkeit des Kerns. In der Galaxie bilden sich neue Untersysteme. Es beginnt nun das Stadium der spiralförmigen Galaxien vom Typ Sa und Sb (oder der Balkenspiralen vom Typ Sba und SBc). Sie besitzen Kerne großer Helligkeit. Schließlich treten diese Galaxien in das Stadium der späten Spiralnebel vom Typ Sc (oder entsprechend der Balkenspiralen vom Typ SBc) und danach in das Stadium der irregulären Galaxien ein.

Die Vorstellung, daß die spiralförmigen Galaxien der späten Typen und die irregulären Galaxien die ältesten Sternsysteme sind, steht nicht im Widerspruch zu der Tatsache, daß sich in ihnen junge Sterne befinden (heiße Riesen und Überriesen); denn das geringe Alter bestimmter Bestandteile der Galaxien kann, wie schon gesagt, nicht als Beweis dafür betrachtet werden, daß die gesamte Galaxie jung ist.

Die eben dargelegte Konzeption geht von der Annahme aus, daß die Sterne der Population-II im Anfangsstadium der Galaxienentwicklung entstehen, während die Population-I-Sterne erst in einem späteren Stadium gebildet werden, wenn nämlich die Spiralarme aus der Materie entstehen, die aus dem Kern ausgeschleudert wurde.

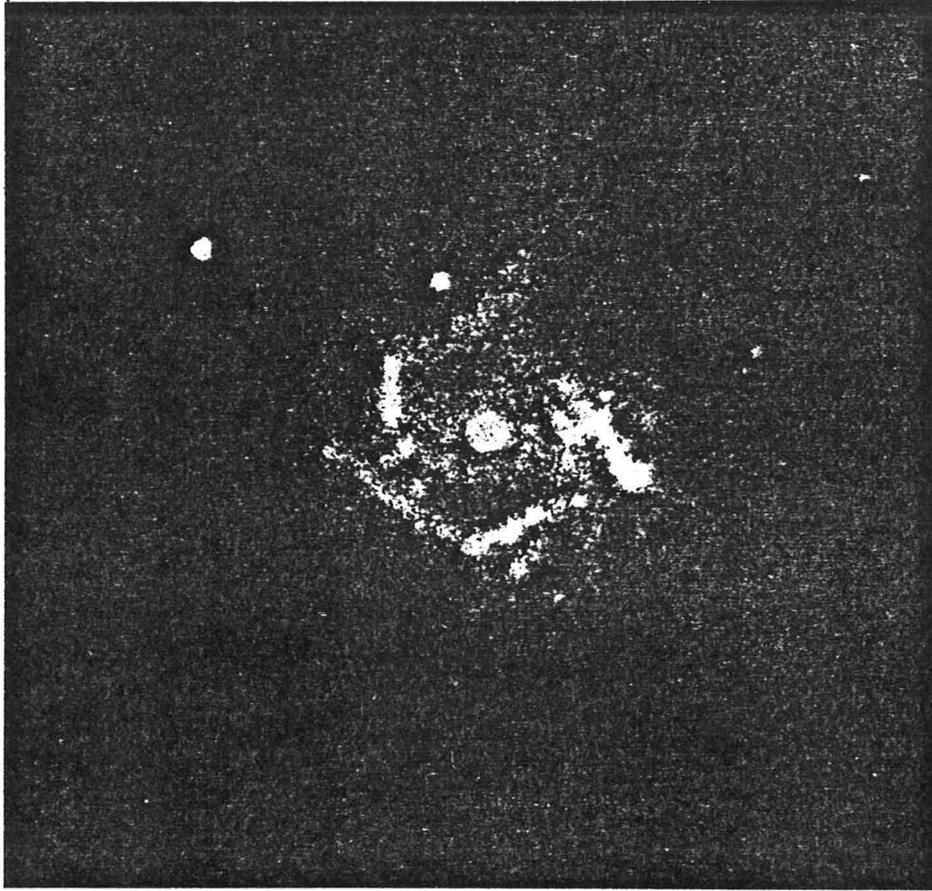
Beim Symposium "Galaxienkerne 1970" in Rom wurde versucht, die wichtigsten Beobachtungsergebnisse einigen damit übereinstimmenden Theorien gegenüberzustellen, und zwar:

Beobachtungen:

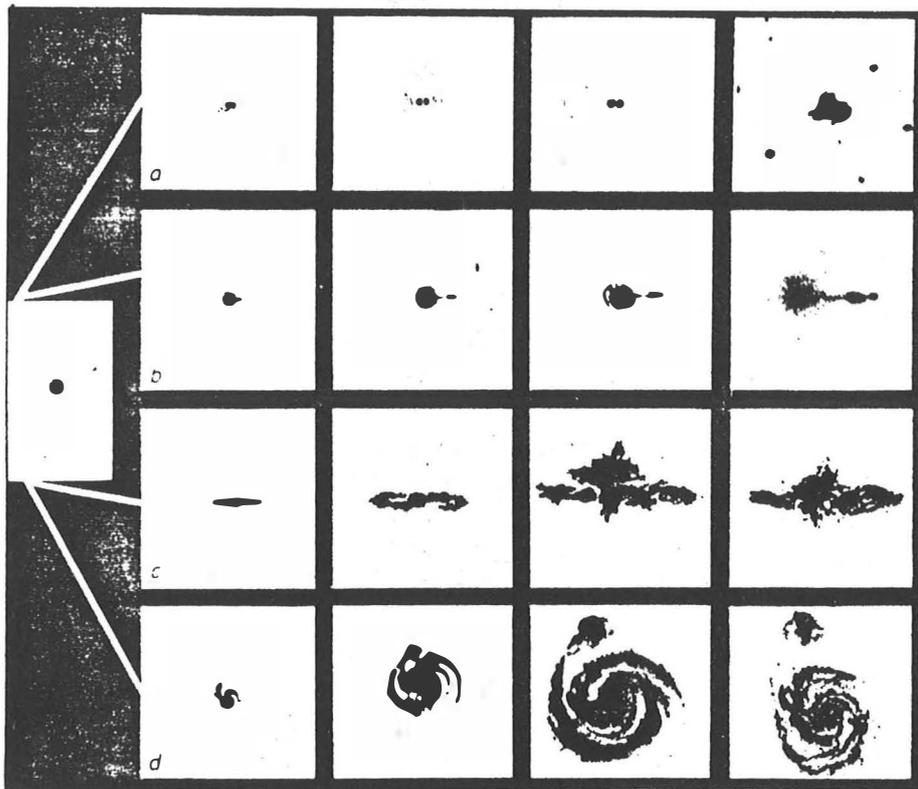
- 1.) Materie wird aus aktiven Galaxienkernen und quasistellaren Objekten herausgeschleudert.
- 2.) Es gibt in zunehmendem Maße Hinweise auf Galaxiengruppen mit positiver Energie. Ihre Existenz würde eine Reihe von Problemen aufwerfen, für die man bis jetzt keine Erklärung hat.
- 3.) Die Entdeckung starker Infrarotstrahlung hat die Abschätzungen über den totalen Strahlungsstrom einiger aktiver Kerne stark erhöht.
- 4.) Es ist jetzt bekannt, daß in den Kernen vieler normaler Galaxien und starker Radioquellen, sowie in quasistellaren Objekten kleine Radiokomponenten vorkommen (Durchmesser von der Größenordnung 10^{18} cm = 1 L.J.).

Die daraus entwickelten theoretischen Aussagen waren unter anderem:

- 1.) Die Entstehung kompakter Kondensationen in den Galaxien durch Wechselwirkung zwischen Sternen und Gas ist möglich und spielt vielleicht eine Rolle bei der Entwicklung der Aktivität im Galaxienkern.
- 2.) In den Galaxienkernen ist die Bildung massereicher Objekte mit starken Gravitationsfeldern möglich.
- 3.) Die Möglichkeit der beiden entgegengesetzten Auffassungen wird festgestellt:
 - a) die Kerne sind primär vorhanden;
 - b) sie werden durch Kontraktion gebildet.
- 4.) Energie und Masse werden bei Ausbrüchen unterschiedlicher Intensität und Dauer ausgestoßen. Die Energie ist von der Größenordnung 10^{52} erg/Jahr pro Galaxis; sie ist beträchtlich größer in quasistellaren Objekten, wenn diese sich wirklich in kosmologischen Entfernungen befinden. Die Gesamtenergie erreicht dann 10^{60} bis 10^{62} erg/Objekt. Der Masseausstoß hat im Normalfall eine Stärke von der Größen-



TAFEL 13: Der Spiralnebel NGC 4303 mit sehr ausgeprägtem Kern .



TAFEL 14: Entwicklungsschema der Galaxien bei unterschiedlicher Kernaktivität (von oben nach unten)

- a) Kernteilung und Ausstoß radiostrahlender Wolken
- b) Ausstoß eines Materiestrahles (Jet) aus dem Kern einer Galaxie; der Materiestrahl enthält Kondensationen, die sich später zu "Blauen Galaxien" entwickeln können.
- c) Ausstoß gasförmiger Materie als Folge einer kosmischen Eruption im Kern einer Galaxie
- d) Bildung von Spiralarmen und Begleitern aus Kernmaterial

Im letzten Bild jeder Zeile (also letzte Spalte) sind die Photographien jener Galaxien wiedergegeben, die die entsprechenden Erscheinungsformen der Kernaktivität besitzen.

ordnung 1 Sonnenmasse/Jahr.

5.) Es gibt keine endgültigen Hinweise dafür, daß die Grenzen der gewöhnlichen Physik bereits überschritten sind. Jedoch lassen sich bis jetzt viele Erscheinungen nicht angemessen erklären.

Gegenwärtig wird nicht mehr daran gezweifelt, daß in den Kernen sehr gewaltige und energiereiche Prozesse ablaufen und daß die Kerne selbst natürlich Teilchen- und Strahlungsquellen im Kosmos darstellen.

Der Ursprung der kosmischen Strahlung, in der zuweilen Teilchen mit milliardenfachen größeren Energien als in den gegenwärtig existierenden größten Beschleunigern anzutreffen sind, hängt aller Wahrscheinlichkeit nach, ebenfalls mit der Aktivität der Galaxienkerne zusammen. Es scheint sicher zu sein, daß die sehr energiereichen kosmischen Teilchen aus den Kernen ausgeschleudert werden; d.h., die Galaxienkerne sind direkt oder indirekt die Quelle der hochenergetischen Partikel.

"Offenbar stehen die Daten über die Aktivität der Galaxienkerne im Widerspruch mit dem Energie- und dem Materieerhaltungssatz¹⁾ in seiner jetzigen Form, der sich allerdings auf bekannte Energieformen beschränkt. Die Geschichte der Wissenschaft kennt viele Beispiele, wo neue Erscheinungen erst nach der Entdeckung neuer Naturgesetze und der Entwicklung neuer physikalischer Vorstellungen, die manchmal erheblich von den "klassischen" Ansichten abweichen, geklärt werden konnten. Nach den Beobachtungen, ist eine solche Situation offenbar in der Kosmogonie eingetreten. Dennoch ergaben sich aufgrund zahlreicher Beobachtungsdaten - nicht nur des Bjurakaner Observatoriums - empirische Gesetzmäßigkeiten, durch welche die Entstehungsprozesse von Sternsystemen beschrieben wurden."- soweit AMBARZUMJAN (1/316).

2.8. GALAXIENHAUFEN

Da 10% aller Galaxien großen Systemen von tausenden von Galaxien angehören, die im heißen Gas eingebettet sind, wollen wir uns zum Abschluß dieses Kapitels noch kurz mit diesen neuen Erkenntnissen befassen (15).

Es scheint eine grundsätzliche Naturtendenz zu sein, daß sich vorerst alle Objekte einer gegebenen Klasse zusammenballen, um Einheiten höherer Ordnung zu bilden. Dies gilt offenbar auch für Galaxien. Neuere Beobachtungen der Röntgenastronomie haben ergeben, daß der Raum zwischen den Galaxien in Riesenhaufen (tausende von Galaxien) mit heißem Gas erfüllt ist, welches aus Überriesengalaxien elliptischer Natur, im Zentrum dieser Haufen gelegen, ausströmt (siehe: Aktivität der Galaxienkerne). Die uns bereits bekannte Riesengalaxie M 87 liegt etwa im Zentrum des VIRGO-Haufens und hat einen besonders "aktiven" Kern. Die Autoren von (15) schätzen für das Zentrum von M 87 eine Masse von $5 \times 10^9 M_{\odot}$ und dies möglicherweise in Form eines SL (?). Damit wäre auch das Problem der "fehlenden Massen", welche nötig sind, um entsprechende Gravitation zu erzeugen, die die Galaxien zusammenhält, angerissen. ZWICKY hat darauf mehrfach aufmerksam gemacht, daß die "beobachteten" Galaxienmassen zu gering wären! Ein großer Haufen (rich cluster) hat mehr als 1 000 Mitglieder, und eine außergewöhnlich hohe Galaxiendichte im Zentrum (Abb. 2.7). Der VIRGO Haufen ist ein Beispiel dafür. Die Galaxie M 87 (NGC 4486) ist von einer Röntgenstrahlen emittierenden Wolke von etwa 10^6 L.J. Durchmesser umgeben. Die Temperatur dieser Wolke muß etwa 30×10^6 K sein, da im Spektrum dieser Wolke Emissionslinien hochionisierten Eisens (!) auftraten. Die Röntgenstrahlung ist daher eher thermischer als nichtthermischer Natur.

¹⁾ Es muß festgestellt werden, daß diese Behauptung von namhaften Wissenschaftlern als durch nichts bewiesene Spekulation dargestellt wird!

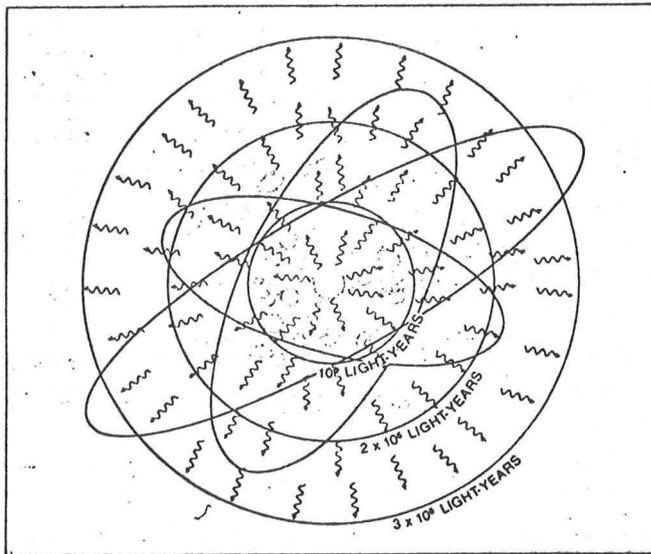


Abb. 2.7

RIESEN GALAXIEN-HAUFEN!

Schematische Darstellung eines Riesenhaufens von mehr als 1 000 Mitgliedern. Sie sind gravitativ aneinander gebunden innerhalb eines Radius von etwa 3×10^6 L.J. Die Galaxiendichte nimmt gegen das Zentrum zu, ebenso das heiße Gas, welches Röntgenstrahlen emittiert (Schlangenlinien). In einem Riesenhaufen beträgt der Anteil der Spiralgalaxien etwa 20%. Die Mehrzahl sind elliptische Galaxien. Im Zentrum selbst ist üblicherweise eine Riesengalaxie (elliptisch) situiert, oder auch eine cD Galaxie (D bedeutet "heller elliptischer Kern" und c bedeutet "überriesengroß", dies ist aus der Sternklassifikation entnommen worden). Ein Riesenhaufen enthält auch üblicherweise Radiogalaxien in extrem ovaler (head-tail) Form.

Um eine derartige Gaswolke "halten" zu können, muß M 87 einige hundertmal mehr Masse besitzen, als etwa M 31 oder die Milchstraße. Das Halo dieser Galaxis hat eine Ausdehnung von 5×10^5 bis 10^6 L.J. (!). Um Sterne in diesem Halo gravitativ binden zu können, sind etwa einige $10^{13} M_{\odot}$ notwendig (unsere Galaxie besitzt $1,5 \times 10^{11} M_{\odot}$). Derartige Massenansammlungen könnten ebenfalls das Problem der "fehlenden Massen" lösen helfen. Auch das Vorhandensein von Eisen im Röntgenspektrum von M 87 deutet ebenfalls auf ungeheure nicht direkt beobachtbare Massen hin. Eine Idee gewann hier sehr an Boden, daß etwa zusätzlich Sterne mit geringer Helligkeit in einem massiven Halo um die Riesengalaxie angeordnet sind.

Auch im PERSEUS-Riesengalaxienhaufen tauchen die Probleme der "fehlenden Massen" extrem stark auf. Um das Energiegleichgewicht herzustellen (Eisen im X-RAY-Spektrum) müßte 20mal mehr Masse vorhanden sein, als beobachtet werden kann!

Wir fassen zusammen:

- 1.) Um die Clusters zusammenhalten zu können, müßte etwa 10 bis 20mal mehr Masse vorhanden sein, als beobachtet werden kann.
- 2.) Studien über die Röntgenstrahlung zeigen, daß Großhaufen von Galaxien eine beträchtliche Menge an heißer gasförmiger Materie an sich binden. Dies wird mit Hilfe der Radioastronomie festgestellt. Auch hier müßte 10 bis 20mal mehr Masse vorhanden sein.
- 3.) Viele Großhaufen enthalten eine zentral gelagerte Riesengalaxie mit einem Halo von schwachen Sternen, welche eine starke Radioemission abstrahlen.

Die großen Galaxienhaufen erscheinen als eine Folge von Wirbelbewegungen der gravitierenden Massen. Sie besitzen 3 Hauptkomponenten: Galaxien, zusätzliche Sterne im Halo der Zentralriesengalaxie

und heißes Gas. Die Galaxien umkreisen das Zentrum wie Planeten die Sonne. In diesen Großhaufen sind die Galaxien so groß, so zahlreich und so dicht gepackt, daß Zusammenstöße unvermeidbar sind. In diesen Fällen prallen sie nicht aufeinander, vielmehr entstehen Deformationen beim Vorbeigang (siehe Abb. 2.1).

Das Studium der "rich clusters" liefert vielleicht einen wichtigen Hinweis auf die Gesamtmasse des Kosmos. Wenn die Gesamtmasse 10mal größer ist als beobachtet (wie das mehrfach festgestellt wurde) und man überträgt dies auf die kosmische Dichte, so könnte das Universum doch ein "geschlossenes" sein. Denn gerade um diesen Faktor 10 ist die Dichte zu gering, wie Untersuchungen gezeigt haben, um ein "geschlossenes" Universum ableiten zu können. Doch darüber im nächsten Kapitel.

3. DIE URKNALLTHEORIE - DER URSPRUNG DES WELTALLS

Die Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung durch A.A. PENZIAS und R.W. WILSON war zweifellos ein weiterer Markstein für die kosmologischen Theorien, wodurch die "Urknalltheorie" [12] einen bedeutenden Stellenwert in der Kosmologie erhalten hat, so daß ein Eingehen auf diese Theorie als Vorkapitel zur Theorie der kosmologischen Modelle erscheint.

3.1. ZUR ENTDECKUNGSGESCHICHTE [20]

Der Entdeckung der Hintergrundstrahlung (HG-Strahlung) ist rückblickend dieselbe Bedeutung beizumessen wie jener der Entdeckung der Pulsare, der Schwarzen Löcher oder der Quasare. Wie viele andere große Entdeckungen der Naturwissenschaften schon Jahrzehnte vorher ihre Schatten vorauswerfen, so wurde auch hier schon in den dreißiger Jahren dieses Jahrhunderts ein beobachtungsmäßiger Hinweis auf die HG-Strahlung geliefert. Mc. KELLAR vom Astrophysikal Observatory, Viktoria, Kanada, fand in den Spektren einiger heller Nebel interstellare Moleküle mit erhöhtem Energieniveau. Erklärungen, welche durch Kollision mit den Photonen des Sternenlichtes eine Energieaufnahme nachweisen wollten, erwiesen sich bei exakter Durchrechnung als unhaltbar und man vergaß schließlich das Problem!

Im Jahre 1948 sagte G. GAMOW theoretisch die Hintergrundstrahlung voraus, wobei er seine Prognose auf eine, in den zwanziger Jahren formulierte Theorie von der Entstehung des Weltalls, aufbaute. Ausgehend von der EINSTEINSchen A.R.T einerseits und der beobachteten Rotverschiebung entfernter Galaxien (HUBBLE) andererseits, stellte man sich ein expandierendes Weltall vor, daß vor Milliarden Jahren aus einem überdichten Zustand hervorgegangen sein mußte. Im Jahre 1927 sprach z.B. G. LEMAITRE vom "Uratom". Nach seinen Vorstellungen mußte die Strahlung der eines schwarzen Körpers mit einer Temperatur von 25° K entsprechen. Im Jahre 1956 revidierte er seine Angabe aufgrund neuerer Berechnungen auf 6° K (1). Die Arbeit wurde bald vergessen, da sie auch Theorien über gewisse Kernfusionen enthielt, die sich nicht halten ließen. Zwei sowjetische Forscher schlugen 1964 vor, man sollte als geeignetes Instrument zur Entdeckung der HG-Strahlung eine neue 20-Fuß Horn-Antenne der Bell-Laboratorien in Holmdel N.J. USA. verwenden. Unabhängig davon wurden zur selben Zeit etwa mit demselben Radioteleskop Tests durchgeführt um eine bessere Verbindung mit dem Nachrichtensatelliten "TELSTAR" herstellen zu können. Dabei entdeckten A. PENZIAS und R. WILSON eine Strahlung, die gleichförmig von allen Richtungen des Alls die Horn-Antenne erreichten. Nach Reduktion aller bekannten Strahlungsquellen, sowie möglicher Störeinflüsse innerhalb der Empfängeranordnung blieb immer noch die Strahlung eines Schwarzkörpers mit einer Temperatur von rund 3° K übrig.

Inzwischen hatten sich auch R. DICKE und Mitarbeiter am Palmer Physical Laboratory der Princeton University N.J. erneut mit dem Problem der Weltall-Entstehung auseinandergesetzt. Sie gelangten zu einer HG-Strahlung, die der Intensität eines schwarzen Strahlers von $2,7^{\circ}$ K Temperatur entsprechen und deren Maximum bei einer Wellenlänge von $\lambda = 2$ mm liegen mußte. Ehe DICKE eine entsprechende Empfängeranordnung bauen konnte, hörte er von der Entdeckung durch PENZIAS und WILSON, welche mit ihrem Horn-Teleskop in Holmdel, nur eine Autostunde entfernt, postiert waren. Und so kam es zu der eigentümlichen Doppelpublikation im "Astrophysical Journal" vom 1. Juli 1965: "Cosmic black-body radiation" von R.H. DICKE und Mitarbeiter und "A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s" von A.A. PENZIAS and R.W. WILSON (Mc/s = Megahertz).

Die Messungen in Holmdel erfolgten zunächst auf einer Wellenlänge von 7,35 cm und zeigten vollständige Isotropie. DICKE und Mitarbeiter konnten kurze Zeit später ebenfalls mit ihrer Einrichtung die HG-Strahlung bestätigen. In den folgenden Jahren wurde diese Strahlung von zahlreichen anderen Forschergruppen vor allem in den kürzeren Wellenlängenbereichen untersucht. Es zeigte sich, daß die Strahlung in allen Wellenbereichen die erforderliche Intensität lt. PLANK-Kurve (s. nächster Abschnitt) aufwies. Auch die Isotropie der Strahlung wurde bestätigt. Mit dieser Entdeckung hat die Urknalltheorie (Big Bang-Theory) einen gewaltigen Auftrieb und die Steadystate-Theorie von F. HOYLE u.a. eine ebensolche Abwertung erfahren. Andere Autoren versuchten in der Folge andere Erklärungen für die HG-Strahlung, jedoch bislang vergeblich.

3.2. DIE THEORIE DER HINTERGRUNDSTRAHLUNG

Bei der im vorigen Kapitel erwähnten Horn-Antenne konnte durch Anbringung rauscharmer Vorverstärker (Maser) das Eigenrauschen beträchtlich reduziert werden und eignete sich deshalb hervorragend für radioastronomische Zwecke. Mit dieser Antenne wollten die beiden Radioastronomen PENZIAS und WILSON auch die Intensität von Radiowellen messen, die von unserer Galaxie aus deren Hauptebene emittiert werden. Diese Radiowellen und die aus der Mehrzahl der übrigen kosmischen Quellen stammenden Radiowellen kann man bestenfalls als eine Art von "RAUSCHEN" charakterisieren, Dieses Rauschen ist schwer zu unterscheiden vom "EIGENRAUSCHEN", das durch die thermischen Bewegungen der Elektronen innerhalb der Antenne und der Verstärkeranlage erzeugt wird und von dem Radorauschen, das die Antenne aus der irdischen Atmosphäre aufnimmt.

PENZIAS und WILSON begannen ihre Beobachtungen bei einer Wellenlänge von 7,35 cm bei der eigentlich kein Radorauschen aus unserer Galaxie zu erwarten war. Aus der Erdatmosphäre konnte ein Rauschen erwartet werden, allerdings mit einer charakteristischen Richtungsabhängigkeit, d.h. zum Zenit schwächer (da die Mächtigkeit der Atmosphäre in dieser Richtung am geringsten ist) und zum Horizont hin stärker. Zu Ihrem Erstaunen verzeichneten jedoch PENZIAS und WILSON¹⁾ im Frühjahr 1964 bei der Wellenlänge von 7,35 cm ein beachtliches Rauschen, das von der Richtung unabhängig war. Außerdem war dieses "Störgeräusch" weder von der Tageszeit noch von der Jahreszeit abhängig. Daher lag der Schluß nahe, daß diese Radiowellen aus einem sehr viel größeren Abschnitt des Universums stammen müssen, als es die Milchstraße ist. Es blieb vorerst ein Geheimnis, woher dieses Mikrowellenrauschen stammte. PENZIAS und WILSON hatten als einziges quantitatives Ergebnis die Intensität des von Ihnen beobachteten Radorauschens zur Verfügung, das sie, wie unter Radiofachleuten üblich, beschrieben, das sich aber in diesem Fall als unerwartet folgenreich erwies:

1) A.A. PENZIAS und R.W. WILSON erhielten im Jahre 1978 den Nobelpreis für diese Entdeckung.

Jeder materielle Körper wird bei einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes stets ein Radorauschen emittieren, das durch die Wärmebewegung der Elektronen innerhalb des Körpers hervorgerufen wird. Innerhalb eines geschlossenen Behälters mit undurchlässigen Wänden hängt die Intensität des Radorauschens auf einer bestimmten Wellenlänge allein von der Temperatur der Wände ab und zwar: Je höher die Temperatur, desto intensiver ist das Rauschen. Man kann daher die auf einer bestimmten Wellenlänge beobachtete Intensität des Rauschens durch eine "Äquivalent-Temperatur" ausdrücken: Das ist die Temperatur der Wände eines Behälters, innerhalb dessen das Radorauschen die beobachtete Intensität haben würde, d.h. mit anderen Worten, stände die Antenne des Radioteleskops in einem undurchlässigen Behälter, dessen Wände die Äquivalent-Temperatur hätten, so ergäbe sich die gleiche Intensität des Radorauschens. Ob sich die Antenne tatsächlich innerhalb eines solchen Behälters befindet oder nicht, ist natürlich eine andere Frage. (Die "Antennentemperatur" drückt auch die Intensität des Rauschens aus, sie weicht von der Äquivalent-Temperatur etwas ab, dies ist aber in diesem Fall belanglos gewesen!)

PENZIAs und WILSON stellten eine Äquivalent-Temperatur des von Ihnen empfangenen Rauschens zwischen $2,5^{\circ}$ und $4,5^{\circ}$ K fest, im Mittel also $3,5^{\circ}$ K. Sie zögerten mit der Bekanntgabe ihrer Ergebnisse, denn es lag sicherlich nicht sogleich auf der Hand, daß dies der bedeutendste Fortschritt in der Kosmologie seit der Entdeckung der Rotverschiebung sich entfernender Galaxien durch HUBBLE war.

Kurz vorher sprach P.J.E. PEEBLES in einem Vortrag von einer Hintergrundstrahlung eines früheren Universums mit einer derzeitigen berechneten Äquivalent-Temperatur von 10° K. Diese Berechnungen gehen auf R.H. DICKE zurück, der als führender Experimentalphysiker aus Princeton einige der wichtigen Mikrowellenverfahren für Radioastronomen erfunden hatte. (Die Tabelle im Anhang gibt einen Überblick über die Eigenschaften einiger häufig vorkommender Strahlungsarten). Es muß, so schloß PEEBLES, während der ersten Minuten des Universums einen intensiven Strahlungshintergrund gegeben haben, der Kernreaktionen in rascher Folge verhindert hat. Wäre das nicht gewesen, so wäre der größte Teil des vorhandenen Wasserstoffs zu schwereren Elementen fusioniert worden und das steht im Widerspruch zu der Tatsache, daß das gegenwärtige Universum zu 75% aus Wasserstoff besteht. Diese "Urstrahlung" war mit enormer Äquivalent-Temperatur und sehr kurzer Wellenlänge imstande, Kerne ebenso rasch zu zersprengen, wie sie sich bilden konnten. Weiters muß durch die Expansion des Universums die Äquivalent-Temperatur stetig gesunken sein und zwar umgekehrt proportional zur Größe des Universums. Dies ist im wesentlichen eine Auswirkung der Rotverschiebung. Daraus folgt zwangsläufig, daß das gegenwärtige Universum ebenfalls mit Strahlung erfüllt sein muß, allerdings mit einer Äquivalent-Temperatur, die weit unter jener der ersten Minuten liegt. PEEBLES gab sie mit 10° K etwas zu hoch an. Dennoch war die Annahme grundsätzlich richtig und die Entdeckung von PENZIAs und WILSON fand dadurch eine natürliche Erklärung. Die Antenne von Holmdel befand sich tatsächlich in einem geschlossenen Behälter, nur ist dieser Behälter das UNIVERSUM.

Um nun die Frage zu beantworten, ob die von PENZIAs und WILSON entdeckte Strahlung tatsächlich ein Überbleibsel von den Anfängen des Universums ist, müssen wir die theoretischen Eigenschaften dieser Strahlung ableiten, wie sie sein müßten, wenn die kosmologischen Vorstellungen zutreffend sind! Um diese Frage zu beantworten, hat man zu untersuchen, was mit der Strahlung geschieht, wenn sie sich in einem seit rund 10 - 20 Milliarden Jahren expandierenden Raum befindet. Zum besseren Verständnis gelangt man durch die Vorstellung, daß elektromagnetische Strahlung durch "Quanten" repräsentiert wird und die Teilchen aus denen sie besteht heißen bekanntlich PHOTONEN. Sie haben weder Masse noch elektrische Ladung, jedoch eine bestimmte Energie, ein bestimmtes Moment und einen bestimmten Spin (Eigendrehimpuls) um ihre Fortpflanzungsrichtung.

Derzeit wandern die Photonen praktisch ungehindert Jahrmillionen und -milliarden durch das All. Wir wissen jedoch aus der Expansion des Alle (s. 4. Kapitel und (23)), daß das Universum einmal viel dichter und heißer gewesen sein muß. In den ersten 700 000 Jahren war das Universum so dicht und so heiß, daß der Inhalt noch nicht zu Sternen und Galaxien kondensieren konnte. Selbst die Atome waren noch in ihre Bestandteile aufgelöst. Unter diesen widrigen Bedingungen sind die Photonen ständig auf ihrer Bahn auf freie Elektronen gestoßen, die die Photonen streuten bzw. absorbierten. Wenn ein Photon von einem Elektron gestreut wird, gibt es einen geringen Energiebetrag an das Elektron ab, oder nimmt ihn von diesem auf, je nachdem, ob das Photon mehr oder weniger Energie besitzt als das Elektron. Ein derartiges System, in dem die Teilchen Zeit für vielfache Wechselwirkung haben, strebt einem Gleichgewichtszustand zu, den man gewöhnlich "thermisches Gleichgewicht" nennt, es ist dies ein statistischer Gleichgewichtszustand, der stets durch eine bestimmte Temperatur charakterisiert ist. Ein nahezu vollkommenes thermisches Gleichgewicht herrscht im Zentrum der Sterne. (Auf der Erdoberfläche gibt es nirgendwo auch nur annähernd ein thermisches Gleichgewicht und deshalb sind die Wetterprognosen so unsicher!) Auch das Universum hat sich nie in einem vollkommenen thermischen Gleichgewicht befunden, denn es dehnt sich ja laufend aus. In der Frühzeit jedoch, in der die Streuungs- bzw. Absorptionsrate einzelner Teilchen sehr viel höher war als die Expansionsgeschwindigkeit des Kosmos, könnte man jedoch sagen, daß sich das Universum "langsam" aus einem Zustand des nahezu vollkommenen thermischen Gleichgewichts in den anderen entwickelte. Alle Berechnungen von St. WEINBERG¹⁾ [12] gehen davon aus, daß das Universum tatsächlich einmal einen thermischen Gleichgewichtszustand durchlaufen hat, denn zufolge der statistischen Mechanik sind die Eigenschaften eines derartigen Systems vollständig determiniert, sobald wir die Temperatur und die Dichte einiger weniger Erhaltungsgrößen kennen, worüber im nächsten Abschnitt genaueres gesagt wird. Wir können heute den Gang der Ereignisse am Beginn des Universums nachvollziehen, ohne allzu viele willkürliche Annahmen zu treffen.

Wir nehmen also an, daß die entdeckte Hintergrundstrahlung aus der Zeit des thermischen Gleichgewichts des Universums stammt. Genau diese Frage nach den Eigenschaften einer Strahlung, die sich im thermischen Gleichgewicht mit der Materie befindet, führte zur Photonendeutung der Strahlung im allgemeinen: 1890 erkannte man, daß die pro Raumeinheit enthaltene Energie einer derartigen Strahlung mit fester Wellenlänge, durch eine allgemeine Formel gegeben ist, in der nur Wellenlänge und Temperatur vorkommen dürfen. Aus dieser Formel ergibt sich auch die Strahlungsintensität innerhalb unseres geschlossenen Behälters, und deshalb können die Radioastronomen die Intensität des beobachteten Radorauschens mit Hilfe eben dieser Formel durch eine "Äquivalent-Temperatur" ausdrücken. Aus dieser Formel ergibt sich außerdem die Stärke der Strahlung, die pro Sekunde und pro cm^2 bei gegebener Wellenlänge von einer vollständig absorbierenden Oberfläche emittiert wird und deshalb auch der Name einer solchen Strahlung "Strahlung eines schwarzen Körpers" oder kurz "schwarze Strahlung". Max PLANK stieß vor dem Jahre 1900 auf die richtige Formel der Schwarzkörperstrahlung, die in der Abb. 3.1. für eine Temperatur von 3°K wiedergegeben ist.

1) St. WEINBERG erhielt im Jahre 1979 den Nobelpreis für Physik

Energie pro Volumeneinheit
pro Wellenlängenintervall bei 3° K
(Elektronenvolt pro Kubikzentimeter pro Zentimeter)

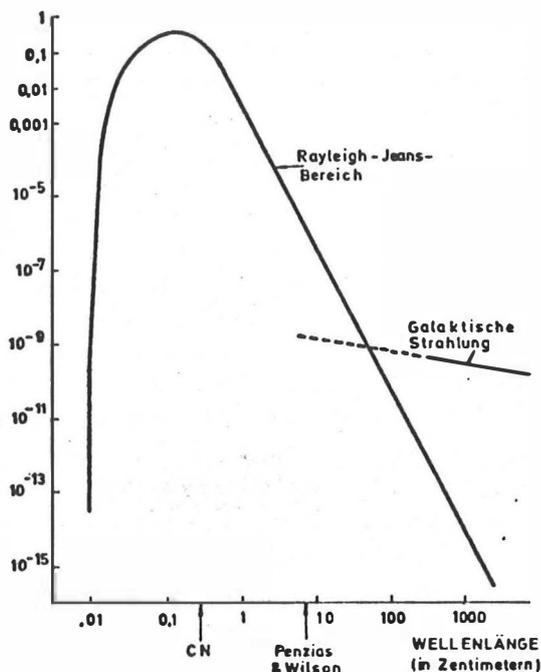


Abb. 3.1

Die PLANKSche Strahlungskurve ist allgemein gültig und materieunabhängig und gilt unter der Voraussetzung des thermodynamischen Gleichgewichtes. Die Energiedichte (eV pro cm³) pro Wellenlängenintervall (cm) ist in Abhängigkeit von der Wellenlänge dargestellt für eine Temperatur von 3° K. Für eine f mal größere Temperatur braucht man die Wellenlänge auf der Abszisse nur um 1/f zu verringern und die Energiedichte um einen Faktor f³ zu vergrößern. Das steile Abfallen links beruht auf der Quantennatur der Strahlung und ist spezifisch für die schwarze Strahlung. Die mit "galaktische Strahlung" bezeichnete Linie zeigt die Intensität des Radorauschens aus unserer Galaxie und die Pfeile zeigen die erste Messung von PENZIAS und WILSON, sowie die Wellenlänge bei der eine Strahlungstemperatur von interstellarem Cyan erschlossen werden konnte. Durch EINSTEINS's Beiträge, daß z.B. die Strahlung selbst in Quanten auftritt, führte die Entwicklung in den zwanziger Jahren zu einer großen geistigen Umwälzung in der Wissenschaft: die klassische Mechanik wurde durch die Quantenmechanik ersetzt.

Als das Universum bis auf 3 000° K abgekühlt war, wurde die Kombination von Kernen und Elektronen zu Atomen möglich. Das plötzliche Verschwinden der freien Elektronen zerriß den thermischen Zusammenhang zwischen Materie und Strahlung, worauf sich die Strahlung ungehindert ausbreiten konnte. Bei T = 3 000° K betrug die typische Wellenlänge 10⁻⁴ cm (0,29 cm : 3 000). Weiters wurden nun Photonen weder erzeugt noch vernichtet, daher nahm ihr typischer Abstand (= typische Wellenlänge d.i. der Mittelwert des statistisch verteilten Photonenabstands bei gegebener Anzahl in einem gegebenen Volumen)

proportional zur Expansion des Universums zu. Wie wir wissen, besteht die kosmologische Rotverschiebung darin, daß die Wellenlänge eines Lichtstrahls im selben Maß der kosmologischen Expansion gedehnt wird, wobei auch der mittlere Abstand zwischen den Photonen bei einer typischen (allerdings größeren) Wellenlänge geblieben sein dürfte, so wie es bei der schwarzen Strahlung der Fall ist. Daraus folgt, daß die das Universum erfüllende Strahlung weiterhin sich exakt durch die PLANKSche Formel beschreiben läßt. Die Temperatur der schwarzen Strahlung ist der typischen Wellenlänge umgekehrt proportional, muß also im reziproken Verhältnis zur Größe des Universums gesunken sein. Seit der Zeit, da die Temperatur $3\ 000^{\circ}$ K war, muß sich das Universum um einen Faktor 1 000 ausgedehnt haben, wenn die Hintergrundstrahlung derzeit 3° K mißt. Damit ist das 3° K-Radioreisenden das älteste Signal das Astronomen je empfangen haben bzw. je empfangen werden.¹⁾ Um nun festzustellen, ob sich die 3° K Strahlung gemäß der PLANKSchen Formel verhält, müßte sie in mehreren Frequenzbereichen überprüft werden. ROLL und WILKINSON aus New Jersey fanden bei einer Wellenlänge von 3,2 cm eine Äquivalent-Temperatur zwischen $2,5^{\circ}$ und $3,5^{\circ}$ K. Nunmehr ist seit 1965 bei mehr als einem Dutzend Wellenlängen zwischen 73,5 und 0,33 cm die Strahlung überprüft worden, wobei jede Messung mit einer Temperatur zwischen $2,7$ und 3° K dem Zusammenhang zwischen Energiedichte und Wellenlänge gemäß, der PLANKSchen Strahlungskurve entsprach. Damit scheint der Nachweis erbracht, daß die von PENZIAS und WILSON entdeckte Strahlung tatsächlich die schon lange theoretisch vorausgesagte Hintergrundstrahlung ist, welche vom Anfang des Universums, vom Urknall also, Kunde gibt. (Ich möchte gleich an dieser Stelle bemerken, daß z.B. AMBARZUMJAN und seine Schule in seiner "Kosmologie" (1) kein Wort über diese wichtige Entdeckung verliert und die Urknalltheorie samt Konsequenztheorien rundweg ablehnt, weil wichtige Voraussetzungen wie Isotropie und Homogenität für die daraus abgeleiteten kosmologischen Modelle seiner Ansicht nach nicht gegeben sind.)

Bei gegebener Temperatur steht also, wie bereits gesagt, die Anzahl der Photonen pro Volumseinheit verkehrt proportional zur dritten Potenz der typischen Wellenlänge (= Photonenabstand und damit direkt proportional zur dritten Potenz der Temperatur). Bei 1° K enthält ein Liter 20 282,9 Photonen, also enthält die 3° K-Strahlung etwa 550 000 Photonen/Liter. Die Dichte der Kernteilchen im derzeitigen Universum liegt bei 0,03 bis 6 Teilchen /1 000 Liter. (Die obere Grenze von 6 Teilchen/1 000 Liter ist der doppelte Wert der kritischen Dichte von $0,45 \times 10^{-29}$ g/cm³ (s. 4. Kapitel), der untere Grenzwert ist ein niedrigerer Schätzwert für die beobachtete Dichte in den Galaxien.) Somit entfallen zwischen 10^8 und 2×10^{10} Photonen je Kernteilchen. Dieses Verhältnis ist sehr lange konstant geblieben. Dies ist die wichtigste quantitative Schlußfolgerung aus den Messungen zur Mikrowellen-Hintergrundstrahlung. St. WEINBERG wählt für seine weiteren Betrachtungen ein Verhältnis von 10^9 Photonen je Kernteilchen. Daraus ergibt sich eine sehr wichtige Konsequenz, nämlich: Die Bildung von Sternen und Galaxien aus der Urmaterie konnte erst dann einsetzen, nachdem die kosmische Temperatur soweit gesunken war, daß die Elektronen durch Einfang neutrale Atome gebildet haben.

Wenn sich weiters Materieklumpen bilden sollen, wächst die Gravitationskraft mit der Masse des Klumpens, während der Druck von der Größe unabhängig ist: es gibt also eine minimale Masse ("JEANS MASSE"), bei der die gravitationsbedingte Objektbildung einsetzt. Diese JEANS-Masse ist proportional dem Druck exp. $3/2$ (s. math. Anhang). Bei $3\ 000^{\circ}$ K setzte die Atombildung ein; kurz davor herrschte ein enormer Strahlungsdruck und entsprechend groß war die JEANS-Masse, etwa eine Million großer Galaxienmassen; daher konnten noch keine Galaxien oder Galaxienhaufen zu jener Zeit entstehen. Mit dem Verschwinden freier Elektronen durch die Atombildung wurde das Universum für die Strahlung durchlässig und der Strahlungsdruck ging ins Leere, sank daher um einen Faktor von etwa 10^9 . Die JEANS-Masse sank daher um den Faktor $(10^9)^{3/2} = 10^{13,5}$ auf eine Masse von etwa 10^{-7} einer Galaxie wie der Milchstraße.

¹⁾ Sollte es jedoch eines Tages gelingen, Gravitationsstrahlung wirklich zu empfangen, so wäre diese um einige Sekunden älter.

$$(10^6 \times 5 \times 10^{11} M_{\odot} \times 10^{-13,5}) = 5 \times 10^{3,5} \approx 15\,000 M_{\odot}$$

große Galaxie (Art der Milchstraße)

Nun war die Stern- und Galaxienbildung möglich, damit sei aber nicht gesagt, daß der derzeitige Wissensstand in der Astrophysik ausreicht, um die Galaxienbildung zu verstehen. Die Theorie darüber ist eines der großen offenen Probleme und nach WEINBERG "... ein Problem, das von einer Lösung noch weit entfernt zu sein scheint..." Bei über $3\,000^{\circ}\text{K}$ jedenfalls bestand d. Kosmos nicht aus Sternen und Galaxien, sondern nur aus einer ionisierten und undifferenten "Suppe" von Strahlung und Materie. Aus dem enormen Verhältnis ($1 : 10^9$) zwischen Kernteilchen und Photonen ergibt sich weiters, daß es eine verhältnismäßig nicht so weit zurückliegende Zeit gegeben haben muß, in der die Strahlungsenergie größer war, als die in der Materie des Universums enthaltene Energie. Die Energie in der Masse eines Kernteilchens beträgt nach $E = mc^2$ etwa $939 \times 10^6 \text{ eV} = 939 \text{ MeV}$. Da die 3°K -Strahlung Photonen mit einer Energie von etwa $7 \times 10^{-4} \text{ eV}$ besitzt, besteht selbst bei 10^9 Photonen je Neutron oder Proton derzeit der größte Teil der Energie in Gestalt von Materie und nicht von Strahlung. Damit die Strahlungsenergie die Materieenergie übertrifft, muß beim festgelegten Verhältnis von $1 : 10^9$ das Photon eine Energie von 1 eV besitzen (s.o. $939 \times 10^6 = 10^9$), dies war der Fall bei einer rund $1\,300$ mal größeren Temperatur als heute, also bei etwa $4\,000^{\circ}\text{K}$. Diese Temperatur markiert daher den Übergang von einer "strahlungsdominierten" Ära zu der gegenwärtigen "materiedominierten" Ära. Das Universum war in diesem Zeitraum etwa $1\,000$ mal kleiner oder besser ausgedrückt, die Abstände zwischen zwei beliebigen kosmischen Objekten waren ein Tausendstel des heutigen Abstandes. Die ungeheure Energiedichte, welche die Strahlung im frühen Universum besaß, ist verlorengegangen durch die mit der Expansion des Universums einsetzende Rotverschiebung der Photonen-Wellenlänge (= Photonenabstand) und so konnten aus den beigemengten Kernteilchen und Elektronen die Sterne und Planeten samt Lebewesen des derzeitigen Universums entstehen.

3.2.1. DIE HINTERGRUNDSTRAHLUNG UND DIE ERDBEWEGUNG IM GESAMTKOSMOS [21]

Vor etwa einem Jahrhundert führten MICHELSON und MORLEY den berühmt gewordenen Versuch durch, eine "Aetherdrift" durch Lichtgeschwindigkeitsmessungen zu bestimmen. Wenngleich das unmittelbare Ergebnis negativ war, so lieferte der Versuch doch die Basis für weitgehende gedankentheoretische Aussagen. In letzter Zeit haben R.A. MULLER und Mitarbeiter und ein zweites Team, V.C. RUBIN und W.K. FORD Jr., mit äußerst empfindlichen Meßgeräten geringe Abweichungen in der Isotropie der Hintergrundstrahlung entdeckt und diese durch eine Bewegung zur Erde bzw. durch eine Bewegung des Sonnensystems und seiner "Nachbarschaft" gegenüber dem Universums-Hintergrund erklärt. Selbstverständlich wurde die Anisotropie nicht durch Geschwindigkeitsmessungen, wie von MICHELSON durchgeführt, festgestellt, (denn auch hier ist die Geschwindigkeit der einfallenden Photonen von allen Richtungen konstant, gleich der Lichtgeschwindigkeit) vielmehr konnten geringe Änderungen in der "Äquivalent-Temperatur" (s. PLANKSches Strahlungsgesetz) gemessen werden.

PENZIAs und WILSON stellten bei ihren Messungen fest, daß die Äquivalent-Temperatur (im folgenden nur noch "Temperatur" genannt) um weniger als 10% in den verschiedenen Richtungen variierten. Nun wurde mit höchstempfindlichen Instrumenten festgestellt, daß die 3°K -Hintergrundstrahlung um 1 Promille ($1^{\circ}/1000$) variiert, wobei die "heißeste" Region in Richtung zum Sternbild Löwe und die "kälteste" in Richtung zum Sternbild Wassermann weist. Die Temperaturänderung zwischen diesen Richtungen folgt einer Kosinusfunktion.

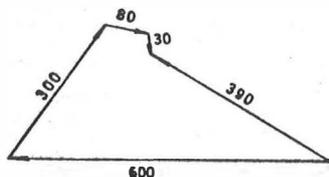
Das verwendete Instrument, eine Doppelantenne, von R.A. MULLER und Mitarbeiter konstruiert, empfing mit 33 Gigahertz ($\frac{300\,000 \text{ km/s}}{33 \times 10^9 \text{ Hz}} = 1 \text{ m}$ Wellenlänge) die Differenz der Temperatur der Strahlung aus 2 fixen Richtungen (deren Hauptachsen ca. 60°

zueinander geneigt waren) wobei sich die beiden Hornantennen 100 mal je Sekunde um eine Symmetrieachse drehten. An Bewegungen in der Galaxis sind bekannt:

1. die Rotation der Galaxis um ihr Zentrum, welche für das Sonnensystem 300 km/s beträgt,
2. jedoch um einen Betrag zu modifizieren ist, da z.B. u.a. auch eine Relativbewegung unserer Galaxis in Bezug auf die Andromeda-Galaxis in der Größenordnung von etwa 80 km/s durch Doppler-Messungen bestimmt, zu berücksichtigen ist und
3. schließlich die Erdbewegung um die Sonne mit rund 30 km/s

Zu Beginn des Experiments war bekannt, daß die Isotropie um weniger als 1 : 500 abweichen sollte, gemäß einer sehr präzisen Messung von WILKINSON und PARTRIDGE von Princeton.

Die maximale Temperatur lag 0,0035 Grad über dem Durchschnittswert. Die in dieser Richtung daraus resultierende Relativgeschwindigkeit gegenüber dem "Hintergrund" ergibt sich als Quotient aus Temperaturabweichung durch den Mittelwert vervielfacht mit der Lichtgeschwindigkeit, also:



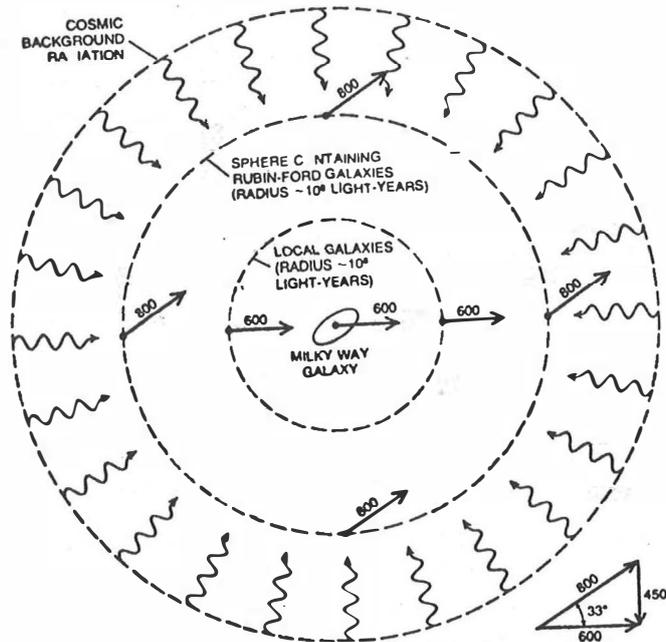
$$\frac{0,0035^{\circ}}{2,7^{\circ}} \times 300\ 000\ \text{km/s} \approx 390\ \text{km/s}$$

Wenn die Geschwindigkeitsvektoren aller Bewegungen addiert werden, so ergibt sich daraus eine Relativbewegung der Milchstraße gegenüber der kosmischen Hintergrundstrahlung von 600 km/s! Wenn man die Temperaturänderung nach der Kosinusfunktion (s.o.) berücksichtigt, so gelangt man zu einer Isotropie von besser als 1 : 3 000 aus welcher man wieder exakte Aussagen zu verschiedenen Phänomenen machen kann:

1. Die Rotationsgeschwindigkeit der Galaxis muß kleiner sein als $10^{-2/9} = 2/3$ Bogensekunden je Jahrhundert sein.
2. Die Gravitationswellen sind nicht energiereich genug, um die Expansion des Alls umzukehren (also vorläufig offenes All wie auch die Dichteberechnungen für den Kosmos immer wieder ergeben, wobei von "fehlenden Massen" gesprochen wird).
3. Die Isotropie beträgt in ihrer Auswirkung einen Wert kleiner als 1/3 000 (s.o.)
4. Es existiert kein Hinweis einer Frühformierung von Galaxienhaufen.

Das faszinierendste Ergebnis ist wohl die kosmologische Galaxiengeschwindigkeit. Da die Relativbewegung zur Andromedagalaxis klein ist (80 km/sec), muß auch diese mit der Milchstraße durch den Kosmos eilen. Da auch die Peculiargeschwindigkeit unserer lokalen Galaxiengruppe (TAFEL 15) relativ zum VIRGO-Riesenhaufen gering ist, muß sich auch der gesamte Virgohaufen mit einer Ausdehnung von einigen zehn Millionen Lichtjahren mit etwa der Milchstraßen-Geschwindigkeit durch das All bewegen. Eine wahrlich faszinierende Vorstellung! Das Bild wird noch komplizierter und gigantischer, wenn wir die Ergebnisse des Teams V.C. RUBIN und W.K. FORD jr. mit den obigen kombinieren. Sie bestimmten spektrographisch die Bewegung der Milchstraße relativ zu einer etwa 10^8 L.J. entfernten Spiralgalaxien-Sphäre mit 450 km/sec. Die von MULLER und Mitarbeitern gefundene Geschwindigkeit beträgt 600 km/sec und die Richtungen der Geschwindigkeitsvektoren stehen um mehr als 100° voneinander ab. Die Erklärung könnte sein, daß die RUBIN-FORD-Galaxiensphäre sich mit einer kosmologischen Geschwindigkeit von 800 km/sec und einem

Winkel von 33° zur MULLER-Fluchtrichtung bewegt, so daß eine Resultierende von 450 km/sec folgt (s. Abb. 3.2)



Zusammenfassend ergibt sich ein Bild beträchtlicher Turbulenzen im All, wobei das HUBBLE-Expansionsgesetz zum Teil gestört erscheint. Dies ergibt aber wieder einen gewissen Widerspruch zur Isotropie der Hintergrundstrahlung von kleiner als 1 : 3 000. Wir dürfen allerdings nicht vergessen, daß die Bewegungserscheinungen charakteristisch für das derzeitige Universum sind, während die Hintergrundstrahlung gewissermaßen eine Momentaufnahme des Universums vor 15 bis 20 Milliarden Jahren ist!

3.3. DIE ERSTEN MINUTEN DES KOSMOS

3.3.1. DAS HEISSE UNIVERSUM - DIE URSUPPE

Ein wesentlicher Zusammenhang im Universum besteht zwischen Temperatur und Größe des Universums. Und zwar ist die Temperatur verkehrt proportional zur Größe des Universums. Glücklicherweise gilt diese einfache Relation auch unter Berücksichtigung der Tatsache, daß die Strahlung sich nicht ungehindert ausbreiten konnte, wie dies in den ersten 3 Minuten der Fall war. Wir können als sehr berechtigt annehmen, daß das Universum $30\,000^\circ\text{K}$ Temperatur hatte, als es 10 000 mal kleiner als heute war. Noch weiter in der Geschichte des Universums zurückblickend, gelangen wir zu einem Zeitpunkt, zu dem die Temperatur so hoch war, daß Zusammenstöße zwischen Photonen aus reiner Energie materielle Teilchen zu erzeugen vermochten, welche für die ersten Minuten ebenso wichtig wie die Strahlung waren, da sie bestimmend sowohl für die Häufigkeit diverser Kernreaktionen als auch für die Expansionsgeschwindigkeit des Alls waren.

Ein materielles Teilchen hat eine "Ruheenergie" von $E = mc^2$. Damit ein Teilchen der Masse m entstehen kann, muß die Energie der einzelnen Photonen mindestens mc^2 oder größer sein. Ist sie größer, wird die überschüssige Energie zur Beschleunigung des materiellen Teilchens verwendet. Eine einfache Faustregel besagt: Die durchschnittliche Photonenenergie (E_{ph}) ist gleich der Temperatur (der Strahlung)

multipliziert mit der BOLTZMANN-Konstante (0,0008617 eV pro Grad Kelvin). Für 3 000⁰ K, als das Universum gerade strahlungsdurchlässig wurde, ergab sich demnach eine Photonenenergie 3 000 x 0,0008617 = 0,26 eV.

Damit nun materielle Teilchen entstehen können, muß die Temperatur gleich sein mc^2 geteilt durch die BOLTZMANN-Konstante. Daher gibt es für jede Art von Teilchen eine "Schwellentemperatur" die erreicht werden muß, ehe ein Teilchen dieser Art aus Strahlungsenergie erzeugt werden kann. Ein praktisches Beispiel soll dies erläutern: Die Ruheenergie eines Elektrons oder Positrons (e^- oder e^+) mc^2 beträgt 0,511003 x 10⁶ eV. Dividieren wir diesen Wert durch die BOLTZMANN-Konstante, so erhalten wir 6 x 10⁹ °K, also 6 Milliarden Grad Kelvin! Sobald diese Temperatur überschritten wird, steht der Erzeugung von Elektronen und Positronen durch Zusammenstöße zwischen Photonen nichts mehr im Wege, und folglich werden sie auch bei diesen Temperaturen (größer als 10⁹ Grad Kelvin) reichlichst vorhanden sein. (Vergleich: Zentraltemperatur der Sonne 15 x 10⁶ Grad Kelvin). Entsprechende Überlegungen gelten für jede Teilchenart. (Die Existenz von Antiteilchen ist eine direkte mathematische Konsequenz aus den Prinzipien der Quantenmechanik und der Speziellen Relativitätstheorie und wurde erstmalig 1930 von A.M. DIRAC theoretisch hergeleitet. 1932 wurde dann das Positron tatsächlich entdeckt. Das Antiproton wurde in den fünfziger Jahren in Berkeley entdeckt). Zur Erzeugung von Myonen aus Strahlung (zweitleichteste Teilchen nach Elektron bzw. Positron) mit einer Ruheenergie von 105,6596 x 10⁶ eV ist eine Temperatur größer als 1,2 x 10¹² °K vonnöten. Im Anhang ist eine Tabelle mit Schwellentemperaturen verschiedener Teilchen zu finden. Zu verschiedenen Zeitpunkten in der Geschichte des Universums waren immer die Teilchen vorhanden, deren Schwellentemperatur tiefer ist, als die Temperatur des Universums zu jener Zeit war.

Aus der grundlegenden Bedingung des thermischen Gleichgewichts folgt, daß die Anzahl der Teilchen jeder Art mit geringerer Schwellentemperatur als der gerade vorherrschenden, etwa gleich sein muß der Photonenzahl. Zur Zeit also, wo die Temperatur größer als 6 x 10⁹ Grad Kelvin war, muß das Universum überwiegend aus Elektronen und Positronen bestanden haben. Die Energiedichte des Universums war zu jener Zeit proportional der 4. Potenz der Temperatur (T^4) mal der effektiven Zahl jener Teilchenart (Tabelle im Anhang), deren Schwellentemperatur von der kosmischen Temperatur übertroffen wurde. Nun zur Frage der Temperatur und der Expansionsgeschwindigkeit. Die Expansionsgeschwindigkeit ist proportional der Wurzel des Dichtewertes

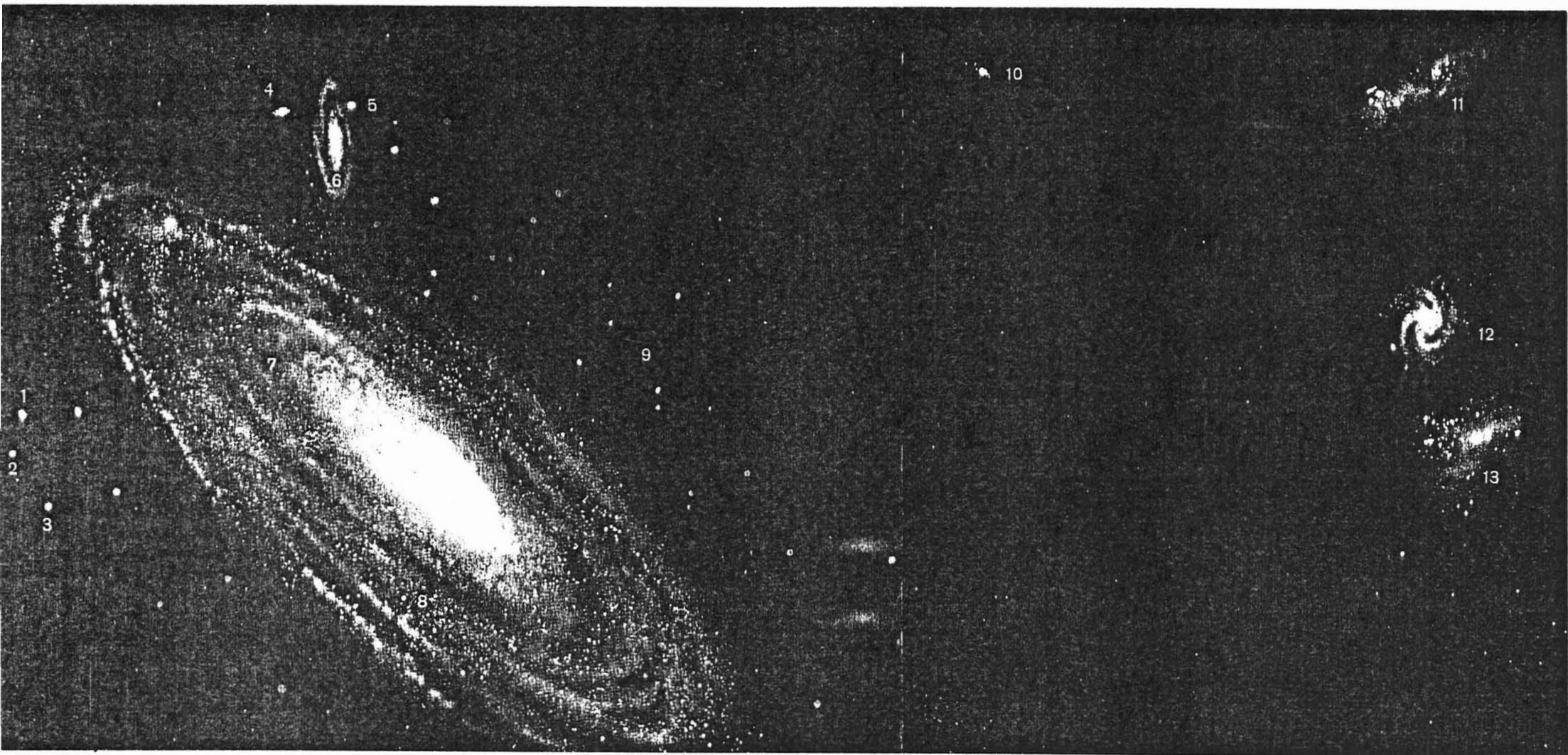
$$t_{\text{exp}}(t) = \frac{1}{H(t)} = \sqrt{\frac{3}{8\pi\rho(t)G}}$$

eine Formel, die im 4. Kapitel noch eine bedeutende Rolle spielen wird.

Da die (Energie) Dichte jedoch proportional zur 4. Potenz der Temperatur ist, gilt: Die Zeit ($t_2 - t_1$), die das Universum benötigt, um sich von einer Temperatur (T_1^0) auf eine andere (T_2^0) abzukühlen, ist proportional der Differenz der Kehrwertquadrate dieser Temperaturen, also:

$$t_2 - t_1 = \text{const.} \cdot \left(\frac{1}{T_2^2} - \frac{1}{T_1^2} \right)$$

So dauert z.B. (s. Anhang) die Abkühlung von 100 x 10⁶ °K auf 10 x 10⁶ °K 0,06 Jahre (22 Tage), von 10 x 10⁶ °K auf 1 x 10⁶ °K bereits 6 Jahre und weiter auf 10⁵ °K bereits 600 Jahre. Die Abkühlung auf 3 000⁰ K (bis zur Strahlungsdurchlässigkeit) demnach rund 600 000 Jahre. Die Verteilung in der Urmaterie muß zugunsten der Elektronen und Protonen gegenüber deren Antiteilchen ausgefallen sein, denn wären sie gleichmäßig verteilt gewesen, so wäre bei einer Temperatur kleiner als 1 x 10⁹ °K, nur noch Strahlung übriggeblieben, dagegen gibt es einen sehr schlagkräftigen Beweis, nämlich die Existenz von Materie im Kosmos. Um nun die Ingredienzien aus dem das frühe Universum entstand, festzustellen, hilft uns der Umstand, daß dieses Uruniversum im thermischen Gleichgewicht war. Wenn sich nun ein System im thermischen Gleichgewichtszustand



TAFEL 15: Unser "lokales" Galaxiensystem

1 NGC 278

2 NGC 147

3 NGC 185

4 NGC 205

5 NGC 221-

Andromeda-
Begleiter

6 Andromeda-
nebel

7 Milchstraße

8 Ort der Sonne

9 Kugelhaufen

10 NGC 404

11 Kleine Magellansche Wolke

12 NGC 598

13 Große Magellansche Wolke

befindet, ändern sich gewisse "Erhaltungsgrößen" nicht. (Eine von diesen Größen ist die GESAMTENERGIE.) Kennen wir die Werte der Erhaltungsgrößen, so sind sämtliche Eigenschaften eines Systems im thermischen Gleichgewicht determiniert. Auf das frühe Universum angewendet heißt dies, wir brauchen "nur" zu wissen, welche physikalischen Größen während der Expansion erhalten geblieben sind, und welche Werte diese Größen hatten. Für ein System, das ausschließlich aus Strahlung und Teilchen bzw. Antiteilchen bestanden hat, braucht lediglich die Temperatur bekannt sein, um die Gleichgewichtsbedingungen entwickeln zu können. Wenn wir z.B. ein Glas Wasser bei 300°K (Zimmertemperatur) betrachten, so ist z.B. eine Erhaltungsgröße die Dichte von $3,3 \times 10^{22}$ Molekülen bzw. Ionen pro cm^3 (bei normalem Luftdruck auf Meereshöhe) gegeben und die Dichte von Wasserstoff-Ionen minus Hydroxyl-Ionen ist Null. Daraus läßt sich bereits ableiten, daß z.B. auf 1 Wasserstoff-Ion 500×10^6 Wassermoleküle entfallen. Hätte dieses Glas Wasser einige 10^6 °K, werden die Moleküle bzw. Ionen sehr leicht zerfallen und die Atome aus denen sie bestehen, verlieren sehr leicht ihre Elektronen. Erhaltungsgrößen sind in diesem Fall die Anzahl der Elektronen sowie der Sauerstoff- und Wasserstoffkerne. Die Dichte von Wassermolekülen plus Hydroxyl-Ionen muß aus der Gesetzmäßigkeit der statistischen Mechanik errechnet werden. Bei Temperaturen von einigen 10^9 °K wo Materie und Antimaterie aus reiner Energie (Strahlung) erzeugt und wieder vernichtet wird, gehört die Teilchenzahl einer bestimmten Art nicht zu den Erhaltungsgrößen, sondern hier bleiben nur noch die wenigen Erhaltungsregeln in Kraft, die unter allen denkbaren Bedingungen respektiert werden müssen (soweit wir derzeit wissen). Man nimmt an, daß es nur drei Erhaltungsgrößen gibt, deren Dichte in dem Rezept für das Frühuniversum eine Rolle spielen:

1. ELEKTRISCHE LADUNG: Der Nettobetrag (Teilchen - Antiteilchen) der elektrischen Ladung darf sich nicht ändern, denn widrigenfalls hätte die MAXWELLSche Theorie des Elektromagnetismus keinen Sinn. Diese ist die sicherste Erhaltungsregel. Nicht übersehen darf jedoch werden, daß im frühen Universum jedoch besonders die Quantenelektrodynamik von Bedeutung war.
2. BARYONENZAHLE: darunter versteht man die Protonen, Neutronen (Kernteilchen) und die etwas schwereren instabilen Teilchen, die als HYPERONEN bezeichnet werden. Baryonen und Antibaryonen können paarweise erzeugt und vernichtet werden, können auch in andere Baryonen zerfallen (wie etwa beim Beta-Zerfall). Die Gesamtzahl von Baryonen minus Antibaryonen ändert sich jedoch nicht (Erhaltungssatz). Protonen, Neutronen und Hyperonen haben vereinbarungsgemäß eine "Baryonenzahl" von +1, die entsprechenden Antiteilchen eine solche von -1. Eine dynamische Bedeutung scheint die Baryonenzahl nicht zu besitzen.
3. LEPTONENZAHLE: zu den Leptonen zählen die leichten, negativ geladenen Teilchen, wie Elektron, Myon, Tauon und das neutrale Neutrino und die Antiteilchen Positron, Antimyon und das Antineutrino. Die Erhaltung der Leptonenzahl ist eine weitere Erhaltungsgröße (Gesamtzahl der Leptonen minus Antileptonen bleibt konstant).

Ein Beispiel für das Wirken dieser Erhaltungssätze liefert der radioaktive Zerfall eines Neutrons n in ein Proton p , ein Elektron e^- und ein Antineutrino $\bar{\nu}_e$:

	n	p	$+e^-$	$+\bar{\nu}_e$	n	d.h., summiere ich die mittleren
Ladung	0	1	-1	0	0	3 Spalten zeilenweise (letzte
Baryonenzahl	+1	+1	0	0	+1	Spalte), erhält man wieder die
Leptonenzahl	0	0	+1	-1	0	Werte des Neutrons n .

Aus den Erhaltungsregeln können wir entnehmen, welche Reaktionen nicht vorkommen können. Um das Rezept der Zusammensetzung des Universums zu einem bestimmten Zeitpunkt zu vervollständigen, müssen wir also neben der Temperatur auch noch die Ladung, Baryonenzahl und Leptonenzahl je Volumseinheit kennen. Die Erhaltungsregeln sagen dann, daß die Beträge dieser Größen (z_{LBL}) in einer ausdehnenden Volumseinheit erhalten

bleiben, d.h., die drei Werte sind verkehrt proportional der dritten Potenz der linearen Größe des Universums. Weiters ist die Zahl der Photonen, wie wir bereits wissen, proportional der dritten Potenz der Temperatur ($z_{ph} = \text{const} \times T^3$) und die Temperatur ist wieder verkehrt proportional der linearen Größe des Universums ($T^0 = \text{const} \frac{1}{R(t)}$). Daraus folgt, daß Ladung, Baryonen- und Leptonenzahl je Photon UNVERÄNDERT bleibt.

$$(z_{ph} = \text{const} \times T^3 = \text{const} \frac{1}{R(t)^3} ; z_{LBL} = \text{const} \frac{1}{R(t)^3}, \text{ daher } z_{ph} = \text{const} z_{LBL}).$$

Genauer gesagt, ist nicht die Anzahl der Photonen je Volumseinheit, sondern die Entropie je Volumseinheit verkehrt proportional zur dritten Potenz der Größe $R(t)$ des Universums. Die Entropie ist abgesehen von einem auf Konvention beruhenden Faktor in Annäherung gegeben durch die Gesamtzahl sämtlicher Teilchen im thermischen Gleichgewicht (Materieteilchen plus Photonen mit entsprechenden Gewichten lt. Tabelle im Anhang).

Die NETTOLADUNG des Universums muß Null sein, denn sonst würden die elektrischen Kraftlinien das Universum ständig umkreisen und schließlich ein unendliches elektrisches Feld aufbauen. Sowohl in einem offenen (hyperbolischen) als auch geschlossenen (elliptischen) Universum (s. nächstes Kapitel) kann man mit Sicherheit sagen, daß die elektrische Ladung je Photon *v e r n i c h t l ä s s i g b a r* ist. ¹⁾

Die BARYONENZAHL pro Photon ist abschätzbar und wurde bei der 3^0 K-Hintergrundstrahlung mit etwa 10^9 Photonen je Kernteilchen festgestellt, so daß die Baryonenzahl je Photon 10^{-9} beträgt. Diese bemerkenswerte Schlußfolgerung wird erst richtig in ihrer Bedeutung ersichtlich, wenn wir folgendes überlegen: zum Zeitpunkt, als die kosmische Temperatur 10^{13} °K war (höher als die Schwellentemperatur der Protonen und Neutronen, s. Tabelle im Anhang), enthielt das Universum in großer Fülle Kernteilchen und Antiteilchen, etwa ebenso viele wie Protonen. Die Baryonenzahl ist bekanntlich die DIFFERENZ zwischen der Anzahl von Teilchen und Antiteilchen, ergodessen muß die Anzahl der Kernteilchen nur um 1 zu 10^9 über der Anzahl der Antiteilchen gelegen sein! Wenn das so ist, dann haben sich die Teilchen und ihre Antiteilchen fast vollständig vernichtet, als die Temperatur unter die Schwellentemperatur der Kernteilchen sank und nur der winzige Überschuß an Teilchen gegenüber Antiteilchen verwandelte sich in die Welt, die wir sehen.

Durch dieses winzige Verhältnis 1 zu 10^9 im Überschuß Materieteilchen zu Antimaterieteilchen wurden einige Theoretiker verleitet, anzunehmen, daß dieses Verhältnis Null ist, d.h., daß gleichviel Materie und Antimaterie existiert, so daß es im Kosmos Bereiche mit Materie und Bereiche mit Antimaterie gibt (s. 4. Kapitel, Theorie von ALFVÉN). Bisher allerdings, hat niemand nennenswerte Mengen Antimaterie im Kosmos entdeckt ²⁾ und die kosmischen Strahlen, die auch extrem weit entfernten außergalaktischen Objekten entstammen, künden, daß diese fast nur aus Materie bestehen. Auch beobachtet man jene Photonen überhaupt nicht, die bei einer Vernichtung von Materie und Antimaterie im kosmischen Maßstab entstehen müßten.

Die LEPTONENZAHL könnte gleich der Baryonenzahl gesetzt werden, wenn die Neutrinos und die Antineutrinos nicht wären. Dies deshalb, weil die Anzahl der Elektronen etwa gleich der Anzahl der Kernteilchen ist. da ja die Gesamtladung des Universums Null sein muß. Die Neutrinos und ihre Antiteilchen haben die Leptonenzahl +1 bzw. -1. Sie sind äußerst schwierig zu erfassen, da es kaum eine Kraft gibt, auf welche die Neutrinos sonderlich reagieren. Nur die Gravitationskraft und die schwache Kraft beim radioaktiven Prozeß (s.o.) zeigen Wirkung, doch leider rufen diese Kräfte nur unbedeutende Wechselwirkung mit gewöhnlicher Materie hervor. (Als Beispiel sei erwähnt, daß man eine mehrere Lichtjahre dicke Bleiwand benötigte um ein Neutrino mit Sicherheit einzufangen.) Man ist also auf pure Annahmen bezüglich der Leptonenzahl angewiesen und nimmt sie als sehr klein an, denn sie resultiert ja ebenfalls aus der Differenz der Leptonen und Antileptonen. Aus all dem ergibt sich nun das fertige Rezept für das HEISSE UNIVERSUM wie folgt:

1) Beobachtungen haben die quantentheoretischen Überlegungen bezüglich der Null-Ladung des Photons bestätigt.

2) Es gibt Spekulationen, daß die Nichtbeobachtung von größeren Mengen von Antimaterie in unserem Universum offensichtlich Ausdruck eines noch nicht exakt formulierten *N a t u r g e s e t z e s* sein müßte.

Die charakteristische Expansionszeit beträgt 0,022 Sekunden und ist grob definiert 100 mal die Zeitdauer in der die Größe des Universums um 1% zunimmt. Exakt ist sie der Kehrwert der HUBBLE-Konstanten $H(t)$ zum jeweiligen Zeitpunkt. Das Alter des Universums ist stets kürzer als die charakteristische Expansionszeit, da die Gravitation die Expansion ständig abbremst. Positronen und Neutronen sind etwa zu gleichen Teilen vorhanden, haben sich aber noch nicht zu Kernen vereinigt. Es dominieren Elektronen, Neutrinos und ihre Antiteilchen sowie Photonen. Es gibt ständige Übergänge von Proton zu Neutron und umgekehrt.

ZWEITES BILD:

Temperatur 3×10^{10} °Kelvin Zeit $00^h 00^{min} 00^{sec} 1208$

Dichte $3,8 \times 10^7$ g/cm³
charakt. Expansionszeit 0,22 Sekunden

Seit dem ersten Bild sind 0,11 Sekunden vergangen. Die qualitative Zusammensetzung ist gleich geblieben. Es dominieren wie im ersten Bild Elektronen, Neutrinos und ihre Antiteilchen und Photonen, alle im thermischen Gleichgewicht. Die Energiedichte ist proportional zur 4. Potenz der Temperatur zurückgegangen und beträgt umgerechnet etwa 30×10^6 mal der Wasserdichte. Die Expansionsgeschwindigkeit ist proportional zum Quadrat der Temperatur gesunken, also um den Faktor rund 10; d.h., die charakteristische Expansionszeit ist auf 0.2 sec gestiegen. Das Verhältnis zwischen Neutronen und Protonen ist 38 zu 62 Prozent, da mit sinkender Temperatur sich die schweren Neutronen einfacher in die leichteren Protonen verwandeln als umgekehrt.

DRITTES BILD:

Temperatur 10^{10} °Kelvin Zeit $00^h 00^{min} 01^{sec} 1008$

Dichte $3,8 \times 10^5$ g/cm³
charakt. Expansionszeit 2 Sekunden

Seit dem ersten Bild sind 1,09 Sekunden vergangen. Da die Dichte und die Temperatur gesunken sind, ist die mittlere freie Zeit (Zeit bis zur nächsten Kollision) der Neutrinos und Antineutrinos so sehr gewachsen, daß sie beginnen sich wie freie Teilchen zu verhalten, die sich nicht mehr im thermischen Gleichgewicht mit den Elektronen, Positronen und Photonen befinden. Sie spielen von nun an keine aktive Rolle mehr, abgesehen davon, daß ihre Energie weiterhin zum Gravitationsfeld des Universums beitragen wird. Wenn die Neutrinos das thermische Gleichgewicht verlassen ("Auskoppelung") werden sie sich ungehindert ausbreiten, die allgemeine Rotverschiebung, durch die Expansion hervorgerufen, wird jedoch ihre Wellenlänge proportional zur Größe des Universums wachsen lassen. Da die Temperatur nur noch doppelt so hoch ist wie die Schwellentemperatur der Elektronen und Positronen beginnen diese sich jetzt rascher zu vernichten, als sie aus Strahlung wieder erzeugt werden. Eine Kernbildung ist noch nicht möglich. Das Verhältnis Neutronen und Protonen ist nun 24 zu 76 Prozent.

VIERTES BILD:

Temperatur 3×10^9 °Kelvin Zeit $00^h 00^{min} 13^{sec} 8308$

Dichte $3,8 \times 10^3$ g/cm³
charakt. Expansionszeit 22 Sekunden

Seit dem ersten Bild sind also 13,82 Sekunden vergangen. Die Schwellentemperatur der Elektronen und Positronen ist unterschritten und sie können sich nicht mehr aus der Strahlung bilden, sie beginnen nun rasch zu verschwinden. Die bei ihrer Vernichtung freigesetzte Energie verlangsamt die Abkühlung des Universums. Die Energiedichte des Universums nimmt nun rascher als proportional zur 4. Potenz des Temperaturrückganges

Heliumanteile, was für das STANDARDMODELL eine glänzende Bestätigung bedeutete. WAGONER hat für 3 angenommene Verhältniszahlen von Photonen zu Kernteilchen die Häufigkeitswerte des Deuteriums im frühen Universum berechnet. Würden wir nämlich diese Häufigkeit genau wissen, könnten wir aus der 3° K Strahlungstemperatur die exakte Kernmassendichte des Universums ableiten und wir wüßten, ob das Universum offen oder geschlossen ist. Gewisse Untersuchungen ergaben 20 Teile Deuterium auf eine MILLION Teilchen (nach Gewicht) woraus eine Dichte weit unterhalb der kritischen Dichte für ein geschlossenes Universum (4. Kapitel) folgt, also mußte es offen sein! Dennoch ist die Deuteriumhäufigkeit kein allzu schwerwiegender Beweis. Vielmehr hätte man durch die Kenntnis der Leptonenzahl (die wir als sehr klein vorausgesetzt haben) einen schlüssigen Beweis für die Richtigkeit unseres Standardmodells.

Zusammenfassend müssen wir feststellen, daß dieses Modell noch eine starke Ungewißheit in sich birgt: sämtliche Überlegungen basieren auf der Annahme des KOSMOLOGISCHEN PRINZIPS, d.h., daß das Universum *h o m o g e n* und *i s o t r o p* ist. Hiefür könnte die Neutronoviskosität ein gewisses physikalisches Rationale für diese Eigenschaften darstellen. Da die Hintergrundstrahlung, wie wir sahen, nahezu völlig isotrop ist (besser als 1:3 000), schlossen wir, daß auch das Universum seit der Zeit, da die Strahlung bei einer Temperatur von $3\ 000^{\circ}$ K das Gleichgewicht mit der Materie verließ, hochgradig homogen und isotrop gewesen ist. Was war aber vorher? Daß auch zu einem früheren Zeitpunkt das kosmologische Prinzip galt, dafür haben wir jedoch keinen Anhaltspunkt. (AMBARZUMJAN nimmt diese Ungewißheit zum Anlaß, die Berechnungen eines derartigen Standardmodells rundweg abzulehnen.) Überlegungen haben ergeben, daß eine anfängliche Anisotropie und Inhomogenität möglicherweise den berechneten und geschilderten Ablauf kaum beeinflußt hätten. Es könnte auch sein, daß unsere einfachen kosmologischen Modelle (4. Kapitel) vielleicht nur kleine Teile des Universums und einen begrenzten Ausschnitt aus seiner Geschichte beschreiben.

3.3.3. DIE ERSTE HUNDERTSTEL SEKUNDE

Es hat einen guten Grund, warum diese Zeitspanne der ersten 10^{-2} Sekunde separat betrachtet wird. Während der Ablauf nach der ersten 10^{-2} Sekunde einigermaßen und zum Teil sogar gut gesichert ist, stellt die erste hundertstel Sekunde der modernen Physik noch sehr viele ungelöste Probleme entgegen. Es sei gestattet, die bestehenden Theorien und Überlegungen nur stichwortartig zu nennen:

Druck und Temperatur waren so hoch, daß die Vielzahl der Elementarteilchen in einer derzeit noch unbekanntem Wechselwirkung standen. Die Teilchenphysiker haben eine Reihe interessanter Vorstellungen entwickelt, die jedoch auf den frühen Kosmos nicht so ohne weiteres anzuwenden sind. Die größte Schwierigkeit liegt in der mathematischen Erfassung eben der Wechselwirkung der zum größten Teil noch unbekanntem "HADRONEN". Wir wissen, daß Neutronen, Protonen, Pi-Mesonen, Hyperonen usf. dazugehören, aber es gibt hunderte von bekannten Hadronen, deren Schwellentemperatur unter 10^{14} °K liegt und es gibt vermutlich noch hunderte, die noch nicht entdeckt sind. In manchen Theorien ist diese Teilchenzahl sogar unbegrenzt. Nach dieser Theorie könnte es sogar eine "maximale Temperatur" (das Pendant zum Absoluten Nullpunkt) geben, bei der die Energiedichte unendlich wird. Diese Idee der maximalen Temperatur in der Hadronen-Physik geht auf R. HAGEDORN (CERN) zurück und wurde u.a. von St. WEINBERG weiter entwickelt. Der Wert ist erstaunlich "niedrig" und liegt bei 2×10^{12} °Kelvin!

Eine Weiterentwicklung rechnet die Hadronen nicht zu den Elementarteilchen, vielmehr setzen sich danach die Hadronen aus noch fundamentalere Teilchen zusammen, nämlich den QUARKS.¹⁾ Die Theorie geht auf M. GELL-MANN und G. ZWEIFIG zurück. Danach zerfallen die HADRONEN in QUARKS bei Temperaturen von einigen 10^{12} °K genau wie die

KERNE von Atomen in PROTONEN und NEUTRONEN (HADRONEN) bei Temperaturen von einigen 10^9 °K u.d.

¹⁾ Quarks sind lt. St. WEINBERG hypothetische Teilchen, die dem thermischen Gleichgewicht entkamen, bevor die Temperatur unter 10^{12} K sank. ZELDOVICH schätzt, daß ihre Dichte der von Gold-Atomen gleich ist, falls sie wirklich als freie Teilchen existieren. Bisher hat man sie in der Natur nicht entdeckt.

ATOME selbst in ELEKTRONEN und KERNE bei Temperaturen von einigen 10^3 °K zerfallen. Eine Theorie, die offenbar recht einleuchtend ist und, wenn sie zutrifft, die physikalischen Verhältnisse in den allerersten Stadien des Universums einfacher zu erfassen wären, als man glaubte. Eine Arbeitsgruppe vom MIT-Stanford-Linearbeschleuniger-Zentrum fand heraus, daß nämlich die Kraft zwischen den Quarks zu verschwinden scheint, wenn sie einander sehr nahe kommen! Eben weil diese Kraft zu verschwinden scheint, wird sie aber umso größer, je weiter sie sich voneinander entfernen, d.h., es gibt offenbar eben keine freien Quarks, sondern sie können nur zu zweit, wie die Mesonen oder zu dritt, wie die Baryonen auftreten. Man nennt diese Modell auch Bag-Modell. Aus all dem läßt sich errechnen, daß es einen Anfang gegeben haben muß, von unendlicher Dichte und ebensolcher Temperatur, der dem "ERSTEN BILD" um etwa 0,01 Sekunden vorausging. Dieses "Quarkmodell" wurde mittlerweile mehrfach positiv bestätigt. Allerdings, und das muß auch der Vollständigkeit halber mitgeteilt werden: selbst bei höchsten Energien ist es bisher nicht gelungen, in den größten Teilchenbeschleunigern ein HADRON in die es zusammensetzenden QUARKS zu zerlegen. Soviel über die starken Wechselwirkungen.¹⁾

Eine weitere moderne Theorie der Elementarteilchen beschäftigt sich mit den "schwachen Wechselwirkungen" und darnach hat nach D.A. KIRSCHNITZ und A.D. LINDE (Moskau 1972) das frühe Universum bei etwa 3×10^{15} °K ("Kritische Temperatur") einen "Phasenübergang" durchgemacht, der vergleichbar ist mit dem Phasenübergang den Wasser beim Gefrieren (273° K) durchmacht. Diese modernen Theorien der schwachen, der elektromagnetischen, der starken und möglicherweise der Gravitationskräfte sollten in den EICHTHEORIEN eine einheitliche Grundlage zum Verständnis all dieser Naturkräfte bieten.

Was geschieht bei einer Temperatur von 3×10^{15} °K mit der Gravitationskraft? Bisher hat man keinerlei Einfluß der Schwerkraft auf die inneren Eigenschaften der Bestandteile des frühen Universums "feststellen" können, einfach deshalb, weil sie zu schwach ist. (z.B. ist die Gravitationskraft zwischen Proton und Elektron nur 1×10^{-39} der elektrischen Kraft; L. PARKER hat gezeigt, daß das Schwerefeld 10^{-24} sec nach dem Anfang, immerhin eine so starke "Gezeiten"wirkung hatte, daß es aus dem leeren Raum (!) Teilchen und Antiteilchen-Paare erzeugen konnte, dennoch war die Schwerkraft zu schwach, als daß diese erzeugten Teilchen gegenüber denen, die sich bereits im thermischen Gleichgewicht befanden, ins Gewicht gefallen wären.) Gleichwohl ist vorstellbar, daß bei superhohen Temperaturen, Teilchen derart hohe Energien bekommen könnten, daß die Gravitationskräfte zwischen ihnen genau so stark werden, wie alle anderen Kräfte. Man schätzt eine Temperatur von 10^{32} °K für diesen Zustand ab. Bei dieser Temperatur könnte folgendes eintreten:

1. Die Gravitationsfelder (sie werden bekanntlich nicht nur durch Teilchenmassen, sondern durch Energie in jeglicher Form hervorgerufen) erzeugten Teilchen in großer Fülle.
2. Der "Horizont" (größte Distanz aus der Signale eingetroffen sein konnten) muß näher gewesen sein als eine Wellenlänge eines Typischen Teilchens im thermischen Gleichgewicht, d.h., jedes Teilchen war also, grob gesprochen, so groß wie das benachbarte Universum zu dieser Zeit!
3. Diese Temperatur von 10^{32} °K wurde etwa 10^{-43} Sekunden nach der Null-Zeit erreicht.

All diese Spekulationen und Schätzungen fänden eine phantastische Bestätigung, könnte man eine Hintergrund-GRAVITATIONS-STRAHLUNG von 1° K entdecken, dies ergibt sich, wenn man annimmt, daß die Gravitationsstrahlung sehr früh, eben etwa bei 10^{32} °K aus dem thermischen Gleichgewicht geraten ist, so wie "viel" später die Hintergrundstrahlung bei 3000° K (s. 3.2.). Die Chancen dafür sind praktisch Null (nach St. WEINBERG, S 205 [12]).

¹⁾ Es gibt in der Zwischenzeit Theorien, die besagen, daß es nicht möglich ist, freie Quarks zu sehen, zumindest nicht in unserem jetzigen Universum.

Die Frage nach der "Zeit" vor dem Urknall ist möglicherweise genauso ohne Sinn, wie die Frage nach einer Temperatur unter dem absoluten Nullpunkt von $-273,16^{\circ}$ C. Doch darüber noch mehr im nächsten Kapitel.

4. KOSMOLOGISCHE MODELLE

Des öfteren wurde bereits der Begriff "KOSMOLOGISCHE MODELLE" verwendet ohne dafür eine exakte Definition zu geben. Es ist, wie wir gleich sehen werden, diese Definition exakt auch nur für den mathematisch-physikalischen Anteil zu geben. Das Gesamtproblem umfaßt aber auch einen, wenn man will, religiös-philosophischen Abschnitt für den die Definition schon problematisch wird, weil sie von religiösen und philosophischen Lehren und der subjektiven Einstellung dazu abhängt. Obwohl, ganz kurz nur, diese Problematik angedeutet werden soll, wird die Definition der Aufgabe nur den mathematisch-physikalischen Anteil betreffen: Alle Bemühungen um ein Verständnis der astronomischen Probleme im kosmischen Bereich, führen unweigerlich zu der Frage nach der Struktur, der Entwicklung und dem Mechanismus des Universums (als Sammelbegriff für alle kosmischen Objekte) als Ganzem.

In den beiden ersten Kapiteln wurden Modellvorstellungen von Sternen und Galaxien dargestellt und diese mit den Beobachtungsergebnissen verglichen. Im 3. Kapitel wurde eigentlich schon das Problem der Kosmologie angerissen, da ja die ersten Minuten entscheidend für die gesamte weitere Evolution der Metagalaxis waren. Dennoch soll nun gezeigt werden, worin die Aufgabe ein WELTMODELL aufzustellen besteht. Dieses muß, in mathematische Form (Differentialgleichungen) gebracht, Forderungen erfüllen, die eine Anwendung von Methoden der exakten Naturwissenschaften erst möglich machen:

Es muß also solche Aussagen liefern, die es uns gestatten, seine wesentlichen Merkmale durch Experiment oder/und Beobachtung zu überprüfen.

Kein Standpunkt im Kosmos darf eine Sonderstellung einnehmen, dies zieht die Forderung nach HOMOGENITÄT nach sich. Jede Beobachtungsrichtung hat von der Struktur des Alls unabhängig zu sein, dies erfordert die ISOTROPIE des Alls. Diese beiden Forderungen heißen auch das "KOSMOLOGISCHE PRINZIP" und es geht auf A. EINSTEIN zurück und wurde von E. MILNE und H.W.Mc.CREA 1934 exakt formuliert.

Wir werden noch sehen, daß schließlich die relativistischen, also auf EINSTEINS Allgemeiner Relativitätstheorie aufgebauten Modelle derzeit die beste Übereinstimmung mit den Naturgesetzen und den Beobachtungsergebnissen liefern. Dennoch wissen wir heute noch nicht, welches spezielle Modell unserem Weltall tatsächlich gerecht wird.

4.1. NICHTMATHEMATISCHE MEINUNGEN UND THESEN

V.d. OSTEN-SACKEN [22] hat allgemeine philosophisch-religiöse Betrachtungen seinem Werk vorangestellt, die für die Problematik außerhalb der mathematisch-physikalischen Sphäre vielleicht von Interesse sein könnte.

Bevor wir nun, ganz kurz nur, auf diese Betrachtungen eingehen, müssen jedoch gewisse Vakuumfluktuationen erwähnt werden, die es erlauben, daß scheinbar aus dem Nichts Materie dann entsteht, wenn einfach der Energieinhalt des Vakuums, der nicht Null ist, sich materialisiert.

Der Schöpfungsgedanke ist von keinem der existierenden Weltmodelle umgehbar. Egal, nach welchen physikalischen Grundsätzen man das Problem betrachtet, steht am Anfang eine "Urmaterie" beliebiger Qualität und Quantität, von welcher die Berechnungen gewissermaßen ihren Ausgang nehmen. Eine Grundfrage ist, ob unsere Welt als nur MATERIELL anzusehen ist oder nicht. Wir wollen im folgenden einige mögliche Wege der Durchleuchtung der Probleme des Weltalls betrachten:

Es sollen alle Vorgänge als "naturhaft" bezeichnet werden, die nach naturwissenschaftlichen Gesetzen verlaufen bzw. verlaufen mußten, egal, ob wir die Gesetze schon kennen

oder nicht. Die biologischen Vorgänge mögen vorerst hier nicht enthalten sein.

Als "geistige" Vorgänge sollen all jene bezeichnet werden, die sich nicht durch physikalische und chemische Vorgänge erklären lassen oder bei denen naturwissenschaftliche Methoden nicht direkt anwendbar sind.

Ein Standpunkt wäre z.B. "geistige Vorgänge sind nicht naturhaft", d.h., geistige Vorgänge werden nie und nimmer naturwissenschaftlich erfaßbar sein, da sie prinzipiell etwas Andersartiges sind.

Zweiter Standpunkt wäre "geistige Vorgänge sind naturhaft", d.h., z.B. alle Empfindungen, Ideen, Gedanken beruhen letztlich auf biologischen Vorgängen, die zwar derzeit noch nicht erfaßt werden können, jedoch allesamt Naturgesetzen unterworfen sind.

Eine weitere Zweiteilung wird für die "naturhaften" Vorgänge notwendig, nämlich die Kausalität bzw. die Akausalität.

Unter Kausalität wollen wir verstehen, daß die Vorgänge nicht im Widerspruch zu den heute gültigen und uns bekannten Naturgesetzen stehen dürfen. Allerdings ergeben sich aus dieser Forderung sehr große Unbestimmtheiten, denn wie wir am Ende des 2. Kapitels gehört haben, ist bei vielen Physikern die Überzeugung, daß revolutionierende neue Erkenntnisse kurz oder mittelfristig bevorstehen, sehr stark, wie es AMBARZUMJAN (1) formuliert hat.

Schließlich soll die vierte Meinungsrichtung mit "möglicher Akausalität" bezeichnet werden. Darunter wollen wir jene Fälle verstehen, die gewissermaßen "Ausnahmefälle" darstellen und deren naturwissenschaftliche Gesetzmäßigkeit "nur" durch statistische Aussagen gesichert sind, wie es z.B. die mathematische Statistik für gewisse Vorgänge im wirtschaftlichen, aber auch im technischen Leben zu tun pflegt oder wie es z.B. in der statistischen Mechanik grundsätzlich gehandhabt wird. Auch im biologischen Bereich existieren offenbar derzeit für uns noch zahlreiche mögliche Akausalitäten. Aus diesen vier Meinungsrichtungen lassen sich, paarweise kombiniert, vier Weltanschauungen ableiten, die einen Niederschlag bei der Lösung kosmologischer Probleme außerhalb der mathematisch-physikalischen Sphäre finden:

1. Geistige Vorgänge sind nicht naturhaft - strenge Kausalität:

Diese Einstellung ist in der westlichen Welt sehr stark vertreten. Es gibt hier verschiedene Varianten. Die Kausalität ist im technisch-materiellen Bereich unbestritten, jedoch eine freie Willensbildung zugegeben, wiewohl die Gehirntätigkeit auf naturhafte Vorgänge zurückgeführt wird. In der Kosmologie wird die Neuschöpfung der Materie aus dem leeren Raum negiert, im mikrokosmischen Bereich beruft man sich auf noch unbekanntes physikalische Gesetzmäßigkeiten als Ursache scheinbarer Akausalität.

2. Geistige Vorgänge sind naturhaft - strenge Kausalität:

Diese Kombination kann man als typisch materialistisch bezeichnen. Auch in der Kosmologie werden von dieser Richtung klare Aussagen gemacht: Die Materie hat **e w i g** existiert, was entstanden ist, sind nur neue Formen der Materie. Eine Neuschöpfung ist ausgeschlossen. Der Schöpfungsgedanke auch für die "Urmaterie" ist als akausal abzulehnen.

Viele sowjetische Astrophysiker wehren sich z.B. der Gesamtdarstellung eines allgemeingültigen kosmologischen Modells zuzustimmen. AMBARZUMJAN nimmt z.B. zu den Erkenntnissen, die aus der Entdeckung der 3° K-Hintergrundstrahlung folgen, in seinem Buch (1) keine Stellung, er behauptet, die Voraussetzungen der Homogenität und der Isotropie seien keinesfalls gegeben, daher ist es müßig, ein Weltmodell auf dieser Basis zu berechnen, und dies trotz der einwandfrei erkannten Isotropie der Hintergrundstrahlung (3. Kapitel). Ein Zitat aus der großen Sowjet-Enzyklopädie (Leipzig 1953): "... Die These vom Anfang der Welt in der Zeit ist unvereinbar mit dem dialektischen Materialismus. ..."

3. Geistige Vorgänge sind nicht naturhaft - mögliche Akausalität:

Hieher lassen sich z.B. jene Religionen einstufen, deren Glaube an die Allmacht Gottes den Ablauf der Geschehnisse erklärt.

Im Bereich der Kosmologie ergibt sich daher:

Gott hat die Welt und damit alles Materielle geschaffen, aus dem Nichts.

Auch eine Neuschöpfung in heutiger Zeit ist möglich.

4. Geistige Vorgänge sind naturhaft - mögliche Akausalität:

Diese Einstellung wird von einigen modernen Naturwissenschaftlern vertreten, die weder reine Materialisten noch Atheisten zu sein brauchen. An Stelle eines "persönlichen" Gottes tritt hier ein in der Natur immanenter Gott auf. Oder grob ausgedrückt, die Natur ist Gott! Diese Haltung ist bereits bei den jonischen Naturphilosophen (z.B. THALES von MILET) zu finden. Für kosmologische Probleme ist diese Kombination von großer Tragweite, da auch hier einer Weltentstehung aus der Leere bzw. einer Materiebildung zur gegenwärtigen Zeit Tür und Tor geöffnet wird.

(Steady-State-Theory von F. HOYLE u.a.)

Bis vor nicht allzulanger Zeit gab es eine kaum überschaubare Menge kosmologischer Theorien. Diese wurden dank neuerer Forschungsergebnisse sehr stark reduziert.

4.2. KOSMOLOGISCHE THEORIEN

Um das moderne Standardmodell der Kosmologie, das ein relativistisches sein muß, besser zu verstehen, ist es angezeigt, eine, wenn auch nur angedeutete, historische Entwicklung der kosmologischen Modelle zu verfolgen.

Es sollen absichtlich alle jene Modelle, die auf rein religiösen oder mystischen Vorstellungen aufbauen, unerwähnt bleiben und nur jene genannt werden, die auf Naturgesetzen aufgebaut sind und markante, aussagekräftige Beispiele darstellen. Die Darstellung ist also keinesfalls taxativ sondern nur beispielhaft zu verstehen:

NEWTON hat in seinen Prinzipien über Raum und Zeit die These von der Unendlichkeit des Weltraums vertreten. Er stellte sich die Frage, ob der Weltraum unendlich und gleichmäßig mit Sternen erfüllt sei. Wenn ja, muß die Zahl der Sterne unendlich sein, wenn nein, so könnte die Alternative eine gewaltige Sterneninsel im leeren Raum sein.

NEWTON zog den falschen Schluß, daß nach dem Gravitationsgesetz jeder Stern jeden anderen anzieht, wodurch bei endlicher Sternenanzahl (etwa bei der Sterneninsel) diese in sich zusammenstürzen müßte, weshalb die Zahl der Sterne unendlich sein müßte!

Zu seiner Zeit waren weder gegenseitige Entfernungen der Sterne, noch deren Bewegungen (Expansion, Peculiarbewegung etc.) bekannt. Er konnte daher nicht ahnen, daß gerade bei einer endlichen Sternenzahl im Laufe der Zeit ein Auseinanderstreben der hypothetischen Sterneninsel die Folge wäre (Sternassoziationen: 1. und 2. Kapitel).

Ein leicht verständliches Analogon besteht im Verhalten von Gasmolekülen. Sie unterliegen als materielle Körper genauso der gravitativen Anziehung wie etwa Sterne oder Galaxien. Die Moleküle bewegen sich in Relation zur Gastemperatur, die Geschwindigkeiten sind so groß, daß trotz der Gravitationskräfte sich das Gas nach und nach völlig zerstreut. Obwohl NEWTONS Schluß falsch war, würde jedoch auch dieses Modell zu einer homogenen unendlichen Welt führen, in der "Gasmoleküle" in ständiger Bewegung (auseinander- oder zusammenströmend) wären, denn eine statische Welt ist mit dem NEWTONSchen Gravitationsgesetz nicht verträglich.

Die Überlegungen des Bremer Arztes und Astronomen W. OLBERS führten zu einer genau entgegengesetzten Ansicht:

Durch ein Gedankenexperiment (dessen Schlußfolgerung allerdings falsch war) hatte er 1826 geglaubt, die Endlichkeit des Alls nachweisen zu können:

Die Lichtintensität nimmt proportional $1/r^2$ ab. Die Zahl der Sterne in der Kugelschale mit dem Radius r jedoch nimmt mit $r^2 \cdot dr$ zu, wenn der Kugelradius r um dr zunimmt. Diese Sterne in der Kugelschale tragen zur Helligkeit des Nachthimmels proportional zu $1/r^2$ mal $r^2 dr = dr$ bei.

Die Gesamthelligkeit ist also

$$\int_0^{\infty} dr = \infty$$

Diese Schlußfolgerung ist allerdings theoretisch falsch, da die Sterne sich abdecken, aber abgesehen davon lautet der korrekte Schluß, daß ein ewiges Universum im thermischen Gleichgewicht sein müßte und alle Körper die gleiche Temperatur annähmen.

(Die Erde würde demnach den "Wärmetod" erleiden.)

Auch ein nichtstatisches Universum (was offenbar Tatsache ist) widerlegt sofort die Schlußfolgerungen des o.a. Gedankenexperiments.

Die Annahme eines sich ins Unendliche erstreckenden Weltalls ist sicherlich zunächst naheliegend. Daß es in allen seinen Teilen genauso aufgebaut ist wie wir es von unserer nächsten Umgebung kennen, wäre plausibel, ebenso der Gedanke, daß dies alles ewig bliebe. All diese Modelle wurden bis zum Beginn unseres Jahrhunderts ausschließlich diskutiert. Die beträchtlichen Schwierigkeiten folgerten sich aus dem Umstand, daß die Gesamtmasse des Universums offenbar unendlich würde. Dann wäre jedoch die potentielle Gravitationsenergie in seinem Inneren völlig unbestimmt. Statistische Schwankungen der Massendichte müßten dann zu Kraftwirkungen führen, die uns längst aufgefallen sein müßten!

Die Stabilitätsfrage ist eine der Kernfragen in der Kosmologie.

ZWICKY hat in einer Studie den Versuch unternommen, eine "Gravitationsabschirmung" zu erreichen und zwar durch die Einführung von Quanten mit Masse "Gravitonen" genannt. Leider stehen diese Versuche im Gegensatz zu den Beobachtungsergebnissen!

Gibt man jedoch die Forderung nach einem statischen Weltall auf, eröffnen sich ganz andere Perspektiven, wie leicht einzusehen ist. Mit der Entdeckung der Expansion des Alls durch E. HUBBLE ist diese Gruppe von Weltmodellen dominierend geworden.

4.2.1. DAS EXPANDIERENDE WELTALL - SINGULARITÄT

Eine für die Entwicklung kosmologischer Modelle besonders wichtige Erkenntnis war neben der Allgemeinen und Speziellen Relativitätstheorie EINSTEINS, mit der wir uns noch etwas näher beschäftigen werden, die Expansionstheorie von E. HUBBLE. Sie hat die Kosmologen gewissermaßen erlöst von dem Jahrhunderte alten Irrglauben an das statische, ewig gleichbleibende Weltall. In den ersten zwanziger Jahren dieses Jahrhunderts entdeckte E. HUBBLE mit dem Mt. Wilson-Teleskop das Auseinanderstreben der Galaxien und erkannte sehr bald, daß diese Fluchtgeschwindigkeit umso größer wurde, je weiter die Galaxie von uns entfernt war. 1929 gab HUBBLE das von ihm und HUMASON erarbeitete Ergebnis seiner Berechnungen bekannt:

Die Fluchtgeschwindigkeiten sind proportional der Entfernungen

$$v_r = H \cdot R$$

Der Proportionalitätsfaktor ist die HUBBLE-Konstante, die allerdings, wie wir noch sehen werden, eine zeitabhängige Größe ist, welche sich im Laufe der Jahrtausende sicherlich geändert hat. Wir können uns diese Expansion des Raumes leicht durch ein zweidimensionales Analogon, etwa einen aufblasbaren Ballon, auf dessen Oberfläche die "Galaxien" aufgezeichnet sind, versinnbildlichen. Wird der Ballon aufgeblasen, so

wachsen die Abstände proportional zu ihrer Größe.

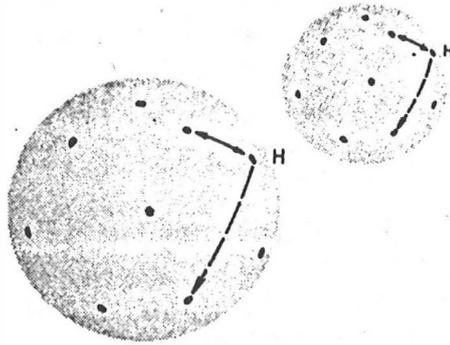


Abb. 4.1

Verfolgt man diese Expansion zurück, so gelangt man zu immer kleineren Abständen und wir kommen so zu den Ursprüngen des Alls wie sie im 3. Kapitel beschrieben sind. Dieser "Urknall" oder "Big Bang" wird wissenschaftlich auch "SINGULARITÄT" genannt. Diese HUBBLE-Konstante $H(t)$ hat die Dimension von Zeit^{-1} also einer Reziproken der Zeit, weil

$$H = \frac{v_r}{R} ; \quad v_r = \frac{R}{t} \quad \text{daher} \quad H = \frac{1}{t} .$$

Wenn wir mit R nun die "Größe" des Universums bezeichnen und mit t (auch T) die Zeit, die verstreichen müßte bis diese Ausdehnung des Universums erreicht war, so wäre die Reziproke von H gleich dem Weltalter (wenn H durch alle Zeiten hindurch eine Konstante gewesen wäre, s. Abb. 4.2. - Geometrische Deutung der HUBBLE-Konstanten).

$$t = \frac{1}{H} .$$

Die Bestimmung der Größe H ist jedoch nicht einfach und auch nicht unmittelbar möglich! Diese Größe wurde immer wieder verbessert, derzeit halten wir bei 50 km/sec/Mpc. Dies bedeutet, daß für eine Distanz, etwa zweier Galaxien, von 1 Megaparsec (d.s. $3,26 \times 10^6$ L.J.) sich die Fluchtgeschwindigkeit um 50 km/sec ändert! Der erste Wert der von HUBBLE angegeben wurde, war 500 km/sec/Mpc und dies hätte ein Weltalter von nur

$$\begin{aligned} \frac{1}{H} &= \left(\frac{1 \text{ Mpc}}{50 \text{ km}} \right) \text{ sec} = \left(\frac{3,26 \times 10^6 \text{ L.J.}}{50 \text{ km}} \right) \text{ sec} = \\ &= \frac{3,26 \times 10^6 \times 365 \times 24 \times 3600 \times 300\,000}{50 \times 3600 \times 24 \times 365} \text{ Jahre} = \frac{9,78 \times 10^{11}}{5,80 \times 10^2} = \text{weniger als} \end{aligned}$$

2 Milliarden Jahre ergeben. Da mußte wohl ein Fehler vorliegen, da das Erdalter mit etwa $4,5 \times 10^9$ Jahren mehrfach bestimmt werden konnte. Nun, die Unsicherheit bei der Bestimmung von H lag einfach in der Distanzbestimmung mit Hilfe der Veränderlichen vom Cepheidentypus (s. 1. Kapitel). Auch heute sind wir weit davon entfernt, genaue Altersangaben des Alls machen zu können, aber mit dem Wert von 50 km/sec/Mpc ergibt sich ein Weltalter von 20 Milliarden Jahren, welches in vieler Hinsicht mit anderen Beobachtungsergebnissen gut übereinstimmt, allerdings nur, wenn wir eine einigermaßen gleichmäßige Expansionsgeschwindigkeit voraussetzen, was durchaus nicht selbstverständlich ist.

Wir erinnern uns an die Aussage, daß ein homogenes, statisches Universum instabil ist. Da man sich jedoch vor HUBBLE ein expandierendes oder implodierendes Universum kaum vorstellen konnte, suchte man krampfhaft nach Auswegen, wie etwa der bereits angedeuteten Annahme einer "abstoßenden" also negativen Gravitation, die der positiven also anziehenden Gravitation die Waage halten konnte. Selbst EINSTEIN wußte keinen anderen Ausweg, als die Einführung einer sogenannten "Kosmologischen Konstante" λ , die diesen Forderungen entsprach. (EINSTEIN hat später die Einführung der Größe λ als einen "dunklen Punkt" in seinem wissenschaftlichen Leben bezeichnet, den er bereut hat. Als in späteren Arbeiten von DE SITTER, FRIEDMANN, EDDINGTON u.a. eine Reihe weiterer Lösungen für ein dynamisches Weltmodell dargestellt wurden, schien das λ -Glied entbehrlich und EINSTEIN selbst empfahl es ersatzlos fortzulassen.)¹⁾ Daß wir heute einen Wert für die HUBBLE-Konstante besitzen, der zumindest in der Größenordnung zu anderen Beobachtungsergebnissen paßt, verdanken wir auch einer Entdeckung des Astronomen W. BAADE, wodurch die Distanzbestimmung mit Hilfe der Cepheiden wesentlich verbessert werden konnte ([22] s. 79 ff).

Wenn wir uns über die Art der Expansion ein Bild machen wollen, so müssen wir zwei wesentliche Kraftkomponenten ins Auge fassen. Erstens die Kraft, welche beim Urknall die Materie auseinandertrieb und bis heute noch wirksam ist und zweitens die gravitative Anziehungskraft der Massenteile, die ja ständig wirkt und daher die Fluchtgeschwindigkeit verringern wird. Es tritt eine Verzögerung ein und die HUBBLE-Konstante mußte sich seit Anbeginn laufend verändern, d.h., sie ist eine zeitabhängige "Konstante" oder anders ausgedrückt, man muß sie in größeren Zeitintervallen immer wieder neu bestimmen, wobei die Zeitintervalle natürlich auch "astronomische" Dimensionen haben. Für die kosmologischen Probleme wurde vorteilhaft die Verzögerungszahl q eingeführt, die auch die Art der Fluchtbewegung beschreibt.

Der augenblickliche Wert von q wird mit q_0 bezeichnet. Bei positivem q tritt eine Verzögerung der Expansionsgeschwindigkeit ein. Zur Erläuterung stellen wir uns einen Raketenstart als Analogie vor:

1. Eine Rakete wird gestartet, erreicht aber nicht die Fluchtgeschwindigkeit für die Erde (ca. 11,2 km/sec) und fällt auf diese zurück. Die mechanische Gesamtenergie ist in diesem Fall *n e g a t i v* und der Wert von q_0 würde einem solchen von größer als 1/2 entsprechen ($q_0 > 1/2$).
2. Die Rakete wird zwar nach dem Start durch die Anziehungskraft der Erde gebremst, erreicht aber dennoch die Fluchtgeschwindigkeit und verläßt das Gravitationsfeld der Erde. Die mechanische Gesamtenergie ist in diesem Fall *p o s i t i v* und das entsprechende q_0 ist kleiner als 1/2 ($q_0 < 1/2$).
3. Auch in diesem Fall ist eine Rückkehr zur Erde nicht möglich, doch käme die Rakete, langsamer werdend, erst im Unendlichen zum Stillstand, d.h., die Geschwindigkeit wäre exakt die Fluchtgeschwindigkeit von 11,2 km/sec. Dieser Fall entspräche einem Wert q_0 von genau 1/2 und die mechanische Gesamtenergie wäre Null ($q_0 = 1/2$).

Wenn wir nun dieses Experiment auf das All übertragen, so kommen wir zu einer wesentlichen Feststellung, die schon mehrfach angedeutet wurde: An Stelle der Erdmasse wäre die Gesamtmasse des Kosmos zu setzen. Da aber bei konstantem Volumen die Masse proportional der Dichte ist, *w ä r e u n d i s t* die Expansion als letztlich von der Dichte abhängig oder anders gesagt: kennen wir die Dichte des Kosmos, so können wir auf die Art der Expansion und damit auf die Art des Kosmos schließen! Je größer die Dichte, desto größer der Wert von q . HUBBLE-Konstante und Dichte sind also Größen von überragender Bedeutung für die Erarbeitung kosmologischer Modelle, welche den tatsächlichen Gegebenheiten entsprechen sollen. Die Bestimmung der Dichte ρ ist aber ebenfalls außerordentlich schwierig und unmittelbar nicht durchführbar. Derzeit werden größte Anstrengungen gemacht, brauchbare Werte zu erlangen. Wie schon im 1. Kapitel

¹⁾ s. Math.Anhang

angedeutet, spielen nicht zu erkennende gigantische Massen (Schwarze Löcher z.B.) hier eine außerordentliche, hemmende Rolle.

In relativistischen Weltmodellen hängt die Größe q mit der Raumkrümmung zusammen, da bekanntlich diese wieder eine Funktion der Ortsdichte im Raum darstellt. Da sich die Raumkrümmung ständig ändert (durch die Expansion z.B.) muß auch q zeitabhängig sein. Einer großen Dichte entspricht daher eine starke Raumkrümmung.

Ist $0 \leq q_0 < 1/2$, so wächst der Radius ständig, bis der Abstand zwischen den Galaxien ∞ wird, die Expansion ist hyperbolisch, das Weltalter ist $2/3 H^{-1} < T < H^{-1}$, die Raumkrümmung $k = -1$, der Wert q konvergiert gegen Null, das Universum ist *o f f e n*. (Die Rakete entweicht.)

Für den Wert $q_0 = 1/2$ folgt eine parabolische Expansion und die Raumkrümmung $k = 0$, q ändert sich nicht, nach unendlicher Zeit kommt die Expansion zum Stillstand, die Galaxienabstände sind ∞ , dann aber ist die Expansionsgeschwindigkeit $v_r = 0$. Das Weltalter $T = 2/3 H^{-1}$, der Kosmos wäre euklidisch. (Die Rakete kommt im Unendlichen zum Stillstand.)

Für $q_0 > 1/2$ schließlich wird die Expansion elliptisch, die Raumkrümmung $k = +1$, das Weltall ist "geschlossen". Der Wert q wächst an, bis der "Weltradius" sein Maximum erreicht. Hernach schrumpft das All wieder zusammen, eine solche Phase dauert $T < 2/3 H^{-1}$, es ergibt sich das Bild eines oszillierenden Kosmos. (Die Rakete fällt auf die Erde zurück.)

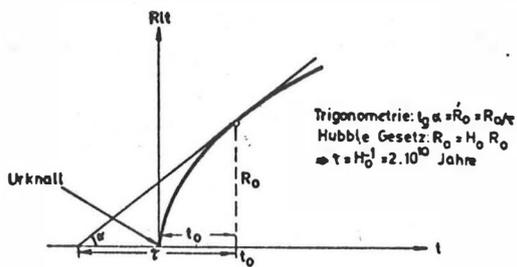
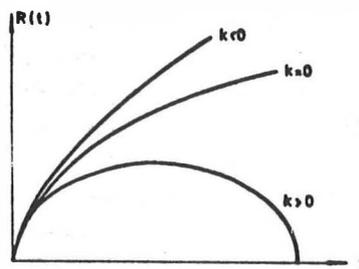


Abb. 4.2
Die Deutung der Hubble-Konstanten.



Expansion des Universums für verschiedene Werte von „k“.

Zwei Begriffe sollen noch erläutert werden, die für kosmologische Modellvorstellungen von Bedeutung sind: Eng mit dem Weltalter verknüpft ist der KOSMISCHE HORIZONT. Er existiert sowohl bei offenen als auch bei geschlossenen Modellen, der Radius des Horizontes vergrößert sich ständig und zwar mit Lichtgeschwindigkeit, da die Rotverschiebung gegen ∞ konvergiert, d.h., der sichtbare Teil des Universums vergrößert sich nach allen Seiten um 300 000 km je Sekunde. Selbstverständlich hängt der Horizontradius von der Art der Expansion ab, also letztlich von q . Je größer der Wert von q ist, umso kleiner ist der Horizontradius. Um sich den Horizont vorzustellen, denken wir uns ein Weltalter von 20 Milliarden Jahren. In einer Distanz von 18 Milliarden Lichtjahren beobachten wir eine Galaxie, die wir in einem Eigenalter von 2 Milliarden Jahren sehen, falls sie beim Urknall entstanden ist. Wir blicken in die Vergangenheit zurück, aber falls z.B. eine Galaxie 4 Milliarden Jahre nach dem Urknall entstanden ist und sich in der gleichen Distanz befindet, wäre sie für uns derzeit noch unsichtbar, also jenseits des kosmischen Horizonts gelegen, trotz ihres Alters von 16 Milliarden Jahren. Aber auch eine Galaxie, die beim Urknall entstanden ist und z.B. 22 Milliarden Lichtjahre entfernt wäre, läge für uns unsichtbar hinter dem kosmischen Horizont. Ein weiterer Begriff ist der KOSMISCHE ÄQUATOR. In Analogie zu einer Kugel ist er jener geometrische Ort bei dem der parallaktische Winkel eines beobachteten Gegenstandes ein Minimum wird. Seine Lage wird leicht verständlich, wenn wir uns auf der Kugel zwei Großkreise vorstellen, die sich unter einem beliebigen Winkel schneiden. Ihr gegenseitiger Abstand wird nach einer sphärischen Distanz von 90° ein Maximum (Äquator zum

Schnittpunkt) und nimmt dann ab bis er beim Antipunkt, dem Ort der maximalen Distanz, wieder Null wird.

Ihn gibt es nur in einem positiv gekrümmten, also elliptischen Weltmodell.

Auf ein relativistisches Modell übertragen, heißt das, daß etwa ein Galaxienhaufen von der Erde aus beobachtet, unter einem immer kleiner werdenden parallaktischen Winkel zu sehen ist, je weiter er sich entfert. Am kosmischen Äquator erreicht er sein Minimum, um dann wieder zuzunehmen. Nehmen wir nun in einem positiv gekrümmten All eine Expansion an, so liegen die Orte, von denen aus das Objekt unter kleinstem Winkel erscheinen würde, nicht am Äquator, sondern näher beim Beobachter. Ob nun der Horizont diesseits oder jenseits des Äquators liegt, hängt wiederum von der Größe q ab. Ist sie größer als 1, so liegt der Horizont hinter dem Äquator, für $1/2 < q_0 < 1$ liegt er näher. Bei q_0 -Werten größer als etwa 3, müßten wir sogar über den Antipunkt hinausblicken können, das hieße, daß wir, ein genügend helles Objekt vorausgesetzt, selbiges zweimal sehen könnten, einmal direkt und ein zweites Mal sozusagen "hintenherum" in genau der entgegengesetzten Richtung. Beide Beobachtungen lieferten den gleichen parallaktischen Winkel, nur die Helligkeit und die Rotverschiebung wären verschieden.

4.2.2. ANDERE HYPOTHESEN

Wie bereits im 3. Kapitel erwähnt wurde, bleibt die Urknalltheorie nicht unwidersprochen und demgemäß werden auch die daraus abgeleiteten Modelle mehr oder weniger heftig abgelehnt. In diesem Abschnitt sei auf einige andere Theorien hingewiesen, die aber allesamt schlechter in das Beobachtungsbild passen, wie die aus der Urknalltheorie abzuleitenden relativistischen, dynamischen Standardmodelle.

Im Jahre 1948 stellten H. BONDI, T. GOLD und F. HOYLE ein kosmologisches Modell vor, das auf A. MILNE zurückging und die Schwierigkeiten physikalischer Natur des Urknalls umging. Die Welt sollte danach nicht nur räumlich homogen und isotrop sein, sondern auch zu jeder Zeit denselben Zustand gehabt haben. Sie zeigt also keine allgemeine Evolution, es gab weder Urknall noch überdichte Materie. Die Theorie wurde "STEADY-STATE" genannt. Die Expansion konnte auch diese Theorie nicht umgehen und so wurde einfach, um die Dichte beizubehalten, ständige Neuschöpfung der Materie vorausgesetzt. Den Beobachtungsergebnissen widerspricht diese Theorie vorerst nicht, da sie nur eine "Schöpfungsrate" von etwa 1 Wasserstoffatom pro km^3 je 500 Jahre im ganzen Weltall verteilt annimmt. Eine derart geringe Massenänderung ist natürlich nicht beobachtbar, sie ist vielmehr eine Frage nach der unbedingten Anerkennung der Kausalität, wie dies zu Beginn dieses Kapitels dargelegt wurde.

Umgelegt auf das Universum bedeutet dies jedoch eine Massenzuwachsrates von 100 Sonnenmassen je Sekunde (!) Durch die ständige Expansion des Universums "verschwindet" wieder im selben Maße Materie wie sie entsteht, so daß das Gleichgewicht erhalten bleibt. Die Expansion wurde durch einen geringen Ladungsüberschuß des Protons über das Elektron erklärt, wodurch z.B. ein Wasserstoffatom nicht ganz neutral sei und daher sich die Atome abstoßen müßten. Die Kraft ist im Laboratorium nicht nachzuweisen, aber in einer Galaxie wäre sie groß genug um die Expansionskräfte zu erzeugen. (Eine sehr unbefriedigende Hypothese.) Weiters müßte die Expansion anders als bisher beschrieben erfolgen, so daß die Entfernungen der Galaxien untereinander exponentiell wachsen würden, wobei keine Raumkrümmung bestehen könnte und $q_0 = -1$ konstant bleiben müßte.

Einen völlig anderen Weg haben die Physiker P.A.M. DIRAC und P. JORDAN eingeschlagen, indem sie als Ausgangspunkt ihrer Überlegungen die Beziehungen zwischen kosmischen und atomaren Konstanten anstellten: Die ELEMENTARLÄNGE (Radius eines Elektrons)

verhält sich zum Weltradius (R) wie etwa $1:10^{40}$. In derselben Größenordnung liegt das Verhältnis von ELEMENTARZEIT (Zeit, in der das Licht die Elementarlänge durchläuft) zum Weltalter (T). Die Masse eines Protons verhält sich zur gesamten Masse des Universums wie $1:(10^{40})^2$ und schließlich verhalten sich die beiden FERNKRÄFTE im Atominneren, also die gravitative zur elektrischen (coulombschen), ebenso.

Faßt man diese Zahlenverhältnisse als Naturgesetz auf, so müßte sich bei einer Expansion u.a. die Gravitationskonstante ändern, sie müßte mit zunehmendem Weltalter kleiner werden, aber auch eine zeitliche Änderung der Gesamtmasse der Welt wäre die Folge. Auf diesen eigentümlichen Zusammenhang zwischen kosmischen und atomaren Konstanten hatte bereits EDDINGTON hingewiesen. JORDAN versuchte nun weitgreifende Schlüsse zu ziehen. Er versuchte auch eine Erklärung für die geforderte Massenvermehrung zu finden und sagte lange bevor man den ersten Neutronenstern tatsächlich entdeckte, diese Sterne voraus! Er setzte sie allerdings an den Anfang der Sternentwicklung (s. 1. Kapitel, Protosternhypothese von AMBARZUMJAN). Infolge der Abnahme der Gravitation sollte ein solches Gebilde aus Neutronen plötzlich explodieren, etwa als Supernova. Dies ist allerdings genau die Umkehrung dessen, was wir heute über die Supernovae wissen (s. 1. Kapitel). Über den Anfang des Alls hat JORDAN bestimmte Vorstellungen: zu Beginn war ein Neutronenpaar vorhanden, doch bereits nach 10 Sekunden besaß die Welt bei einem Radius der gleich der Sonne, also $1 R_{\odot}$ war, die Masse des Mondes. Die Abnahme der Gravitationskraft spielte auch in späteren Phasen eine gewichtige Rolle, denn nicht nur die Himmelskörper entfernten sich voneinander, sondern sie selbst mußten sich ausdehnen. Durch die Entdeckung der Pulsare und deren Studien ist dieser Teil der Theorie von JORDAN absolut unhaltbar geworden. Auch die Steady-State-Theorie wird heute kaum noch als alternatives Modell herangezogen.

Bleibt schließlich noch eine moderne Theorie zu erwähnen und zwar die ANTIMATERIE-Theorie des Nobelpreisträgers H. ALFVÉN. Im Jahre 1932 konnte ANDERSON in der Höhenstrahlung ein Antiteilchen nachweisen. Es war ein Elektron, allerdings mit positiver Ladung, das POSITRON war gefunden. Erst im Jahre 1955 gelang es in Berkeley das gesuchte ANTIPROTON zu entdecken. Inzwischen wurde eine ganze Reihe von Antiteilchen gefunden, etwa auch das ANTINEUTRON mit *n e g a t i v e r* Baryonenzahl -1. Die Vorstellung von Antimasse ist sicher nicht möglich und sie wurde auch im ganzen Universum noch nie beobachtet. Aber auch von der Masse haben wir keine konkrete Vorstellung, wir kennen nur ihre Auswirkungen, wie Trägheit und Schwere. Wenn nun ein Teilchen mit Antiteilchen zusammenstößt, so verwandelt sich die Gesamtmasse in Energie nach $E = mc^2$. Im Falle der Zerstrahlung eines Elektrons und eines Positrons entsteht eine Energie von einem Megaelektronenvolt (!) Auch die Umkehrung ist möglich, durch höchstenergetische Strahlung können Teilchen und Antiteilchen entstehen (s. 3. Kapitel, "Die ersten Sekunden nach dem Urknall"), allerdings gilt dies nur bei Impulserhaltung, also in der Nähe von Atomkernen. ALFVÉN hat die uns umgebende Materie KOINOMATERIE zum Unterschied von der Antimaterie genannt. Ob die uns umgebenden kosmischen Objekte aus Koinomaterie bestehen oder nicht, ist schwierig zu entscheiden. Die atomaren Vorgänge, etwa in einem Stern, verraten durch die Emissionen noch nichts über die Materieart. Meteore sind schon aufschlußreicher. Ein besonderer Meteor, der am 30. Juni 1908 im Gebiet der steinigen Tunguska niederging und von dem man lange Zeit vermutete, es handle sich hier um Antimaterie, konnte konventionell erklärt werden. ([22] S. 94).

ALFVÉN geht von einem Anfang ohne Urknall aus, bei dem allerdings auch außerordentlich große Strahlungsenergie vorhanden war. Daraus entstand (wie bereits im 3. Kapitel erwähnt), Materie und Antimaterie. Es muß in etwa gleich viel Koinomaterie wie Antimaterie entstanden sein. Die einzelnen Teilchen waren noch so weit voneinander entfernt (!), daß sie nicht miteinander reagieren konnten. Infolge der Gravitation verdichtete sich die Urmaterie und es erfolgte eine Zerstrahlung der entstandenen Teilchen. Der daraus entstandene Strahlungsdruck wurde so groß, daß die Implosion gestoppt wurde und schließlich in eine Ausdehnung der Materie überging. Während der Verdichtungsphase entstanden die Sterne und Galaxien. Die Expansion der Galaxien ließe sich demnach als

Folge der Zerstrahlung von Koinomaterie und Antimaterie verstehen. Nach ALFVÉN ist die Summe aller im All vorhandenen Materie gleich Null. (Da die Antimaterie auch als negative Materie betrachtet werden kann.) Was konkret existiert ist die Energie. Die Trennung von Koinogalaxien und Antigalaxien will ALFVÉN durch starke Magnetfelder erreichen.¹⁾ Als die Metagalaxis entstand (Ansammlung aller in diesem Entwicklungsprozeß befindlichen Galaxien), war die Ausdehnung 1/22 der heutigen und die Dichte war etwa 10 000mal so groß ($22^3 \approx 10\ 000$) wie heute. Die Theorie ALFVÉNS schließt auch die Möglichkeit weiterer Metagalaxien nicht aus. C.V.L. CHARLIER äußerte bereits 1908 den Gedanken, daß das Universum aus einer unendlichen Kette immer größerer Einheiten bestehen könnte (!)

4.2.3. ÜBERSICHT DER KOSMOLOGISCHEN MODELLE

1. Weltmodelle bezüglich der Struktur des RAUMES

1.1. Der euklidische Raum
unbegrenzt, ungekrümmt, unendlich
 $k = 0$

1.1.1. Der Raum ist inhomogen und anisotrop, trotzdem statisch.
Das Gravitationsgesetz gilt nicht universell in der uns bekannten Form.

1.1.2. Der Raum ist homogen und isotrop und daher nicht statisch.
Er expandiert exponentiell (Steady-State) oder parabolisch
($q_0 = 0,5$ konstant).

1.2. Der relativistisch gekrümmte Raum

1.2.1. Die Expansion erfolgt elliptisch. R vergrößert sich bis zu einem Maximum und wird wieder kleiner, die Gesamtenergie ist negativ, der Raum ist positiv gekrümmt ($q_0 > 0,5$, $k = +1$) und endlich, aber unbegrenzt (Oszillierendes All).

1.2.2. Die Expansion erfolgt hyperbolisch. R vergrößert sich ständig.
Die Gesamtenergie ist positiv, der Raum ist negativ gekrümmt
($0 < q_0 < 0,5$, $k = -1$), er ist unbegrenzt und unendlich.

2. Weltmodelle bezüglich der ZEIT

2.1. Es gibt keinen Anfang und kein Ende

2.1.1. Statisches Weltall (möglich für Fall 1.1.1)

2.1.2. Relativistischer Raum mit $k = +1$,
oszillierendes All (1.2.1.)

2.2. Es gab einen Anfang, ein Ende ist nicht unbedingt erforderlich.

2.2.1. Relativistisches Modell mit hyperbolischer Expansion (1.2.2.)
oder parabolischer Expansion (1.1.2.)
Beginn ist der Urknall. Die physikalischen und chemischen Prozesse
sind alle reversibel.

2.2.2. Bei der Annahme einer in großer Distanz wirkenden Abstoßungskraft
zwischen den Massen (λ -Glieder) läßt sich von einem Raum mit endlichem
Radius ausgehen, ohne Notwendigkeit der Singularität (Urknall)!
Ebenso wäre ein Endzustand mit endlichem Radius möglich, ohne daß
dabei ein "Endzustand" der Materie eintreten müßte.

2.2.3. Exponentielle Expansion nach der Steady-State-Theorie und
P. JORDAN-Theorie mit ständiger Materieneubildung.

¹⁾ Im Schwerfeld der Erde würde Antimaterie auch nach "unten" fallen.

2.3. Es gab keinen Anfang. Ein Ende muß angenommen werden.
(Diese Modelle sind in der Literatur kaum zu finden.)

2.4. Es gab einen Anfang und muß eine Ende geben.

2.4.1. Relativistische Modelle mit $k = +1$ ($q_0 > 0.5$),
jedoch ohne Rückkehr zur Singularität.

2.4.2. Modelle mit hyperbolischer oder parabolischer Expansion, in denen
die Materie einer ständigen Evolution unterworfen ist. Nicht alle
physikalischen und chemischen Prozesse sind reversibel.

Die Hypothesen mit der Annahme von Materiequellen (wir haben im 2. Kapitel diese Quellen behandelt, welche, wie erinnerlich, von der Bjurakaner Schule eingehend studiert worden sind) passen in das Schema von Bjurakan nicht, auch schon deshalb nicht, weil die Bjurakaner Schule die Evolutionstheorie nicht auf den Kosmos als Ganzes, sondern nur auf Einzelgalaxien oder bestenfalls auf Galaxienhaufen, also "kleinere Regionen" der Metagalaxis angewendet wissen will. (Es soll in Erinnerung gerufen werden, daß V. AMBARZUMJAN die wesentlichen Voraussetzungen für ein kosmologisches Weltmodell, nämlich die Isotropie und die Homogenität, als keinesfalls gegeben erachtet.)

4.3. DIE RELATIVISTISCHEN WELTMODELLE

4.3.1. EINIGE MATHEMATISCHE GRUNDBEGRIFFE

Wir wissen aus der Geometrie der Räume, daß die Begriffe Unbegrenztheit und Endlichkeit einander nicht widersprechen. Als Beispiele seien der Kreis oder allgemein jede geschlossene Linie für ein ebenes und die Kugel und alle aus ihr durch Verformungen (aber ohne zu zerreißen) hervorgegangenen Gebilde (etwa der Torus) für ein räumliches Kontinuum erwähnt. Es fällt bekanntlich gar nicht schwer, in Räumen mit beliebig vielen Dimensionen Geometrie zu treiben. Wir benötigen außer der Dimension noch die Angabe der Geometrie, mit der wir operieren wollen. Wenn wir diese festgelegt haben, so ist auch die "Metrik" festgelegt und damit kann ich z.B. den Abstand zweier Punkte angeben. Als Beispiel ergibt etwa die euklidische Geometrie im n-dimensionalen Raum als Abstand eines Punktes ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$) vom Ursprung die Formel

$$\Delta s = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}$$

Die sphärische Geometrie ist bekanntlich die Geometrie auf einer Sphäre, wobei auch hier analog zur euklidischen Geometrie, die Dimension beliebig gewählt werden kann. Eine wesentliche Verwandtschaft besteht zwischen den euklidischen und sphärischen Räumen (beliebiger Dimension): beide sind homogene und isotrope Räume, d.h., man kann in ihnen starre Figuren beliebig verschieben, ohne sie verzerren zu müssen. Schließlich haben die hyperbolischen Räume dieselbe Eigenschaft.

Sowie die $(n - 1)$ -dimensionale Sphäre im n-dimensionalen euklidischen Raum definiert wird durch

$$x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2 = 1$$

so können wir den hyperbolischen Raum mit Hilfe des pseudoeuklidischen Raumes durch die Gleichung

$$+ x_1^2 - x_2^2 - x_3^2 \dots - x_n^2 = 1$$

definieren. Dieser $(n - 1)$ -dimensionale Raum hat seine eigene innere Geometrie, nämlich die hyperbolische Geometrie und der Raum heißt $(n - 1)$ -dimensionaler hyperbolischer Raum.

Die Bezeichnung "hyperbolisch" rührt daher, weil für $n = 2$ die Gleichung einer Hyperbel folgt:

$$x_1^2 - x_2^2 = 1$$

für $n = 3$ folgt das zweischalige Hyperboloid

$$x_1^2 - x_2^2 - x_3^2 = 1$$

Eine hyperbolische Geometrie erhalten diese Gebilde allerdings nur im pseudoeuklidischen Raum. Die euklidischen, sphärischen und hyperbolischen Räume sind die einzigen homogenen und isotropen Räume, die es gibt. In ihnen existieren keine Punkte, die sich vor den übrigen Punkten durch besondere Eigenschaften auszeichnen. Daher eignen sie sich, und nur sie, mathematische Träger kosmologischer Weltmodelle zu sein. Daß in den gekrümmten Räumen (RIEMANNsche Räume), wie dem sphärischen und dem hyperbolischen, Gerade nicht vorkommen, stört wenig, denn die geodätischen Linien spielen bekanntlich auch schon in dem uns geläufigen zweidimensionalen Raum (Kugel, Ellipsoid) die Rolle der Geraden; nämlich im kleinen Bereich die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten auf der Oberfläche zu sein! Sie heißen demnach nichteuklidische Gerade. Bilden wir ein Dreieck aus Lichtstrahlen, so ist bekanntlich im euklidischen Raum die Summe der Innenwinkel genau 180° , im sphärischen Raum ist sie größer, im hyperbolischen Raum kleiner als 180° . Bilden wir schließlich noch die Volumina der Räume, so erhalten wir für den sphärischen (elliptischen) einen endlichen ($v = 2\pi^2 R^3$) für den euklidischen (parabolischen) und hyperbolischen jedoch einen unendlichen Wert.

4.3.2. DIE FRIEDMANNSCHEN WELTMODELLE

Die Weltmodelle des russischen Mathematikers A.A. FRIEDMANN basieren auf der Allgemeinen Relativitätstheorie (A.R.T) von EINSTEIN. Es ist verlockend, auf die wesentlichen Ableitungen und Formeln einzugehen, daher wurde in den Math.Anhang eine kurze Übersicht der wesentlichen Formeln aufgenommen. Es sollen vorerst nur die wichtigsten Aussagen der Speziellen und Allgemeinen Relativitätstheorie angegeben werden: [23]

Aus der Speziellen Relativitätstheorie:

1. Die Geschwindigkeit des Lichtes c im Vakuum ist konstant und in allen Richtungen gleich, sie beträgt rund 300 000 km/sec und ist unabhängig von einer gleichförmigen und geradlinigen Eigenbewegung der Lichtquelle mit der Geschwindigkeit v . Sie ist demnach eine universelle Konstante (MICHELSON-Versuch).
2. Die Lorentz-Transformationen müssen für alle physikalischen Vorgänge in zwei zueinander gleichförmig und geradlinig bewegten Bezugssystemen angewendet werden. Sie enthalten als Grenzfall ($v \ll c$) die klassischen Galilei-Transformationen. Die wichtigsten Formeln sind:

$$a' = a \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

wobei an Stelle von a' bzw. a gesetzt wird:

t' , t für die Zeitdilatation

l' , l für die Längendilatation

m' , m für die Massendilatation

Dopplereffekt (Rotverschiebung bzw. Blauverschiebung)

a) in der Bewegungsrichtung (Radialrichtung)

$$z_r = \frac{1 + \frac{v}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{-\Delta\nu}{\nu}$$

$\Delta\lambda$ ist die Wellenlängenänderung, welche durch die Geschwindigkeit v des emittierenden Körpers hervorgerufen wird. $\Delta\lambda$ ist positiv für sich sich entfernende Körper und negativ für sich annähernde Objekte. $z = \frac{v}{c}$ wäre die nicht-relativistische Formel; sie gilt etwa bis Distanzen von 10^8 Lichtjahren.

b) Die relativistischen Formeln sagen auch senkrecht zur Bewegungsrichtung einen Dopplereffekt voraus und zwar mit

$$z_s = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1$$

3. $E = mc^2 \rightarrow$ Masse-Energie-Äquivalenz.

4. Additionstheorien für relativistische Geschwindigkeiten, wobei v_a und v_b mit der Lichtgeschwindigkeit c bereits "vergleichbar" sind.

$$v_r = \frac{v_a + v_b}{1 + \frac{v_a v_b}{c^2}}$$

5. Das Raum-Zeit-Kontinuum von MINKOWSKI ist die vierdimensionale geometrische Interpretation der S.R.T. Diese Darstellung enthält zugleich auch die Lorentz-Transformation.

Als Ergebnisse der A.R.T. seien zusammenfassend genannt:

1. Allgemeines Relativitätsprinzip: Die Beschränkung auf spezielle Lorentz-Transformationen entfällt; es sind nichtlineare Transformationen zugelassen.
2. Die universelle Proportionalität von träger und schwerer Masse (Äquivalenzprinzip) bedingt eine lokale Äquivalenz von Beschleunigungs- und Gravitationskräften und führt zu einer Identifizierung der geometrischen Struktur der Raum-Zeit-Welt mit der Gravitation.
3. Im Gravitationsfeld verkürzen sich Maßstäbe, Uhren verlangsamen ihren Gang, und die euklidische muß durch die nichteuklidische Geometrie ersetzt werden.
4. Die effektive Lichtgeschwindigkeit ist im Gravitationsfeld kleiner als im gravitationsfreien Raum
5. Die Allgemeine Relativitätstheorie enthält die klassische Newtonsche Gravitationstheorie als Grenzfall.
6. Die Bewegungsgleichungen für Massenpunkte und Körper werden aus den nichtlinearen Feldgleichungen hergeleitet.
7. Mehrere von der Allgemeinen Relativitätstheorie geforderte Effekte konnten bereits experimentell nachgewiesen werden (s. Abschnitt 1.7).
8. Physikalische Begründung der Kosmologie.

Die relativistischen Effekte treten erst bei mit der Lichtgeschwindigkeit vergleichbaren Geschwindigkeiten oder in der Nähe sehr großer Massen auf. Die sogenannten Feldgleichungen der A.R.T. stellen Beziehungen zwischen den Massendichten und der Metrik

(Geometrie) eines vierdimensionalen Raum-Zeit-Kontinuums her. Darin ist der uns begrifflich erfassbare dreidimensionale Raum als Unterraum eingebettet, analog wie dieser dreidimensionale Raum wiederum Flächen (ebene, gekrümmte) als zweidimensionale Unterräume enthält.

Das älteste auf die A.R.T. aufbauende Weltmodell stammt von EINSTEIN selbst und nimmt gleiche Massendichte, die zeitlich konstant bleibt, an, wobei das All geschlossen sein und einen konstanten Krümmungsradius R besitzen sollte:

$$R = \frac{c}{\sqrt{4\pi G \rho}} \quad (1) \quad \begin{array}{l} \text{für } \rho = 5 \cdot 10^{-30} \text{ g/cm}^3 \text{ (ca. Grenzdichte zwischen offenem} \\ \text{und geschlossenem Universum)} \\ \text{ergibt sich ein Wert} \\ \text{von } R = 15 \times 10^9 \text{ L.J.} \end{array}$$

Um dieses Weltmodell mit seinen Feldgleichungen in Einklang bringen zu können, mußte EINSTEIN die "kosmologische" Konstante (s. 4.2.1) mit dem sehr kleinen Wert

$$\lambda = \frac{1}{R^2} \quad (2)$$

eingeführen, die sich (bekanntlich) für ein dynamisches Weltmodell erübrigt.

Das erste relativistische dynamische Weltmodell wurde 1917 von DE SITTER entwickelt. Der Weltradius ist zeitabhängig, allerdings enthielt diese Welt keine Materie und es zeigte sich bald, daß trotz der sehr geringen Dichte des intergalaktischen Raumes (einige Atome je m^3), dennoch die Raumgeometrie von dieser entscheidend beeinflußt wird!

Die ersten materieerfüllten dynamischen Weltmodelle stammen von A.A. FRIEDMANN aus dem Jahre 1922. In einer ganzen Serie von Lösungen der Feldgleichungen spiegeln sich dieselben Grundtypen kosmologischer Bewegungsabläufe, wie sie auch die klassische Physik voraussagt [17]. Neben kontinuierlich expandierenden Welten schienen auch periodisch oszillierende möglich. Die Arbeiten von FRIEDMANN bilden die Grundlage der modernen, umfassenden Behandlung kosmologischer Probleme, die ihre vorläufig endgültige Form durch Beiträge von ROBERTSON, EDDINGTON und LEMAITRE gegen Ende der dreißiger Jahre dieses Jahrhunderts erhielt. Danach wird der zeitliche Verlauf des Krümmungsradius durch die folgenden 2 Differentialgleichungen beschrieben [17] [2B], die sich aus der Bewegungsgleichung ableiten lassen [23].

$$\dot{R}^2 + kc^2 = \frac{R^2}{3} (\lambda c^2 + 8\pi G \rho) \quad (3)$$

$$2R\ddot{R} + \dot{R}^2 + kc^2 = R^2 \left(\lambda c^2 - \frac{8\pi G p}{c^2} \right) \quad (4)$$

Wie aus der Signatortabelle hervorgeht, bedeuten:

R den Krümmungsradius des als dreidimensionalen Unterraums in einen vierdimensionalen Raum-Zeit-Kontinuum verstandenen Weltalls

$\dot{R} = \frac{dR}{dt}$ die Ausdehnungsgeschwindigkeit

$\ddot{R} = \frac{d^2R}{dt^2}$ deren Beschleunigung (die Ausdehnung des Alls erfolgt keinesfalls gleichförmig)

k ist der Krümmungsparameter mit den Werten $+1$, 0 oder -1 .

Die Lösungen beschreiben dann geschlossene (elliptische), euklidische (parabolische) bzw. offene (hyperbolische) Räume.

ρ bedeutet die Dichte, hier ist sowohl die Materiedichte als auch das Massen-äquivalent der Energiedichte (3. Kapitel) enthalten.

p bedeutet den Druck und zwar den hydrostatischen Druck des "Galaxiengases"

(proportional dem Quadrat der mittleren Galaxiengeschwindigkeit) als auch den Strahlungsdruck (proportional der 4. Potenz der Temperatur). Heute überwiegt bei weitem die Materiedichte, aber wir haben im 3. Kapitel gesehen, daß am Beginn der kosmologischen Entwicklung der Strahlungsdruck dominierend war. Derzeit ist aber, bei einer Geschwindigkeit des Galaxiengases von nur 300 km/sec auch der hydrostatische Druck vernachlässigbar, so daß $p = 0$ eingesetzt werden kann.

Um die FRIEDMANN-LEMAÎTRE-Gleichungen in eindeutiger Weise lösen zu können, müssen die Größen R , \dot{R} , ρ , λ und das Vorzeichen von k (sign k) zumindest zu einem bestimmten Zeitpunkt bekannt sein. Die entsprechenden Werte der Gegenwart tragen den Index $_0$. R und \dot{R} sind nur indirekt bestimmbar und zwar nur über ihren Einfluß auf andere astronomische Größen. Besondere Bedeutung hat dabei die HUBBLE-Konstante

$$H_0 = \frac{\dot{R}_0}{R_0} \approx \frac{0 \text{ km}}{\text{c.Mpc}} \quad (5)$$

Da HUBBLE 1929 ein Gesetz fand, wonach sowohl die Rotverschiebung z als auch die Fluchtgeschwindigkeit $v(t)$ der Galaxien proportional zu deren Entfernung D ist, ergibt sich

$$v(t) = H(t) D(t)$$

Die Vektordarstellung deutet die Unabhängigkeit vom Beobachtungsort an. Weiters gilt

$$\frac{dD}{dt} = v(t) = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = cz = H \cdot D \quad (\lambda \text{ steht für die Wellenlänge}) \quad (5a)$$

(allerdings gilt diese Gleichung nur bis zu einem z -Wert von der Größenordnung 1) Darüberhinaus hat man für die Größe z den relativistischen Ausdruck

$$1 + z_r = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} \quad (\text{siehe oben in anderer Form}) \quad (5b)$$

zu setzen. Außerdem hat Mc VITTIE [25] gezeigt, daß für Werte von $z > 1$ Reduktionskoeffizienten für die Distanzbestimmung zu berechnen sind, welche vom jeweiligen Weltmodell abhängen. Die Weltmodelle sind durch die Parameter q_0 und σ_0 festgelegt¹⁾ (siehe auch Abb. 4.2). $\sigma_0 = \rho_0 \cdot \frac{8\pi G}{3H_0^2}$

Der reine Parameter q_0 , die Verzögerungszahl, die ein Maß für die Verlangsamung der Expansionsgeschwindigkeit darstellt, ist gegeben durch

$$q_0 = - \frac{\ddot{R}_0}{R_0 H_0^2} \quad (6)$$

Die Größen H_0 und q_0 können zwar aus Beobachtungen gewonnen werden, jedoch sind die derzeitigen Methoden noch derart ungenau, daß eine Verringerung der Zahl der Unbekannten erstrebenswert erscheint. Man beschränkt sich daher auf Modelle mit verschwindender kosmologischer Konstante λ (s. EINSTEINs Empfehlung), so daß die Gleichungen (3) und (4) die nachstehende Form annehmen

$$\rho_0 = \frac{3 H_0^2 q_0}{4\pi G} = 0,92 \cdot 10^{-29} q_0 \text{ g/cm}^3 \quad (\text{derzeitiger, mit den Beobachtungen gut harmonisierender Wert ist } \sim 5 \cdot 10^{-31}, \text{ d.h., } q_0 \text{ müßte dann } \sim 0,05 \text{ sein}) \quad (7)$$

und

$$\frac{kc^2}{R_0^2} = H_0^2 (2 q_0 - 1) \quad (8)$$

¹⁾ Mc VITTIE verwendet als Dichteparameter σ_0

Die Gleichung (7) stellt den Zusammenhang zwischen der Verzögerungszahl q_0 und der mittleren kosmischen Dichte dar und die Gleichung (8) trifft die Aussage der Allgemeinen Relativitätstheorie, daß die Raumkrümmung kc^2/R_0^2 durch die Verteilung der darin enthaltenen Masse festgelegt wird. Aus den Gleichungen (7) und (8) folgt nun:

Für elliptische Räume ($k = +1$) liefert die Gleichung (8) nur reelle Lösungen für R_0 , wenn q_0 größer als $1/2$ ist. Allen Werten von q_0 zwischen 0 und $1/2$ entsprechen hyperbolische Räume mit $k = -1$, damit für R_0 reelle Werte resultieren. Daraus folgt, daß für $q_0 = 1/2$ eine kritische Dichte von $\rho = 0,46 \cdot 10^{-29} \text{ g/cm}^3$ existiert, welche die geschlossenen Räume von den offenen trennt.

Die Verzögerungszahl gibt uns daher die Möglichkeit zwischen den 3 Grundtypen möglicher Weltmodelle zu entscheiden:

Wenn $q_0 = 1$ ist, wäre unser All elliptisch, wobei $R_0 = c/H_0 \approx 20 \times 10^9 \text{ L.J.}$ wird, und würde sich mit Lichtgeschwindigkeit ausdehnen, da lt. Gleichung (5) $\dot{R}_0 = H_0 R_0 = c$ wird.

Auch alle anderen positiven Werte für q_0 ergeben ein expandierendes Weltall, das bei einem sehr kleinen Krümmungsradius (3. Kapitel) begonnen hat. Wie wir im 3. Kapitel gesehen haben, erfolgte am Beginn die Expansion mit hoher Geschwindigkeit und wurde immer langsamer. In einem hyperbolischen Weltall ($k = -1$) wird die Expansion asymptotisch langsamer, kommt jedoch nie zum Stillstand.

In einer elliptischen Welt strebt der Weltradius einem Maximum zu, der durch

$$R_{\max} = R_0 \cdot \frac{2q_0}{2q_0 - 1} \quad (9)$$

gegeben ist, um sodann wieder zu schrumpfen, wobei eine Weltperiode (Ausdehnung und Schrumpfung) durch

$$t_w = \frac{2\pi}{H_0} \cdot \frac{q_0}{2q_0 - 1} = \frac{\pi \cdot R_{\max}}{R_0 H_0} = \pi \frac{R_{\max}}{R_0} \quad (10)$$

gegeben ist (oszillierende Welt). Wir sehen aus Gleichung (9), daß auch hier wieder der Wert $q_0 = 1/2$ ein Grenzwert ist, da für ihn R_{\max} gegen ∞ geht. Für q_0 etwa 1, würde sich R_{\max} noch bezüglich der derzeitigen Größe verdoppeln, also $R_{\max} = 2 R_0$ und die Weltperiode würde etwa 120×10^9 Jahre dauern. Unter diesen Voraussetzungen befinden wir uns derzeit erst am Anfang einer derartigen Weltperiode. Wie wir aus Abbildung 4.2 gesehen haben, ist das wahre Weltalter t geringer als die Reziproke der HUBBLE-Konstante, weil eben die Raumexpansion nicht gleichförmig erfolgte, sondern zu Beginn rascher ablief. Die genauere Rechnung ergibt für ein $q_0 = 1$

$$t = \frac{(\pi/2 - 1)}{H_0} = 11,4 \times 10^9 \text{ Jahre} \quad (11)$$

für $q_0 = 1/2$ ergäbe sich ein Alter von $13,4 \times 10^9$ Jahren und erst für ein offenes (hyperbolisches) Weltall mit sehr kleinem q_0 -Wert ergäbe sich ein Alter von

$$t = \frac{1}{H_0} = 20 \times 10^9 \text{ Jahre} \quad (12)$$

Nachdem der Krümmungsradius aus der Gleichung (8) berechenbar wird, können wir auch die Entfernung des Weltäquators durch Multiplikation mit $\pi/2$ berechnen für $k = +1$ zu

$$d_0 = \frac{\pi}{2} \frac{c\sqrt{k}}{H_0\sqrt{2q_0-1}} = \frac{30,6 \cdot 10^9}{\sqrt{2q_0-1}} \text{ L. J.} \quad (13)$$

Aus Gleichung (13) entnehmen wir, daß die Distanz des Äquators mit sinkender Verzögerungszahl immer mehr ansteigt und für $q_0 = 1/2$ (euklidisch) gegen ∞ geht. Die Rotverschiebung ergibt sich aus den EINSTEINSchen Feldgleichungen direkt als Ergebnis der Expansion! Nach LEMAITRE hat ein Lichtstrahl zur Zeit emittiert, als der Weltraadius R_1 war, wenn er heute empfangen wird, eine Rotverschiebung von

$$z = \frac{R_0}{R_1} - 1 \quad \text{daher} \quad (z + 1) \cdot R_1 = R_0 \quad (14)$$

(s. 3. Kapitel!)

Wenn man nun für die Krümmungsradien zeitabhängige Lösungen der Feldgleichungen einsetzt, läßt sich eine Beziehung zwischen der Rotverschiebung und der Distanz herstellen (Abb. 4.3)

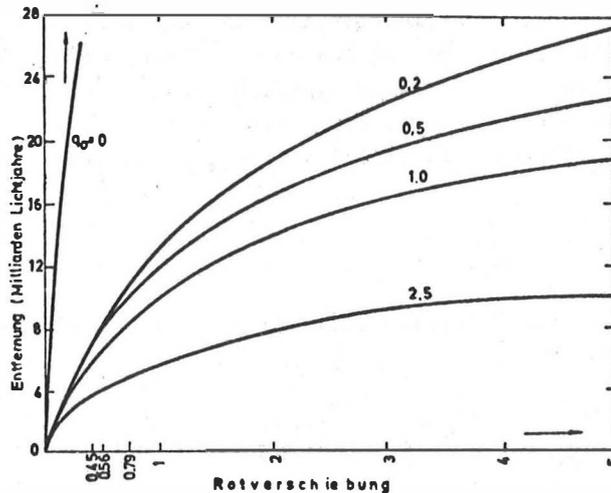


Abb. 4.3
Der Zusammenhang zwischen Rotverschiebung und Entfernung in Welten mit verschiedener Verzögerungszahl.

Oberhalb von 10^9 L.J. existiert keine lineare Abhängigkeit mehr zwischen der Rotverschiebung und der Distanz, vielmehr gelten dann die bereits erwähnten nichtlinearen, relativistischen Beziehungen, wie sie durch Gleichung (5b) gegeben sind. Wir sehen, daß auch bei gegen ∞ strebenden Rotverschiebungen die Distanzen endlich bleiben! Unsere Beobachtungen können daher immer nur einen Teil des Kosmos erfassen, genau gesagt, bis zum kosmischen Horizont (4.2.1). Dieser Raum umgibt jeden Beobachter als Kugel mit der Horizontalabstand d_n als Radius.

$$\sin \left(\frac{d_n H_0 \sqrt{2q_0 - 1}}{c} \right) = \frac{\sqrt{2q_0 - 1}}{q_0} \quad \text{für} \quad q_0 > \frac{1}{2}$$

Diese Formel läßt sich auch auf $q_0 = 1/2$ und $0 \leq q_0 < 1/2$ anwenden, wenn man den Sinus durch sein Argument bzw. den sinh ersetzt!

Für den euklidischen Raum ergäbe sich ein Radius d_n von (für $q_0 = 1/2$)

$$\frac{d_n H_0}{c} = 2 \quad \text{daraus folgt} \quad d_n = \frac{2c}{H_0} = 40 \times 10^9 \text{ L.J.}$$

In einem Universum mit sehr großer Verzögerungszahl könnten wir fast bis zum Antipol blicken. Wir haben im Abschnitt 4.2.1 die Begriffe kosmischer Horizont und kosmischer Äquator erläutert. Wir wollen nun die Formeln für den gekrümmten Raum herleiten. Aus der sphärischen Trigonometrie kennen wir die Beziehung für kleine Blickwinkel (parallaktische Winkel)

$$\delta = \frac{D}{R_1} \cdot \frac{1}{\sin \frac{d}{R_1}} \quad (16)$$

worin R_1 der Kugelradius, D die Länge eines Stäbchens quer zur Beobachtungsrichtung gelagert, d die Distanz von Beobachter auf der Kugeloberfläche gemessen und δ der parallaktische Winkel zu den Stabenden bedeuten. Diese Überlegungen lassen sich unmittelbar auf einen gekrümmten dreidimensionalen Raum übertragen: Nehmen wir einen "Augenblick" ein ruhendes Universum an, so müssen uns jene Objekte am kleinsten erscheinen (kleinster parallaktischer Winkel), welche am kosmischen Äquator liegen (s. 4.2.1). Jenseits desselben vergrößert sich der scheinbare Durchmesser wieder (s. Analogon zur Kugel), schließlich würde ein Objekt, am Antipol gelegen, unsere ganze Himmelssphäre "ausfüllen", da es in jeder beliebigen Richtung sichtbar würde. (Der Unterschied zwischen dem ruhend angenommenen und dem expandierenden All ist lediglich der, daß wir bei letzterem, den Blickwinkel für das betr. Objekt berechnen, wenn die Raumexpansion sofort nach der Lichtaussendung durch das Objekt aufgehört hätte.) Die "kosmische Breite" d/R wird in Gleichung (16) von der Expansion offenbar nicht beeinflußt (sie bleibt für ein Objekt, das bewegungslos im Raum schwebt, konstant), daher kann man dort an Stelle von R_1 auch den gegenwärtigen Wert R_0 einsetzen und mit Gleichung (14) kann die Größe R_1 vom ersten Quotienten durch R_0 substituiert werden, so daß sich für δ ergibt

$$\delta = \frac{D}{R_0} \cdot \frac{1}{\sin \frac{d}{R_0}} \quad (17)$$

die endgültige Beziehung von Distanz D und parallaktischem Winkel δ . Wie bereits dargelegt wurde, sehen wir Objekte in der Nähe des kosmischen Horizonts in dem Zustand, in dem sie sich kurz nach der Entstehung des Universums befanden. Da der Weltradius damals sehr viel kleiner war als heute, steigt der Quotient D/R_1 in Gleichung (16) für Objekte in der Nähe des Horizonts immer mehr an, je weiter wir in der Weltzeit zurückgehen. Und da wir ja bei den Objekten in Horizontnähe, wie gesagt, in die Vergangenheit weit zurückblicken, erscheinen uns nicht die Objekte im Antipol die ganze Sphäre auszufüllen, sondern ist dies bereits bei den uns viel näheren Himmelskörpern auf dem Horizont der Fall! Daher müßte in einem sehr leistungsfähigen Teleskop das Phänomen auftreten, daß gleich große Objekte mit zunehmender Distanz zuerst immer kleiner wurden, ein Größenminimum erreichten und hernach wieder größer erscheinen müßten.

A. SANDAGE hat 1961 die Abhängigkeit einiger astronomischer Größen von der Verzögerungszahl q_0 angegeben. So z.B. kann man für eine mittlere Galaxie, die im roten Spektralbereich als Objekt 19. Größe (Anhang zu 1. Kapitel) erscheint, aufgrund der der Abbildung 4.3. zugrunde liegenden Beziehungen, die zu einer bestimmten Distanz gehörige Rotverschiebung berechnen und diese Werte der scheinbaren Helligkeit und dem Winkeldurchmesser gegenüberstellen. Es bietet sich hier eine Testmöglichkeit für

unser kosmologisches Modell: in der Tabelle 4.4 ist in der 2. Spalte die Rotverschiebung für diverse Verzögerungszahlen q_0 berechnet worden. Für Objekte bis 19. Größe kann aus dem Spektrum direkt die Rotverschiebung ermittelt werden.) θ_m bedeutet den minimalen Winkeldurchmesser (s.o.) und d_m die dazugehörige Distanz.

q_0	z für $m_r = 19$	θ_m (sec)	d_m in 10^9 L.J.
0	0,45	2,05	∞
0,5	0,51	3,46	8,5
1	0,56	4,10	6,8
2,5	0,71	5,50	4,5

Tabelle 4.4

Unter den Lösungen von FRIEDMANN und LEMAITRE gibt es auch solche, die elliptisch sind und dennoch bis in die Unendlichkeit expandieren, allerdings nur unter Beibehaltung der kosmischen Konstante λ . Die Expansionsgeschwindigkeit nimmt bis zu einem Minimum ab, um mit steigendem Weltalter wieder zuzunehmen.

Nimmt man ein Universum an, in welchem die Strahlungsdichte dominiert (wie es laut 3. Kapitel anfänglich der Fall war), so erhält man zwar dieselben Grundtypen von Lösungen, aber der Übergang vom geschlossenen (elliptischen, sphärischen) Raum zum offenen wird jedoch von $q_0 = 1/2$ zu $q_0 = 1$ verschoben.

Das rührt daher, daß die Energiedichte bei einer Expansion nicht wie die Massenenergiedichte mit $1/R^3$ sondern stärker, nämlich mit $1/R^4$ abnimmt (s. STEPHAN BOLTZMANNsches Strahlungsgesetz).

4.3.3. WELTMODELLE UND WIRKLICHKEIT

Um nun unter den vielen möglichen Weltmodellen das richtige herauszufinden, müßte man die Materie- und Energiedichte $\rho(t)$, den Weltradius $R(t)$ dessen Expansionsgeschwindigkeit $\dot{R}(t)$ und die Verzögerung derselben $q(t)$ zu irgendeinem Zeitpunkt, etwa der Gegenwart, kennen. Leider ist keine dieser Größen direkt zu beobachten. Sie ergeben sich nur aus ihrem Einfluß auf andere beobachtbare Größen, wie etwa die HUBBLE-Konstante, die Rotverschiebung, die Verzögerungszahl q_0 etc. Da uns eine größere Zahl von ihnen zur Verfügung steht, als Unbekannte vorhanden sind, müßte es theoretisch möglich sein, das wahre Modell zu erkennen, jedoch sind die derzeitigen Kenndaten astronomischer Objekte noch mit so großen Fehlern behaftet, daß das richtige noch nicht mit Sicherheit erkannt werden kann. Schätzt man die Materiedichte durch Extrapolation ab, so gelangt man zu einem Wert von $3 \cdot 10^{-31}$ g/cm³, der viel kleiner ist als die kritische Dichte von $0,46 \times 10^{-29}$ g/cm³, demnach müßte unser Universum offen sein [26], mit einem q_0 von ca. 3×10^{-2} . Andere Beobachtungen deuten jedoch wieder auf ein größeres q_0 hin, was zur Annahme von verborgenen oder auch "fehlenden" Massen führt (Schwarze Löcher, überdichte praestellare Materie etc).

Die Bestimmung der HUBBLE-Konstante ist so schwierig, weil es nicht genügt, die Rotverschiebung der nächstgelegenen Galaxien zu deren Distanz in Relation zu setzen. Um die wahre Fluchtgeschwindigkeit zu finden, müssen wir zunächst die in die entsprechende Beobachtungsrichtung (radiale Richtung) fallende Komponente der Umlaufgeschwindigkeit des Sonnensystems um das galaktische Zentrum von ca. 300 km/sec und die Peculiarbewegungen der einzelnen Galaxien von etwa 200 km/sec (3.2.1) berücksichtigen. Man müßte daher die Rotverschiebung möglichst vieler jeweils gleichweit entfernter Galaxiengruppen bestimmen können, um aus dem Mittelwert jeder distanzgleichen Gruppe den wahrscheinlichsten Wert für die jeweilige Rotverschiebung zu ermitteln. Dieser Wert wäre dann frei, oder nahezu frei, von der Eigenbewegungskomponente. Diese Korrekturen können bis zu Distanzen von 3 Mpc (ca. 10×10^6 L.J.) größer als das gesuchte Ergebnis sein.

Bei weiter entfernten Galaxien tritt zwar die Fluchtbewegung deutlicher in den Vordergrund, jedoch wird hier die Distanzmessung wieder ungenauer, da wir diese nicht mehr aus der Perioden-Helligkeitsbeziehung der δ -Cepheiden (1. Kapitel) herleiten können. Wir sind jetzt auf die Differenz zwischen wahrer und scheinbarer Helligkeit von Riesensternen, Novae, sowie auf die Parallaxe (Winkeldurchmesser) von leuchtenden H II-Regionen (1.5 ff) angewiesen. Ab 60×10^6 L.J. sind diese Entfernungsindikatoren auch mit den größten Spiegelteleskopen (Mt. Palomar) nicht mehr auflösbar. Weiters kann die Isotropie in der Nähe großer Massenanhäufungen (Galaxienhaufen) gestört sein. Daher ist die wichtigste Größe, die HUBBLE-Konstante, derzeit noch recht unsicher. Der in dieser Arbeit immer wieder verwendete Wert von 50 km/sec.Mpc oder $15 \text{ km/sec.} \cdot 10^6$ L.J. ist ein geschätzter Mittelwert. Diese wahre Größe liegt sicher zwischen 30 und 100 km/sec.Mpc bzw. 9 bis 40 km/sec. 10^6 L.J.

Die Bestimmung der Verzögerungszahl q_0 ist noch schwieriger. Erst ab 10^9 L.J. werden die Abweichungen vom HUBBLE-Gesetz (Gleichung (5a))

$$\frac{z \cdot c}{H_0} = D \quad (5a)$$

so groß, daß wir sie trotz starker Streuung (Unsicherheit) der Einzelbeobachtung mit einiger Sicherheit nachweisen können (dazu s. Tabelle 4.4. in 4.3.2.). Da jedoch die genaue Messung des Winkeldurchmessers einer Galaxie sehr unsicher ist, da ja der äußere Rand kaum definierbar ist, scheint es aussichtsreicher, die Rotverschiebung einer Galaxie in Relation zu ihrer scheinbaren Helligkeit m_r zu setzen, da die hellsten Mitglieder von Galaxien in etwa dieselbe absolute (wahre) Helligkeit besitzen. Bei sehr fernen Objekten müssen wir allerdings evolutionsbedingte Helligkeitsänderungen berücksichtigen.

Wir sehen aus all dem klar und deutlich, daß wir ein reales, zufriedenstellendes Weltmodell erst dann erarbeiten können, wenn wir die Evolution von Sternen und Galaxien (Kosmogonie) genau kennen. Nur bei Galaxien mit Rotverschiebungen bis maximal $z = 0,5$ sind wir derzeit in der Lage anzunehmen, daß sie sich von denen unserer Umgebung nicht wesentlich unterscheiden. Man glaubt, die Verzögerungszahl derzeit auf 15% genau, bestimmen zu können. Eine Steigerung der Genauigkeit scheint, durch neue leistungsstärkere Instrumente bedingt, fast sicher. Ein Wert der Verzögerungszahl war 1972 mit $q = +0,95 \pm 0,4$ abgeleitet worden. Daraus hatte man ein elliptisches Weltall abgeleitet, doch neuere Untersuchungen deuten wieder ganz auf ein hyperbolisches All (nächster Abschnitt) hin.

1975 ist A. SANDAGE neue Wege gegangen: man stellte fest, daß in der Galaxienverteilung eine lokale Anisotropie herrscht, z.B. sind in Richtung auf den nördlichen galaktischen Pol etwa 4mal soviel Galaxien heller als 13^m vorhanden, als in südlicher Richtung. SANDAGE zog den Schluß, daß die HUBBLE-Konstante H_0 kleiner sein müßte, wo eine stärkere Materienansammlung auftritt. Die Messungen ergaben jedoch in beiden Richtungen keine signifikante Differenz, so daß er ein q_0 von kleiner 0,28 bei einem H_0 von 55 ± 5 km/sec.Mpc ableitete, was einem Weltalter $T \sim \frac{1}{H_0}$ von 18×10^9 Jahren entspricht. Könnte man das Weltalter $T \sim \frac{1}{H_0}$ (Abbildung 4.2) noch auf einem anderen Weg finden, wäre q_0 daraus berechenbar.

Nimmt man vereinfacht, aber plausibel an, der Kosmos wäre so alt wie die ältesten kosmischen Objekte (ältesten Kugelsternhaufen unserer Galaxie), also etwa $T = 14 \times 10^9$ Jahre, so erhält man einen oberen Grenzwert von $q_0 = 0,35$. Bei Quasaren fand man eine Rotverschiebung von $z_{\max} = 4$ und nimmt man an, daß auch diese Objekte in der Frühzeit des Kosmos entstanden sind, so leiteten SANDAGE und TAMANN ein q_0 von 3×10^{-2} und ein Weltalter von $18 \times 10^9 \pm 2 \times 10^9$ Jahren ab. Bei einer hyperbolischen Expansion, die sich aus der ermittelten kosmischen Dichte ergibt,

folgt lt. SANDAGE ein q_0 von $0,025 \pm 0,005$. Auch ein ganz anderer Ansatz, der die Häufigkeit des Deuteriums als wichtigen Ansatzpunkt verwendet, führt zu ähnlich niederen q_0 -Werten. H. ZIMMER will deshalb das oszillierende Weltmodell ad acta gelegt wissen. Der hyperbolischen Expansion entspricht bekanntlich ein negativ gekrümmter Raum ($k = -1$), der schneller als mit R^3 (V ist ∞) expandiert. Ist dieses Modell "richtig", so wird bei einem sehr kleinen q_0 -Wert ein erheblicher Teil der Raumkrümmung überblickbar, wenn erst die Beobachtungstechniken verbessert werden.

4.3.4. MATERIEDICHTE, ALTER DER CHEMISCHEN ELEMENTE UND DEUTERIUMHÄUFIGKEIT [26]

Vor nicht langer Zeit haben die Autoren GOTT, GUNN, SCHRAMM und TINSLEY versucht, die heterogenen "Parameter" Materiedichte, Alter der chemischen Elemente und Deuteriumhäufigkeit im Hinblick auf die Art eines kosmologischen Modells zu untersuchen. Die Ergebnisse der Untersuchungen kann man wie folgt zusammenfassen:

1. Der Verzögerungsfaktor ist schwer bestimmbar, aber zahlreiches, neueres Beobachtungsmaterial deutet darauf hin, daß er zwischen 0 und $1/2$ liegt (also hyperbolisches All). Große Werte, also solche größer 1 sind auszuschließen.
2. Das Weltalter wäre $1/H$, wenn es keine Verzögerungen der Expansion gäbe. Wie wir gesehen haben, muß das Alter aber geringer als $1/H$ sein (Abb. 4.2). Aus der Differenz des HUBBLE-Alters ($1/H$) und des tatsächlichen Alters kann man auch q_0 berechnen. Die ältesten Sterne in Kugelsternhaufen sind 8 bis 16×10^9 Jahre alt, wie Sternmodelle ergeben (1. Kapitel). Das Alter kann auch aus der relativen Häufigkeit von gewissen schweren Elementen abgeleitet werden. Daraus findet man Werte zwischen 8 und 18×10^9 Jahren.
3. Die Bestimmung der mittleren kosmischen Dichte ist die dritte Entscheidungshilfe zwischen einem offenen oder geschlossenen Weltall, denn allein die bekannte HUBBLE-Zeit $T = 1/H$ und der einigermaßen eingegrenzte Verzögerungsfaktor q_0 sind nicht ausreichend, um sicher zwischen offenem und geschlossenem Universum entscheiden zu können.

Eine untere Grenze für die kosmologische Dichte kann man durch die nur sichtbaren Galaxienmassen erhalten. Die Galaxienmassen sind aus der Beobachtung ihrer Gravitationskräfte mit Hilfe der NEWTONSchen Mechanik zu berechnen. (Wenn man im folgenden an Stelle der Dichte deren Parameter \mathcal{G} einführt, so bedeutet $\mathcal{G} = 1$ den Parameter für die Grenzdichte $\rho = 0,46 \times 10^{-29} \text{ g/cm}^3$.) Für die so berechnete Gesamtmasse (inklusive der überschweren, auch unsichtbaren Objekte, wie Schwarzschild-Singularität (S.L.)) erhält man nur ein \mathcal{G} von ca. 0.04, also einen Wert für ein sicherlich offenes Universum (hyperbolisch). Dieser Wert könnte einen Unsicherheitsfaktor von 3 haben, d.h. auch ein $\mathcal{G} = 0,12$ wäre noch durchaus mit den Beobachtungen in Einklang zu bringen, aber auch dieser Wert liegt noch beträchtlich unter dem Wert 1. Innerhalb des lokalen Superhaufens (Virgo Haufen), dem auch unsere Galaxie angehört, ist die Dichte 2,5mal so groß, wie außerhalb des Clusters. Bei kleinen \mathcal{G} -Werten spielt auch dieser Faktor 2,5 nur eine geringe Rolle. Diese Methode der Dichteschätzung läßt allerdings wesentliche Materiemengen unberücksichtigt, die gewissermaßen zwischen den Galaxien existieren könnten, bzw. in Form von unsichtbarer Energie ($E = mc^2$) vorhanden sind. Eine empfindlichere Indikator für die Dichte ist die Konzentration von Deuterium im nahen interstellaren Raum, der vom Satelliten COPERNICUS gemessen wurde. Daraus ergab sich eine mittlere Dichte von $4 \cdot 10^{-31} \text{ g/cm}^3$, was einem \mathcal{G} von 0,1 entspricht: Wäre das Universum 10mal so dicht, so würde beim Urknall nur ein tausendstel der beobachteten Deuteriummenge erzeugt worden sein, woraus folgt, daß Meßungenauigkeiten keine großen Unsicherheiten in der abgeleiteten Dichte ergeben (s.o.). Das Verhältnis der aktuellen Dichte zur kritischen Dichte ist $8/100$

für eine HUBBLE-Zeit von etwa $13 \text{ bis } 19 \times 10^9$ Jahren, d.h., daß die so abgeleitete mittlere kosmologische Dichte eindeutig für ein offenes Universum spricht, wenn man das einfachste Modell für die Extrapolation des gegenwärtigen Zustandes bis zum Big Bang anwendet. Andere, viel kompliziertere Modelle, die aber nicht auszuschließen sind, ergäben ein sehr viel dichteres und daher geschlossenes Universum. Außerdem hängt die Bedeutung der Deuteriumkonzentration vollständig von der Annahme ab, daß alles Deuterium kurz nach dem Big Bang entstand und dies ist keineswegs sicher!

Es bilden nun alle erwähnten Parameterbestimmungen, wie die des Verzögerungsfaktors q_0 , des Alters des Universums, der kosmologischen Dichte und der Deuteriumkonzentration unabhängige Einschränkungen für den Zustand des Universums. Sind die Messungen konsistent, so muß es eine Klasse von Modellen geben, die bei allen diesen Einschränkungen erlaubt ist. Tatsächlich existiert eine derartige Klasse und diese ist außerdem relativ klein, so daß interessante und einigermaßen gesicherte Voraussagen über die Zukunft des Universums möglich sind: die aus den Beobachtungen und deren Auswertungen abzuleitende Dichte scheint mit größerer Wahrscheinlichkeit einen Parameterwert von $0,04 < \Omega < 0,09$ zu ergeben. Dieser Wert liegt weit unter dem Wert, der für ein geschlossenes Universum nötig wäre, nämlich $\Omega = 1$. Zwei weitere Beobachtungen stimmen mit den Werten von Ω und der HUBBLE-Zeit $T = 1/H$ überein: erstens das berechnete Alter von Sternen in Kugelsternhaufen, welches empfindlich für die Heliumkonzentration ist, wobei diese wieder eng mit der Dichte des Universums korreliert ist. Die wesentliche Randbedingung erfordert ein Weltalter von $13 \text{ bis } 20 \times 10^9$ Jahren, was sowohl mit dem Ergebnis von SANDAGE und TAMANN, aber auch mit dem Wert von R.P. KIRSCHNER und J. KWAN vom California Institute of Technology übereinstimmt, welche auf ganz andere Art und Weise (explodierende Sterne in entfernten Galaxien) zu einem sehr ähnlichen Alter, nämlich $13 \times 10^9 < T < 22 \times 10^9$ Jahren, gelangten. J.R. GOTT und seine Koautoren ziehen folgenden durchaus plausiblen Schluß: Es ist bemerkenswert, daß die verschiedenen Faktoren wie

1. das Alter des Universums
2. die Masse der Galaxien (kosmologische Dichte)
3. die Verbreitung der chemischen Elemente
4. die beobachtete Expansionsgeschwindigkeit

auf die natürlichste Weise durch eines der einfachsten kosmologischen Modelle erklärt werden können. Dieses Modell beschreibt ein Universum, das in seiner räumlichen Ausdehnung unendlich ist, und das für immer expandiert. Das offene Universum ist noch keinesfalls bewiesen, aber schwerwiegende Faktoren liegen für diese Art des Universums vor.

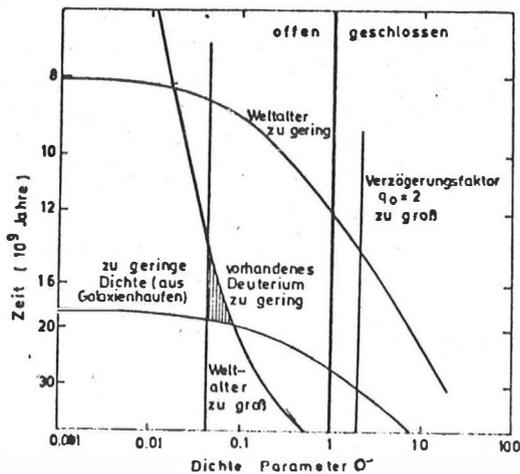


Abb. 4.5

Zusätzliche Randbedingungen deuten darauf hin, daß das Universum offen ist. Das vorhandene Deuterium gestattet eine höhere Materiedichte abzuleiten. Ein Maximum der Hubble-Zeit selbst wird durch das Sternenalter und das Alter der schweren Elemente definiert. Schließlich ergeben Massenberechnungen aus Galaxienansammlungen eine untere Grenze des Dichteparameters. Diese Randbedingungen grenzen alle erlaubten Modelle sehr ein (schräffierte Fläche), so daß als Endergebnis ein offenes, unendliches und ewig expandierendes Modell resultiert.

5. KONTAKT MIT EXTRATERRESTRISCHEN ZIVILISATIONEN?

Im letzten Kapitel soll über außerirdische Intelligenz und die Chancen der Kommunikation mit anderen Zivilisationen der Milchstraße berichtet werden. Dieses Thema ist nicht nur gegenwärtig sehr aktuell, sondern scheint als Abschluß dieser astrophysikalischen Zusammenschau auch notwendig zu sein. Vor knapp 18 Jahren, also 1960, wurde erstmals in Green Bank im US Staat West Virginia ein Radioteleskop auf einen anderen Stern gerichtet, um nach Radiosignalen extraterrestrischer Intelligenzen zu forschen. Dies war für die Menschheit der Erde der Beginn der **b e w u ß t e n** Suche nach interstellaren Intelligenzen. Unbeabsichtigt senden die Erdbewohner seit Beginn der Radiotechnik künstliche Radiosignale mit Lichtgeschwindigkeit durch den Kosmos und erreichen jedes Jahr etwa 20 neue Sterne.

In diesem Kapitel sollen jene Fakten erläutert werden, die Voraussetzung für die interstellare Kommunikation zweier oder mehrerer Zivilisationen sind: Die Gefahren der Selbsterstörung einer Kultur müssen längst überwunden sein, derzeit noch unbekannte Gesetze der Physik müssen erforscht sein, um Energiequellen, wie sie die Sterne darstellen, nutzbar machen zu können; für die Raumfahrt wären die Energien, die in den Schwarzen Löchern stecken, zu nutzen. Für das Entstehen von Intelligenzen sind die neuesten Erkenntnisse von Bedeutung und zwar: von Seiten der GALAKTOCHEMIE im Hinblick auf die chemische Evolution im interstellaren Gas, von Seiten der BIOPHYSIK und MOLEKULARBIOLOGIE wegen der Prozesse, die den eigentlichen Beginn des Lebens markieren,¹⁾ von Seiten der ASTROPHYSIK bezüglich der Entstehung des Sonnensystems und der Evolution der Erde als Schauplatz für die Entwicklung unserer Zivilisation, schließlich auch von Seiten der Radio-, Röntgen-, Infrarot- und Gravo-Astronomie bezüglich der Erkenntnis über die EXISTENZ hochentwickelter außerirdischer Intelligenzen. Eine Reihe von interessanten Publikationen sind gerade in den letzten zwei, drei Jahren über diesen Fragenkomplex veröffentlicht worden [18], [27].

Vorweggenommen darf werden, daß es bislang nicht gelungen ist, weder mit anderen Intelligenzen in Verbindung zu treten, noch künstliche Signale aus dem Weltraum zu empfangen. Beide Tatsachen sind aber noch kein unbedingter Hinweis, daß wir die **E I N Z I G E N** in unserer Galaxis sind.

5.1. MINIMALCHANCE FÜR DAS LEBEN DIE ÖKOSPHERE DER STERNE

Bevor auf die Anzahl der Sterne eingegangen wird, die überhaupt als Zentralgestirn mit Planeten in Frage kommen, sei festgestellt, daß eine nur relativ sehr schmale kugelschalenförmige Zone, in deren Zentrum der Stern liegt - die ÖKOSPHERE - als Raum für einen bewohnbaren Planeten gelten kann. 1970 hat der amerikanische Planetenphysiker St.H. DOLE versucht, die Entstehung der Planeten aus dem Sonnennebel auf dem Computer zu simulieren. Er veränderte dabei nach einem Zufallsverfahren die ursprünglichen Materieanhäufungen im Nebel, die Ergebnisse zeigten dennoch, daß es zu ähnlichen Systemen wie dem Sonnensystem kommen kann. Auffällig war bei den Ergebnissen, daß sich nahe der Sonne immer vier oder fünf leichte Planeten mit Massen von 0,10 bis 14,90 Erdmassen und anschließend ein oder zwei Riesenplaneten von der Dimension des Jupiters (318 Erdmassen) bildeten. In der Ökosphäre liegen fast immer Planeten mit Massen von 0,76 bis 1,70 Erdmassen!

¹⁾ Hier seien u.a. M. EIGEN und P. SCHUSTER genannt.

DIE ERDATMOSPHÄRE

Die Oberflächentemperatur der Urerde war etwa $1\ 500^{\circ}\text{C}$. In diesem Stadium sammelte sich möglicherweise aus der Kondensation heraus eine ziemlich dichte Uratmosphäre aus Kohlenmonoxyd, Wasserstoff und Stickstoff. Andere Moleküle wie etwa Methan oder Ammoniak wären bei so hoher Oberflächentemperatur zerstört worden. Die T-Tauri Phase der Sonne ließ die Sonne große Gasmassen ausstoßen, welche von den inneren Planeten die Uratmosphäre verdrängten. Durch vulkanische Prozesse entwickelte sich eine zweite Uratmosphäre. 1977 studierte M.H. HART von der NASA mit Hilfe von Computermodellen die Entwicklung der heutigen Erdatmosphäre aus der 2. Uratmosphäre. Sein überraschendes Ergebnis: Hätte die Erde nur einen wenig größeren oder kleineren Abstand von der Sonne, wäre die Entstehung von Leben auf unserem Planeten nicht möglich gewesen und zwar praktisch für alle Zeiten! [18/I/20, 18/I/21]. Aus diesem Umstand ergibt sich die schmale Kugelschale der Ökosphäre. Aus den Berechnungen von HART fiel die Oberflächentemperatur der Erde etwa 2×10^9 Jahre nach der Entstehung plötzlich von über 40°C (durch Treibhauseffekt) auf 9°C ab. Durch den Treibhauseffekt bedingt, war eine 100%ige Bewölkung vorhanden, die durch den Temperatursturz abregnete. Nach diesem 1. Klimawechsel, um etwa $2,4 \times 10^9$ Jahre nach der Entstehung, scheint es, daß die Evolution des Lebens gerade noch davongekommen ist. Die Temperatur sank auf den tiefsten Durchschnittswert in der gesamten Erdgeschichte. Nur wenige Grade tiefer und alle Meere hätten sich in eine Eiswüste verwandelt. Eine geringfügige andere Bahn um die Sonne oder ein um nur 1% ($1,5 \times 10^6$ km) größerer Abstand von der Sonne hätte die Temperatur bis unter 0°C absinken lassen, die gefrorenen Meeresoberflächen hätten das wärmende Sonnenlicht reflektiert, die Situation hätte der auf dem Mars geglichen. Auch in der Richtung zur Sonne hin war die Toleranz relativ gering. Ein um nur 5% geringerer Abstand hätte der Erde für immer eine überhitzte Treibhausatmosphäre (wie etwa auf der Venus) beschert. Zur Zeit des Klimasturzes stieg der Sauerstoffgehalt stark an, da alles Methan und Ammonium mit Sauerstoff reagiert hatte, des weiteren stieg auch der Stickstoffgehalt steil an. Die lebensvernichtende UV-Strahlung wurde nunmehr durch den Sauerstoff- und Ozonmantel von der Erdoberfläche abgeschirmt. Erst vor 420 Millionen Jahren war dieser Sauerstoff- Ozonmantel dicht genug, um die Erdoberfläche für lebende Organismen erträglich zu machen (Abb. 5.1).

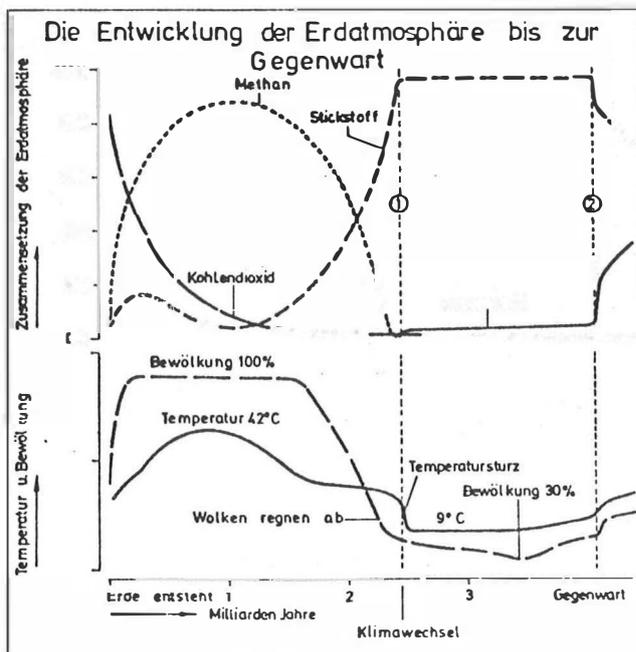


Abb. 5.1

Die mittlere Oberflächentemperatur der Erde fiel nach den Berechnungen von Michael H. Hart vor zwei Milliarden Jahren ab (Linie 1). Gleichzeitig regneten die Wolken ab. Vorher hatte der Treibhauseffekt die mittlere Temperatur auf über 40°C getrieben, wodurch viel Wasser der Weltmeere verdampfte und die Erde völlig mit Wolken bedeckte. Nach dem Klimawechsel wuchs auch langsam der Sauerstoffgehalt als genügend Ozon die UV-Strahlung der Sonne abschirmte, und dieser Vorgang auch die Erdoberfläche für Pflanzen bewohnbar machte; nahm der Sauerstoffanteil wegen der nun besonders wirksamen Photosynthese sprunghaft zu - Linie 2.

DIE ÖKOSPHERE DER STERNE

Die wichtigste Aussage, die aus HART's Berechnungen zu folgern ist, lautet: "Das Leben auf der Erde hat eine Minimalchance genutzt". Jahrzehntlang glaubte man diese Zone viel breiter und gab hierfür z.B. für die Erde einen Bereich von 0,7 AE bis 1,3 AE an [18/II/2], selbst DOLE gibt noch 0,785 bis 1,24 AE als Ökosphäre an. HART schränkt sie, wie bereits gesagt, auf 0,95 AE bis 1,01 AE (!) ein! Ein weiterer Umstand spielte noch eine Rolle, der erstmals von HART mitberücksichtigt wurde: die SONNENLEUCHTKRAFT stieg in den letzten 4 Millionen Jahren um 25% an und die Oberflächentemperatur nahm dadurch um 300° C zu.

HART meint dazu, daß diese Selbstaufheizung in geologischen Zeiträumen notwendig war, um einen kontinuierlich-bewohnbaren Planeten zu schaffen, da eine konstante (oder zu langsam anwachsende) Leuchtkraft des Sterns die Entwicklung einer Atmosphäre wie sie auf der Erde vorherrscht nicht ermöglichen hätte können. Daraus läßt sich folgern, daß Sterne, welche leichter als die Sonne sind, noch schmalere und natürlich auch näher beim Zentralgestirn liegende Ökosphären besitzen. Daraus folgt weiters, daß Sterne, die leichter als die der Klasse KO (größte K-Klasse) sind, keine kontinuierlichen bewohnbaren Zonen haben können (Tabelle 5.2).

Klasse	Masse (Sonne=1)	Sterntemperatur	Lebensdauer in Milliarden Jahren	Häufigkeit(%)
O	32	35 000°	0,001	0,08
B	6	14 000°	0,008	0,5
A	2	8 100°	0,81	0,81
F	1,25	6 500°	4,2	4,2
G	0,9	5 400°	10	10
K	0,6	4 000°	32	32
M	0,22	2 600°	210	47

Abb. 5.2

Lebensdaten der häufigsten Sterntypen

Zu den "bewohnbaren" Sterntypen zählte man vor DOLE außer den Sternen der Klasse G noch alle K-Sterne und auch die

kühleren M-Sterne (zumindest was den Temperaturparameter anlangt). DOLE zog die Grenze zur "Unbewohnbarkeit" allerdings bereits bei den K 2 Sternen. - Was die schweren heißen Sterne der Typen O, B, A und F anlangt, liegt ihre Ökosphäre weit entfernt vom Zentralstern. Jedoch haben sie eine zu kurze Lebensdauer (Tabelle 5.2), um auf allfälligen Planeten die Entwicklung von Leben zu gestatten. Bedenkt man, daß Leben auf der Erde 4,5 Milliarden Jahre zur Evolution benötigt hat, so schneiden auch schon alle F-Sterne aus und es bleiben schlußendlich; nach heutiger Erkenntnis, nur die G-Sterne als "lebensfördernd" übrig. (Die Sonne ist ein G 2-Stern.) Die maximale Ökosphäre besitzen G 0-Sterne und diese wird bis zu den G 9-Sternen immer schmaler. Auch selbst wenn der Planet zufällig in dieser schmalen Zone angesiedelt ist, genügt das noch nicht um auch "lebensspendend" zu sein; eine Serie weiterer Voraussetzungen lernen wir im nächsten Abschnitt kennen.

EIN PLANET UND SEINE KONTINUIERLICH BEWOHNAREN ZONEN

Im folgenden sollen nach ihrer Wichtigkeit geordnet, die weiteren Eigenschaften, welche für Bewohnbarkeit Voraussetzung sind, erwähnt werden:

MASSE: Die Masse des Planeten bestimmt die Schwerkraft und damit den Aufbau der Lufthülle mit dem entsprechenden Luftdruck. Zu "leichte" Planeten können keine Meere und keine atembare Atmosphäre halten. Zu "schwere" Planeten hingegen würden eine zu

dichte Atmosphäre bilden. (Auch leichtere Planeten können sehr dichte Atmosphären bilden, wie etwa die Venus, aber aus anderen Gründen, wie wir bereits gesehen haben.) Ein Planet mit erdähnlichen Lebensformen darf zwischen 0,4 und 2,35 Erdmassen besitzen. Daraus resultiert eine Oberflächenschwerkraft von 0,68 bis 1,5 g.

ROTATION: Auch sie spielt eine wichtige Rolle wegen der Ein- bzw. Abstrahlung. Ein typisches Beispiel ist hierfür der Planet Merkur: er dreht sich nur alle 2 Monate einmal um seine Achse, dadurch erhitzt sich die "Tagesseite" auf 350°C während die "Nachtseite" auf minus 170°C abkühlt. Eine zu rasche Rotation gleicht zwar die Temperatur sehr gut aus, kann aber die Stabilität der Planetenkruste gefährden. Daraus folgen die Grenzwerte mit 4 Erdentagen und 3 Erdentunden für die maximale und minimale Tageslänge bzw. Rotationsdauer für eine Umdrehung. ¹⁾

ACHSENNEIGUNG: Sie ist bekanntlich für die Bildung von Jahreszeiten verantwortlich. Je stärker die Planetenachse gegen die Umlaufebene geneigt ist, umso kleiner ist die Zone innerhalb der die mittlere Jahrestemperatur nur in gewissen Grenzen schwankt. Die Erdachse ist bekanntlich ca $23,5$ Grad geneigt, bei einer Achsneigung von 80° wären z.B. nur noch 10% der Planetenoberfläche bewohnbar, wenn gleichzeitig ihre Sternbestrahlung auf das 1,9fache der Erdbestrahlung durch die Sonne anstiege.

BAHNGEOMETRIE: Bei einer numerischen Exzentrizität größer als 0,2 würden sich die Temperaturschwankungen, hervorgerufen durch Sternnähe und Sternferne, drastisch auswirken. Wie empfindlich z.B. das Erdklima von den Eigenschaften der Bahngeometrie abhängt, zeigen die Eiszeiten. Der Geologe J.D. HAYS (Columbia University) behauptet, daß die Veränderungen der Bahngeometrie Eiszeiten verursachen [18/I/25]. Achsneigung und Erdbahn verändern sich bekanntlich periodisch, wobei sich diese Perioden überlappen und dadurch langfristige Klimaänderungen verursachen, und zwar ergibt sich eine 26 000jährige Periode für die Drehung der Erdellipse (Periheldrehung) um die Sonne: der relativistische Zusatzeffekt ist für die Erde vernachlässigbar (s.a. 1.1.7). Derzeit ist die Erde im Jänner im Perihel, in etwa 10 000 Jahren wird im Juli der sonnennächste Punkt der Erdumlaufbahn erreicht werden. Eine weitere, 41 000 Jahre währende Periode kippt die Erdachse zur Bahnebene so, daß die Erdachse im Extremfall aufrechter (Winkel zur Ekliptiknormalen wird kleiner als $23,50^{\circ}$) zur Ebene der Ekliptik steht. Den größten Neigungswinkel zur Ekliptiknormalen hatte die Erdachse vor 9 000 Jahren erreicht, so daß derzeit die Achsneigung abnimmt und daher die polaren Eiskappen anwachsen. 93 000 Jahre schließlich dauert die Periode, mit der sich die fast kreisförmige Erdbahn ($e = 0,017$) zu einer ausgeprägteren Ellipse und wieder zurück verändert. Derzeit hat die Erdbahn gerade eine mittlere Form zwischen elliptischer und nahezu kreisförmiger Bahnkurve. Mehrere Geophysiker hatten Theorien über die Wechselwirkung von Bahnänderungen und Eiszeiten entwickelt, jedoch fehlten entsprechende Unterlagen für das Langzeitklima. HAYS und sein Team konnten aus Bodenproben vom Meeresgrund des Indischen Ozeans den Klimaverlauf über die letzten 450 000 Jahre rekonstruieren. Damit konnten z.T. die alten Theorien (wie oben erwähnt) bestätigt werden.

5.2. ALTERNATIVE LEBENSFORMEN

Eine immer wieder gestellte Frage betrifft die mögliche andere chemische Grundlage als Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff für die Entstehung von Leben. Häufig wird

¹⁾ Die Grenzwerte der circadianen Rhythmik, welche für die biologische Evolution notwendig sind, liegen wesentlich enger, etwa zwischen 1/2 Tag und 2 Tagen.

eine Lebensform auf der Siliziumbasis diskutiert. Silizium kommt im Kosmos sehr selten vor und außerdem ist es schwierig, dafür ein Lösungsmittel zu finden und dies ist wichtig, denn Leben entsteht in seiner Urform immer nur in flüssigen Lösungen. Schließlich lassen sich mit Silizium keine besonders großen Moleküle aufbauen. C. SAGAN räumt als Exbiologe daher einem SILIZIUM-LEBEN kaum eine Chance ein.

Allerdings lassen sich komplexe Gebilde in Kristallform bilden (A.G. CAIRNS-SMITH [18/I/39]). Aber auch bei dieser Evolutionsgeschichte wird schließlich Nukleinsäure RNS u.a. organische Substanzen verwendet, die letztlich das "Kristall-Leben" ablösen und die uns vertraute Kohlenstoff-Ära einsetzen läßt.

Als weitere Alternative wurde eine Kohlenstoff-Chlor-Lebensform vorgeschlagen, ohne Wasserstoff also. Ebenso wurde eine Kohlenstoff-Ammoniak-(flüssig)-Lösung als Lebenselixier besonders für kalte Planeten (-180° C) erdacht. Beide Formen sind theoretisch denkbar.

Ein energiespendender Reaktionszyklus besteht, wenn Kohlendioxyd und Wasserstoff eingeatmet und dafür Methan ausgeatmet wird. Diese Art von Leben hat wahrscheinlich in der ersten Uratmosphäre existiert. Es gibt noch "Nachfahren", nämlich die bekannten Methanbakterien, die es heute noch auf der Erde gibt. Vorläufig darf jedoch festgestellt werden, daß die ca 50 Sorten interstellarer Moleküle ein ausgezeichnetes Zeugnis wider diese theoretischen Alternativen ablegen. Diese interstellaren Moleküle sind alle auf der Kohlenstoffbasis aufgebaut. Auch die anderen kosmisch häufigsten sind Wasserstoff, Stickstoff und Sauerstoff. Im ersten Kapitel konnten wir schon feststellen, daß die interstellaren Wolken, die im Zusammenhang mit neuen Sternen (Protosternen) stehen, vornehmlich diejenigen Elemente enthalten, die auch auf der Erde an der chemischen Evolution beteiligt sind. Schließlich übermitteln uns Meteore die gleichen organischen Funde. Es erscheint daher höchstwahrscheinlich, daß das Leben im Universum seine Existenz der Reaktionsfreudigkeit des Kohlenstoffs und dem Lösungsmittel Wasser verdankt.

5.3. WO UND WIE ZAHLREICH SIND INTELLIGENZEN IN UNSERER GALAXIS ANZUTREFFEN?

Wir können mit Sicherheit annehmen, daß im Sonnensystem kein außerirdisches Leben anzutreffen ist. Von einigen Wissenschaftlern wird vermutet, daß auf den Asteroiden Leben existieren könnte, etwa als Vertreter einer extraterrestrischen Zivilisation. Allerdings glauben auch diese sehr stark zukunftsorientierten Forscher nicht, daß etwa Leben auf dem Asteroidengürtel entstanden sei, vielmehr, daß es dorthin gebracht wurde, bzw., daß dort Beobachtungsstationen von galaktischen Zivilisationen ins Sonnensystem gelenkt wurden. Wenn man die zur Erde übermittelten Beobachtungsergebnisse aller bisherigen Raumsonden durchforscht, so kommt es zu dem eindeutigen Schluß, daß außer einigen komplexen organischen Molekülen keine Lebensformen im Sonnensystem zu erwarten sind.

Das Aufspüren von Planeten anderer Sterne ist äußerst schwierig. Das vom Zentralgestirn emittierte Licht überstrahlt das von der Planetenoberfläche nur reflektierte Sternlicht sehr stark, so daß nur die Möglichkeit der indirekten Bestimmung bleibt und zwar durch Messung von Veränderungen, die die Planeten in der Erscheinung des Sterns selbst auslösen. Am erfolgreichsten verspricht hier die Entdeckung von Schwerkrafteinflüssen der Planeten auf die Bahn des Zentralgestirns zu sein. Als Beispiel wird immer wieder die Entdeckung des Begleitsterns B von Sirius A auf indirekte Weise angeführt. Bei Planeten wird dieser Effekt erst bei den schwersten meßbar. Auf diesen ist aber wieder Leben, wie bereits erläutert, nicht möglich, d.h., daß wirklich interessante Trabanten von Erdgröße auf die Art und Weise unentdeckt bleiben werden. Die Sonnennachbarn Alpha Centauri (D = 5,9 L.J.) auch "Barnards Stern" genannt, sowie Tau Ceti und Epsilon Eridani wurden von P. van de KAMP (Sproull-Observatory USA) lange und eingehend nach vor-

handenen Planetensystemen untersucht und van de KAMP behauptet, solche auch nachweisen zu können.¹⁾ Tau Ceti und Epsilon Eridani wurden im sogenannten "OZMA-Projekt 1960 nach künstlichen Signalen erfolglos abgesehen.

St. H. DOLE präsentiert eine Liste von 14 Sternen im Umkreis von 22 L.J. um die Sonne, bei denen er bewohnbare Planeten aufgrund theoretischer Überlegungen für möglich hält. Die größten Chancen hat bei ihm Alpha Centauri A. Er ist ein G 4-Stern mit $1,08 M_{\odot}$ und trotz Gegenwart dreier Sonnen k ö n n t e ein bewohnbarer Planet existieren. Es sei hier auf eine alte (falsche) Theorie verwiesen, nach der Mehrfachsysteme keine stabilen Planetenbahnen tragen könnten. Dies gilt nach neueren Forschungsergebnissen nur für Doppelsterne mit mittlerem Partnerabstand (Umlaufperiode 1 Tag). Sind jedoch die Partner eng beisammen oder weit entfernt, bleibt die Bahn stabil und die Strahlungsintensität fluktuiert nicht zu stark. Aus Forschungsergebnissen vom Jahre 1977 folgt, daß vor allem weite Doppelsterne für Planetensysteme wirklich interessant sind. Die Astronomen H. ABT und S. LEVY (Kitt Peak Observatory USA) untersuchten 123 sonnenähnliche Sterne, ihr Ergebnis war wie folgt:

- 1.) 88 von 123 Sternen, d.s. rund 71%, gehörten zu einem Mehrfachsystem
- 2.) In weiten Doppelsystemen hat fast jeder der Partner noch zusätzlich einen engen Begleiter oder ein enges Planetensystem
- 3.) H.M. HAHN schließt daraus, daß jeder sonnenähnliche Stern (in einem weiten Doppelsystem) einen Begleiter besitzt, der ein Stern, ein Schwarzer Zwerg (ausgebrannter Weißer Zwerg) oder ein Planetensystem sein muß, um sich überhaupt zu einem stabilen Stern entwickeln zu können!

Über die Anzahl von Hochkulturen in der Milchstraße hat sich im September 1971 die Konferenz über Kommunikation mit außerirdischen Intelligenzen in Bjuřakan UDSSR eingehend befaßt. Zur Diskussion standen u.a. die einzelnen Faktoren der Formel von F. DRAKE und C. SAGAN über die Zahl der technologisch entwickelten Zivilisationen in der Milchstraße. Die Formel lautet [27]

$$N = R_{\star} f_p n_e f_1 f_i f_c L$$

Es bedeuten:

N = die Zahl der technisch entwickelten Zivilisationen in der Milchstraße

R_{\star} = die mittlere Geburtsrate der Sterne der Milchstraße per Jahr

f_p = der Bruchteil der Sterne mit Planetensystemen

n_e = die mittlere Zahl der erdähnlichen Planeten in der Ökosphäre dieser Sterne (die sich für Entwicklung von Leben eignen)

f_1 = der Bruchteil dieser Planeten wo der Ursprung des Lebens tatsächlich vorhanden war

f_i = der Bruchteil der belebten Planeten wo das ursprüngliche Leben Intelligenzen in einigen Formen entwickelte.

f_c = der Bruchteil der intelligenten Zivilisationen, die in eine Kommunikationsphase eintraten.

L = die mittlere Lebensdauer der Zivilisation mit fortgeschrittener Technologie

Bevor wir darangehen Überlegungen über die Faktoren anzustellen, sollen noch ein paar Feststellungen getroffen werden. Grundlage der Berechnungen bilden 3 Gebiete der modernen Naturwissenschaft und zwar:

- a) die astronomischen Theorien über die Sternbildung in der Milchstraße und wieviele davon ein Planetensystem besitzen, in dem wieder gerade Planeten in der Ökosphäre gebildet wurden (R , f_p , n_e zum Teil)
- b) die Galaktochemie, die Molekularbiologie und die Theorien über die Evolution des Lebens: auf welchen der begünstigten Planeten entsteht tatsächlich Leben und entwickelt sich in der Folge zu intelligenten Zivilisationen (f_1 , f_i , f_c)

¹⁾ Der österr. Astronom H. EICHHORN (Gainsville, USA) hat dieser Behauptung aus dem vorliegenden Datenmaterial vehement widersprochen.

c) schließlich setzen die Aussagen in der Soziologie den Schlußstein:
Regeln, die den Aufstieg und Verfall technologischer Kulturen beschreiben;
Gesetze, die unter Umständen abschätzen lassen, wie lange eine solche Zivilisation im Durchschnitt überlebt, bevor sie sich eventuell selbst zerstört (Erde - atomare Vorgänge) (L).

Nun soll die Größe und deren Wahrscheinlichkeit der einzelnen Faktoren - soweit überhaupt möglich - abgeschätzt werden:

Am wenigsten wissen wir über die Lebensdauer einer fortgeschrittenen Zivilisation (L), da wir ja nur eine - unsere eigene - kennen und über ihr Ende leider, oder Gott sei Dank, natürlich nicht Bescheid wissen. Wir werden sehen, daß aber gerade diese Zahl auch bei einer auf völlig anderen Grundideen aufgebauten Berechnung eine eminente Rolle spielt.

Es wird gleich eingangs bemerkt, daß die einzelnen Zahlenangaben eine Mischung aus halbwegs gesichertem Wissen, "Fastunwissen" sowie auch aus Spekulationen darstellen.

Die Bildungsrate der Sterne in der Milchstraße liegt zwischen 1 [1] und 10 [27] p.a. also:

$$1 < R < 10$$

wobei sich R offenbar mehr der Zahl 10 als der Zahl 1 nähert!

Der Bruchteil der sonnenähnlichen Sterne kann mit einiger Sicherheit noch abgeschätzt werden. Als obere Grenze könnte man alle G-Sterne, also lt. Tabelle 5.2, 10% ansetzen. Als unteren Grenzwert mußte man diese 10% noch mit den Faktoren 0,9 (nur Sterne der Hauptsequenz, d.s. 90%) und 0,52 (Einzelsterne, vermehrt um weite Partner von Mehrfachsystemem) multiplizieren. Es ergibt sich ein Wert von 4,5% , daher

$$0,045 < f_g < 0,10$$

(Dieser Faktor ist in der Formel von C. SAGAN nicht enthalten, sondern scheint in der von BREUER [18] wiedergegebenen auf.)

Auch der Faktor f_p ist noch relativ gut gesichert, man geht davon aus, daß jeder zweite Stern von Planeten umkreist wird, also ergibt sich für

$$f_p = 0,50$$

(GOLD empfiehlt eine Größe um 1, etwa zwischen 1/2, und 1/4 liegend.

Ab nun werden die Faktoren unsicher bis spekulativ. Bei wieviel Sternen mit Planeten sich ein erdähnlicher Planet in der Ökosphäre bewegt (n_e) weiß man nicht. DOLE schätzte 1970 etwa 645×10^6 mögliche Planeten als Heimstätten von Zivilisationen. Nach den Berechnungen von HART für die Ökosphäre zu Sternen schrumpft die Zahl auf weniger als 10^6 bewohnbare Planeten. Wenn man jetzt noch die Ansicht PAPAGIANNIS [18/59] in Betracht zieht, wonach nur auf einem von 10^6 Planeten der Übergang zu einer oxydierenden Atmosphäre aus einer reduzierenden, durch Photosynthese gelingt, so gelangt man zu dem Schluß, der sich übrigens mit der Ansicht R. BREUERS deckt, daß wir derzeit doch (noch) die einzigen Intelligenzen un unserer Galaxis sind. C. SAGAN will auch für n_e den Wert um 1 angesetzt wissen.

Den Bruchteil von Planeten wo Leben entstand (f_1) und den Bruchteil dieser belebten Planeten wo Leben auch Intelligenzen entwickelt (f_i), kann man eher raten, als berechnen. Nach optimistischen Ansichten sollten weit mehr als 10% aller belebten Planeten auch intelligente Lebensformen entwickeln, ja dieser Faktor wird oft mit 1 angenommen: (PLATT, SAGAN [27] S. 165 ff).

$$0,10 < f_i < 1$$

In diesen Faktoren steckt die komplexe wechselseitige Beeinflussung der Theorie junger Planeten-Atmosphären einerseits und der verwickelten Biochemie der Lebensentstehung andererseits. Diese Prozesse sind noch reichlich unbekannt. Es wäre daher durchaus

möglich, daß z.B. für f_1 dadurch Werte resultieren, die 10^{-3} mal kleiner sind als bislang angenommen. Allerdings nehmen CRICK, ORGEL sowohl für f_1 als auch für f_c Werte in der Nähe von 1 an. ([27] S 165 ff)

$$10^{-3} < f_1 < 1$$

Der Faktor f_c wird von mehreren Wissenschaftlern (PLATT, LEE, CRICK, ORGEL (27)) als in der Nähe der Einheit, also 1 angesiedelt.

$$f_c \sim 1$$

Für das Produkt $f_1 \times f_i \times f_c$ wurde in Bjurakan [27] nach tagelanger Diskussion ein Wert zwischen 1 und "einem sehr kleinen Bruchteil" festgelegt. Nach C. SAGAN ergab sich ein Durchschnittswert aufgrund der Diskussion aller Teilnehmer von 10^{-2} für dieses Produkt. Wenn wir nun diese Werte, die sich mehrheitlich um die Einheit herum bewegen, einsetzen, gelangen wir zu der Gleichung

$$N = 10^1 \times 1 \times 1 \times 10^{-2} \times L = 10^{-1} \times L \text{ in Jahren.}$$

Daraus ergäbe sich, ohne die mittlere Lebensdauer einer Zivilisation abschätzen zu müssen, die "Entstehungsrate" je Zivilisation in unserer Galaxis mit 10 Jahren. Demnach wären wir eine der jüngsten Zivilisationen, da wir ja erst seit etwa 10 Jahren "entstanden" sind, indem wir seit 10 Jahren versuchen, Kontakt mit anderen Intelligenzen aufzunehmen. Eine Reihe von Teilnehmern der Konferenz von Bjurakan [27] setzte eine Zahl von 10^7 Jahren für L als durchaus realistisch ein, wenn diese Zivilisationen gegen Selbstzerstörung und Verlust des Kommunikationsinteresses stabilisiert werden. Die Diskussionen über diesen Faktor waren außerordentlich interessant und weitreichend: LEE wies in seinem Diskussionsbeitrag auf den ungeheuren Einfluß der "Diffusion", wie er es nannte, hin und meinte damit eine Zivilisation, welcher Unterstützung zuteil wurde von einem extraterrestrischen Spender im Hinblick auf das Intelligenzniveau oder/und das Technologieniveau. LEE schildert ein mögliches Szenarium für die Entwicklung einer technischen Zivilisation wie folgt:

Stadium 1 ist das selbständig (primär) entwickelte und erreichte Niveau der Zivilisation. Im Stadium 2 sucht sie Kontakt mit extraterrestrischen Intelligenzen (CETI = Contact with Extraterrestrial Intelligence). Die dazu nötige Ausrüstung ist weitgehend, wenn nicht ausschließlich, für "Empfang" konzipiert.

Im späteren Zeitpunkt des 2. Stadiums werden "Sender" konstruiert um den Spender - ETI zu informieren. In diesem Stadium wird mehr "absorbiert" als "emittiert".

Im 3. Stadium wird die Zivilisation zum Exporteur des technologischen know-how, es werden Sender konstruiert, um andere ETI's zu erreichen und es wird mehr emittiert als absorbiert.

Im 4. Stadium wird schließlich ein hochentwickeltes experimentelles Stadium erreicht, wobei die Errungenschaften auf andere Planetensysteme durch direkten Kontakt gebracht werden.

Stadium 1 und 2 entsprechen dem KARDASHEV TYP I (s.u.)

Stadium 3 entspricht dem KARDASHEV TYP II und

Stadium 4 etwa dem KARDASHEV TYP III

Auf der Erde hätten wir demnach das Stadium 1 erreicht und bemühen uns in das Stadium 2 zu gelangen, wobei wir trachten, ein ETI im Stadium 3 zu finden. Es ist klar, daß kontaktierende technische Zivilisationen sehr "langlebig" sein müssen oder aber sie sind so hoch entwickelt und haben daher einen extrem ausgeprägten Sinn für kontinuierliche Forschung (über viele Generationen hindurch).

Einige Autoren haben konkrete Zahlenangaben über die von ihnen geschätzten oder berechneten oder sonstige ermittelten Intelligenzen mit technologisch kommunikations-

fähiger Gesellschaft gemacht:

Autor	N	Literatur	Anmerkung	gegenseitige Distanz
L.E. NAVIA	8 333 (1)	(18/74)	1977	1200 L.J.
J. HERRMANN	100 000	(18/75)	1974	500 L.J.
R. BRACEWELL	} 10 ⁶ bis mehrere 10 ⁶			246 L.J.
F. DRAKE				
C. SAGAN				
B. OLIVER		(18/76)	1975	
D. CAMERON	10 ⁷			112 L.J.
H. SHAPHLEY	10 ⁸		1958!	50 L.J.
R. BREUER	1 (1)		1978	-----
FORMEL VON DRAKE-SAGAN				
max.	10 ⁶		1979	246 L.J.
min.	0,2		1979	-----

Tabelle 5.3

Auf völlig anderer Basis ist die nachstehende Berechnung ausgeführt:

Von HOERNER wollte die Distanzen zu den nächsten Intelligenzen abgeschätzt wissen. Er setzt zwei grundsätzliche "Axiome" fest: "Nichts ist einmalig" und "Nichts dauert ewig", daraus können wir ableiten: das Leben auf der Erde ist etwas "durchschnittliches" (average) und nichts "besonderes". Wir können mit $n = 1$ Statistik treiben, wenn wir für das Mittel (erste Moment) einen Schätzwert finden. Jedoch können für die höheren Momente und daher auch für den mittleren Fehler keine Angaben gemacht werden, d.h., wir können uns als etwas "durchschnittliches" bezeichnen, was die höchste Wahrscheinlichkeit besitzt, aber wir haben keine Ahnung, wie unrichtig diese Aussage hinsichtlich des stochastischen und systematischen Fehlers ist. Daher sagen wir: wir sind etwas "durchaus nicht einmaliges", wobei diese Aussage einen sehr großen Vertrauensbereich (Streubereich) besitzt.

Der Bruchteil aller Sterne, die als Zentralgestirn für Intelligenzen tragende Planeten in Frage kommen, beträgt ca. 0,045 und zwar 0,90 (Sterne der Hauptsequenz) \times 0,10 (Spektraltyp G) \times 0,52 (Einzelsterne und weite Partner von Mehrfachsystemen) = 0,045. Davon haben Planeten in der Ökosphäre 50% ([19] S. 701) daher ist $\nu_0 = 0,0225$, d.h., 2,25% aller Sterne kämen als Trägersterne mit Planeten in der Ökosphäre in Frage (siehe auch [27] S. 173).

"Nichts dauert ewig" soll bedeuten, daß unser gegenwärtiger Zustand mit der starken Vorherrschaft von Wissenschaft und Technologie nicht das einzige Evolutionsultimo ist. Es kann durchaus geschehen, daß andere Interessen und Aktivitäten diese Vorherrschaft überflügeln. Die Technologie birgt Gefahren in sich, welche Krisen entstehen lassen können, die ihrerseits das Ende des technologischen Zeitalters bedeuten könnten. Als erste und vielleicht größte Gefahr ist die Überbevölkerung anzusehen. Eine "bestanschließende" Kurve für die letzten 2 000 Jahre, sagt bereits für das Jahr 2 026 eine gegen ∞ strebende Bevölkerungszahl voraus. Keine Technologie, auch nicht die perfekteste, kann hier eine Rettung bringen. F. DRAKE zeigte, daß auch die interstellare Expansion machtlos ist, denn bei einer 2%igen Wachstumsrate per anno (derzeitiger Wert) ist die Grenze dann offenbar erreicht, wenn man z.B. den Radius eines kugelförmigen Raumes, in welchem alle bewohnbaren Planeten besiedelt werden sollen (bei 2%iger Expansionsrate per anno), bereits mit Lichtgeschwindigkeit vergrößern müßte: Das Resultat ist überraschend: der Grenzradius ist bereits bei 50 pc also rund 150 L.J. erreicht. Innerhalb dieser Sphäre existieren etwa 30 000 (bewohnbare) Planeten und wenn wir heute mit dem ersten Planeten beginnen und mit 2% Wachstumsrate rechnen, so sind in nur

500 Jahren alle Planeten so dicht wie die Erde bevölkert und das Problem ist das gleiche wie auf der Erde heutzutage! Oder betrachten wir laut F. DYSON das Modell einer circumstellaren Sphäre in der künstliche Satelliten gebaut werden, so daß möglichst alle Zentralsternenergie genutzt werden kann (Kardashev Typ II-Zivilisation) und außerdem würde man den Lebensraum dieser Zivilisation mit dem Faktor 10^8 (!) vergrößern können! Wieder würde bei 2%igem Wachstum per anno vorausgesetzt, in nur 1000 Jahren der Lebensraum trotz 10^8 maliger Vergrößerung aufgebraucht worden sein. Hoffnungslos, keine noch so perfekte Technologie kann das Problem lösen!

Als zweite Krise ist die der Selbstzerstörung anzusehen. 10% aller menschlicher Anstrengung dient der Herstellung von Waffen aller Art. Daraus resultiert nach v.WEIZSÄCKER, daß das gegenwärtige Patt der Großmächte nicht für alle Zeiten stabil bleiben kann.

Die dritte Krisis ist die der genetischen Degeneration. Die Zeitspanne hierfür wird enige 10^3 Jahre benötigen. Der Ausweg daraus besteht in einer künstlich gedämpften "Aufzucht". ¹⁾ Eines Tages wird man damit beginnen müssen. [27]

Um all diese Krisen zu überstehen, müssen die überlebenden Zivilisationen strenge Stabilisierungsmaßnahmen ergreifen, die zu Stagnationen auf vielen Gebieten führen werden.

Schließlich kann die Größe L des technischen Zustands definiert werden durch den Wechsel des Interesses oder durch eine von mehreren Krisen.

Wenn T das Alter der ältesten Sterne und damit etwa das Galaxienalter ist und ν den Bruchteil aller Sterne bezeichnet, auf deren Planeten wir derzeit eine technologische Zivilisation erwarten, so folgt für

$$\nu = \nu_0 L/T \quad (T = 10^{10} \text{ Jahre}) \quad \text{und}$$

D als den mittleren Abstand zwischen den benachbarten Zivilisationen:

$$D = D_0 \nu^{-\frac{1}{3}} = D_0 \left(\frac{T}{\nu_0 L}\right)^{\frac{1}{3}}$$

wobei für D_0 der Abstand der nächsten Sterne, also 1 pc, eingesetzt werden kann, (Die Tabelle 5.4 ist für die 10 nächsten Sterne mit $D_0 = 2 \cdot 1$ pc und daher auch für die 10 nächsten ETI berechnet.)

Der Exponent von ν ergibt sich aus der Tatsache, daß im R^n die i -fache Punkteanzahl in einem abgeschlossenen Bereich einen durchschnittlich um das $i^{1/n}$ kürzeren mittleren Abstand der Punkte bedingt.

Lebensdauer L Jahre	Bruchteil aller Sterne	Entfernung D Parsec	Wartezeit t_w Jahre	D L.J.
100	$2,25 \times 10^{-10}$	$2\ 480 \times 1,4$	22 680	11 340
300	$6,75 \times 10^{-10}$	$1\ 720 \times 1,4$	15 700	7 850
1 000	$2,25 \times 10^{-9}$	$1\ 150 \times 1,4$	10 500	5 250
3 000	$6,75 \times 10^{-9}$	$796 \times 1,4$	7 270	3 635
10 000	$2,25 \times 10^{-8}$	$534 \times 1,4$	4 870	2 435
30 000	$6,75 \times 10^{-8}$	$370 \times 1,4$	3 390	1 695
100 000	$2,25 \times 10^{-7}$	$248 \times 1,4$	2 268	1 134
300 000	$6,75 \times 10^{-7}$	$172 \times 1,4$	1 570	785
1 000 000	$2,25 \times 10^{-6}$	$115 \times 1,4$	1 050	525
10 000 000	$2,25 \times 10^{-5}$	$52 \times 1,4$	476	238

Tabelle 5.4

¹⁾ Engl.: Genetical Engineering

Diese Tabelle steht in gewissem Einklang mit der Tabelle 5.3 und zwar insoferne, als es ziemlich hoffnungslos für unsere Generation scheint, auf künstliche Funkzeichen als A n t w o r t auf unsere Signale zu warten. Dennoch wäre es durchaus möglich, künstliche Signale von Außerirdischen aufzufangen; daher werden auch Anstrengungen unternommen (Projekt Cyclops), derartige eventuelle Signale nicht zu "überhören". Bevor wir uns den letzten Abschnitten dieses Kapitels zuwenden, noch ein Vorschlag des Sowjet-Astronomen N.S. KARDASHEV aus dem Jahre 1964: Den ENERGIEUMSATZ als ein Maß für die Klassifikation des technologischen Standards einer Zivilisation [18/61] zu verwenden. Er unterscheidet 3 Typen von technologischen Standards:

Typ I: Technologisches Niveau wie etwa auf der Erde, mit einem Energieverbrauch von 4×10^{12} Watt; d.h., unsere Zivilisation hat ein Leistungsreservoir von zusammen 4×10^{12} Watt, das entspricht ca. 1 Million Triebfahrzeugen der Reihe 1042 der ÖBB.

Typ II: Technologische Zivilisationen die in der Lage sind bereits Sternenergien "anzuzapfen"; sie verfügen daher über ein Energieaufkommen von bereits 4×10^{26} Watt.

Typ III: Zivilisationen, die Energien kontrollieren, die mit der Strahlung einer Galaxie vergleichbar sind, etwa 4×10^{37} Watt.

Es ist durchaus möglich, daß die Galaxien von Zivilisationen aller 3 KARDASHEV-Typen bevölkert sind.

DREI HYPOTHESEN

Die ERSTE dieser Hypothesen sagt, es gibt keine extraterrestrischen hochentwickelten technologischen Zivilisationen. Sie läßt jedoch zu, daß jede Menge auch intelligenter Lebewesen vom KARDASHEV-Typ kleiner I in der Galaxis existieren. Dies widerspricht eklatant allen Schätzungen des vorigen Abschnitts und leugnet die Annahme, daß Leben die Tendenz hat, in den verfügbaren Raum hinein zu expandieren. Diese Expansionsannahme ist vorläufig nicht bewiesen, vielmehr gilt sie vorerst nur für die Erde und auch hier nur für relativ kleine Zonen und für die Frühstadien von Organismen. Für die Menschheit wäre auch eine Expansion nach "Innen" denkbar und könnte wie folgt aussehen:

- 1) In der industriellen Wachstums- und Lernphase - die wir offenbar bald überstanden haben werden - häuft die Menschheit materielle Güter an. Dadurch wird der Planet Erde seiner Rohmaterialien beraubt und es folgt
- 2) die nachindustrielle Phase der Gesellschaft, in der vorwiegend WISSEN und INFORMATION zur begehrten "Ware" werden. Dazu ist eine weitere Expansion nicht unbedingt erforderlich.

Der Anreiz zu weiteren technologischen Evolutionen kann schon durch eine Veränderung der Hauptinteressen einer Zivilisation verlorengehen (s.o.). Eine Stabilisierung nach "Innen" schließt natürlich Kontakte nach "Außen" keinesfalls aus. Der Stabilisierungsprozeß kann nur dann ablaufen, wenn sich v e r n u n f t d o m i n i e r t e s Handeln durchgesetzt hat. (ist auf der Erde derzeit keinesfalls vorhanden). In einer überlebensfähigen, stabilisierten, also auch bevölkerungsmäßig konstanten Zivilisation besteht kein Anreiz mehr für Raumfahrt als Ausdruck von Expansion und Emigration. Eine Gesellschaft, unfähig sich zu stabilisieren, erleidet, wie bereits erläutert, nach S. HOERNER [18/III 5] vermutlich 3 kritische Phasen

- 1) BEVÖLKERUNGSEXPLOSION
- 2) SELBSTZERSTÖRUNG und
- 3) GENETISCHE DEGENERATION

(bedauerlicherweise erleben wir bereits die erste Phase selbst und stehen eventuell vor der 2. Phase). Will man jedoch durch diese Theorie die Abwesenheit von technologischen Zivilisationen erklären, müßte für jede extraterrestrische Rasse, unabhängig von ihrer biologischen, psychologischen oder politischen Struktur, diese Erklärung gelten, auch noch für alle Zeiten ihrer geschichtlichen Entwicklung. Die nächste Hypothese versucht diesem Einwand zu entgehen.

Die ZWEITE Hypothese besagt, daß unsere Theorien über die Evolution des Lebens falsch sind; wir sind vielleicht doch die E I N Z I G E N. Darnach muß die Zahl N (Zahl der technologischen Zivilisation in unserer Galaxis) gewaltig reduziert werden. Wie wir bei der Abschätzung der Faktoren in der DRAKE-SAGAN-Formel bereits gesehen haben, ist diese Reduktion durchaus plausibel, wenn wir die Unsicherheit in den Parametern für die Bestimmung folgender Größen betrachten.

- a) f_1 relative Anzahl der Planeten in der Ökosphäre eines Sterns
- b) f_i relative Anzahl der Planeten auf denen biologische Evolution tatsächlich zu intelligentem Leben führt.

Diese beiden Faktoren können auch Werte erreichen, die nur 10^{-3} ihres angenommenen Wertes betragen!

Der Übergang von primitiven Einzellern zu komplizierten Lebensformen dauerte auf der Erde 3×10^9 Jahre und könnte überhaupt eine Barriere in der biologischen Evolution darstellen. Eine weitere Barriere könnte die Entwicklung der Atmosphäre darstellen. Während dieser 3×10^9 Jahre veränderte sich die Atmosphäre radikal von einer kohlendioxidreichen Lufthülle zu einer Sauerstoff-Atmosphäre. Eine Serie von Faktoren mußte zusammenpassen:

- a) Temperatur über 0°C - Wasser durfte nicht gefrieren.
- b) UV-Strahlen mußten durch genügend dicke Ozonschicht abgehalten werden.
- c) Vorher jedoch mußte die UV-Strahlung bei der Entstehung einfacher Bio-Moleküle mitgeholfen haben.
- d) Größe des Planeten (M, g), Neigung der Rotationsachse (Jahreszeiten), Exzentrizität der Umlaufbahn mußten so aufeinander abgestimmt sein, um über Jahrmilliarden genau die erforderlichen Temperaturschwankungen zu gewährleisten. Die Zusammenhänge all dieser Faktoren zur Schaffung einer Sauerstoffatmosphäre sind noch nicht geklärt. Aber hier könnte auch eine Ursache für die krasse Reduktion von N liegen. PAPAGIANNIS fordert daher noch einen zusätzlichen Faktor in der Formel für N , der diesen differenziellen physikalischen und auch chemischen Erfordernissen lebenstragender Planeten gerecht wird. Er nennt sogar eine Zahl, nämlich 10^{-6} d.h., daß nur auf einem von einer Million Planeten die Umstände zu einer Sauerstoffatmosphäre führen, damit wäre man bei einer Größe von N ca. 1 angelangt.

Dennoch glauben viele Wissenschaftler (z.B. J.A. BALL, Havard University und E.M. JONES [18/II/63,64] wir werden von "außen her" beobachtet, ohne daß wir es bemerken und so gewissermaßen in einem "galaktischen Zoo" gehalten, dies behauptet auch

die DRITTE Hypothese. Welchen wissenschaftlichen Wert haben diese Hypothesen, die natürlich nur als Denkanstöße zu werten sein sollen? Die Zoo-Hypothese ist so formuliert, daß wir von der Erde aus unsere Beobachter nicht feststellen können. Man kann sie nur widerlegen, wenn wir:

- a) doch noch außerirdische Signale feststellen können oder
- b) wir machen uns selbst auf die lange Reise durch unsere Galaxis, um diese "Abschirmung" zu durchbrechen und unsere "Beobachter" stellen zu können.

Hypothese FINS wird durch die zunehmend besser werdenden Beobachtungsmöglichkeiten relativ bald überprüfbar werden, da man schon in den achtziger Jahren (Projekt Cyclops)

solche Genauigkeiten erreichen wird, daß technologische Zivilisationen, die eventuell in der Galaxis vorhanden sind, nicht mehr ü b e r s e h e n werden können.

Nichttechnologische, jedoch intelligente Lebensformen wie sie Hypothese EINS nicht a u s - s c h l i e ß e n will, lassen sich tatsächlich nur durch Lokalaugenschein widerlegen; im wesentlichen derselbe Aufwand bzw. Vorgang wie zur Überprüfung von Hypothese DREI. Eine Menge von Gründen lassen sich angeben, warum eine SUPERZIVILISATION nicht mit uns kommunizieren möchte:

- a) eine Superzivilisation interessiert sich nicht für unsere Technologie (auch wir haben kein Verlangen mit unseren Protozoen oder bakteriellen Vorfahren in Kommunikation zu treten).
- b) höchstens unser kulturelles Wissen und der historische Werdegang könnte für sie interessant sein. Jedoch könnte der vorzeitige Kontakt mit einer Superzivilisation unsere Entwicklung durch einen KULTURSCHOCK verändern. Dadurch würden wir Wissen nur mehr absorbieren und selbst den galaktischen Wissensvorrat nicht mehr bereichern.
- c) Sollte es bei uns für die Superzivilisation interessante Güter geben, so könnten sich die Außerirdischen diese sicherlich leicht, ohne offenen Kontakt, verschaffen. Täglich verschwinden scheinbar Menschen auf dieser Erde und so könnten die Extraterrestrischen auch alle anderen beliebigen Dinge ohne Aufsehen "verschwinden lassen".

Bei der Suche nach Außerirdischen könnte der

ASTEROIDENGÜRTEL

noch eine Rolle spielen. Er scheint auch als zukünftiges Siedlungsgebiet für Erdenbewohner gut geeignet zu sein und zwar weil:

- a) wichtige Materialien leicht aus den meter- bis kilometergroßen Asteroiden gewonnen werden können,
- b) die Zerstörung von Raumstationen durch Meteoriten dort nicht häufiger zu erwarten ist als anderswo im interstellaren Raum, da die Sonden PIONEER 10 und 11 auf ihrem Flug durch den Asteroidengürtel dies bewiesen haben,
- c) und die Möglichkeit, Sonnenenergie zu tanken, auf den zahlreichen Objekten dieses Gürtels ideal ist.

Man sollte daher in der Zukunft aus den folgenden zwei Gründen den Asteroidengürtel genau erforschen und zwar:

1. Grund: Bei der galaktischen Kolonisation durch eine Superzivilisation hat diese ein so attraktives System wie unser Sonnensystem nicht übersehen. Die Sonne ist ein junger Stern der Hauptsequenz, sehr ruhig, mit vielen Planeten, Monden, Asteroiden, Meteoren und einer Kometenwolke von mehreren 10^9 (!) Kometen.
2. Grund: Raumfahrende Zivilisationen reisen sicher in Raumkolonien, die ihre Energie aus Sternen beziehen und Rohmaterialien von Planetoiden mit geringer Schwerkraft gewinnen wollen.

Der Asteroidengürtel bietet daher all diese Voraussetzungen in geradezu idealer Art und Weise und ist als Raumkolonie geradezu prädestiniert.

5.4. PROJEKT CYCLOPS

Seit dem Jahre 1960 wurden in den USA und der Sowjetunion insgesamt 16 zum Teil große Projekte zur Suche nach außerirdischen Zivilisationen durchgeführt bzw. sind in Durchführung oder Planung. Diese Suche reicht von den sonnennächsten Systemen bis zu den benachbarten Galaxien. Im nachstehenden sei jedoch nur noch ein Projekt erwähnt, das alles bisherige gigantisch übertreffen soll, nämlich das Projekt CYCLOPS.

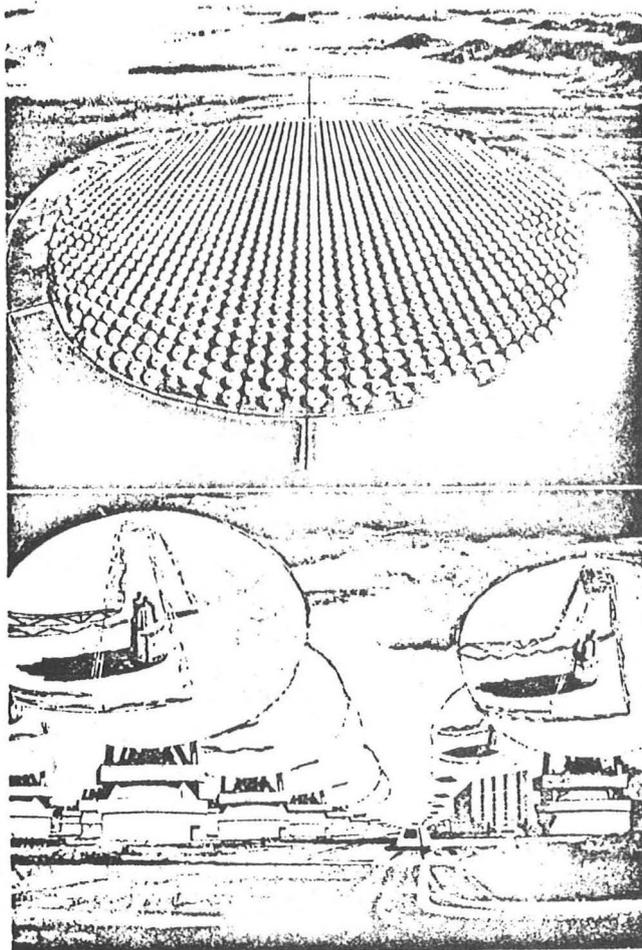


Abb. 5.5

Die vollständige Cyclops-Anlage würde wahrscheinlich 20 Quadratkilometer überdecken. Die jeweils 100 Meter großen Radioteleskope sollen von einem Kontrollsystem in der Mitte des Kreises gesteuert werden. (Quelle: Nasa)

Es ist derzeit noch nichts anderes als eine Studie von NASA-Wissenschaftlern aus dem Jahre 1971, mit dem Ziel, die technischen Grenzen eines Systems zur Entdeckung extraterrestrischen intelligenten Lebens abzustecken. F. DRAKE sagt dazu: "In dieser Minute fallen mit fast absoluter Sicherheit Radiowellen auf die Erde, die von anderen Zivilisationen stammen. Ein Teleskop kann gebaut werden, das, eingestellt auf den richtigen Himmelsort und die richtige Frequenz, diese Wellen entdecken könnte. Eines Tages werden von irgendwo draußen unter den Sternen die Antworten kommen auf viele der ältesten, bedeutendsten und aufregendsten Fragen, die die Menschheit je gestellt hat". [18/11/27].

Die Idee des Cyclops-Systems ist, an Stelle eines großen Teleskops HUNDERTE(!) (siehe Abb. 5.5) "kleinere", zentral gesteuerte Teleskope aufzubauen. Dieses System kann dadurch schon während des Baues äußerst flexibel gehandhabt werden. Fast beliebig erweiterungsfähig kann der Ausbau jederzeit gestoppt werden. Da das Antennenmaterial elektronisch leicht unterteilt werden kann, sollen jederzeit kleinere, separat gesteuerte Unterantennen-Gruppen für spezielle wissenschaftliche Programme bereitgestellt werden können. Derzeit wird eine solche Anlage mit 10 km Durchmesser ($78,5 \text{ km}^2$) auf etwa 18 Milliarden D-Mark (126 Milliarden ö.S.) geschätzt. Dieses System entspräche dann einer riesigen Einzelantenne mit einem Teleskopdurchmesser von 3 km.

Die gesamte Anlage würde - so die Konstrukteure - die meiste Zeit automatisch laufen und nur im Falle des Auftretens von Anomalien Menschen hinzuziehen. So wären Langzeituntersuchungen über Jahrzehnte hindurch möglich. Die Einzelteleskope sollten 100 m Durchmesser haben. Vorerst sollen Sterne bis 1000 L.J. entfernt ausgesucht und dabei die sonnenähnlichen unter die Lupe genommen werden. Es ist richtig, daß intelligente Lebensformen hauptsächlich auf Planeten e n t s t e h e n, aber ob intelligentes Leben mit hochentwickelter Technologie sich auch dort immer a u f h a l t e n wird, ist zu bezweifeln! Es könnte eine Expansion in Raumkolonien durchaus charakteristisch für Superzivilisationen sein und die Kolonisten suchen die Sterne danach aus, ob sie ihrem Energie- und Rohstoffbedarf optimal entsprechen. So könnten auch die heißeren B, A und F Sterne als Kolonisationssphären in Betracht zu ziehen sein. Mit der Errichtung von etwa 100 Antennen pro Jahr wird der Bau 20 bis 25 Jahre in Anspruch nehmen. Erst die volle Anlage wird es gestatten bis 1000 L.J. in den Raum vorzudringen. Gleichzeitig sollen Botschaften abgestrahlt werden und nach Jahrzehnten nähere Sterne auf eventuelle Antwortsignale wieder angepeilt werden.

Zum Abschluß seien noch zwei Thesen angeführt:

Wir sind die einzige technologisch entwickelte Zivilisation in der Milchstraße. Es gibt vermutlich keine Superzivilisationen, die ganze Galaxien umbauen können, weder in unserer Galaxis noch in ihren Nachbargalaxien der lokalen Gruppe. Es ist denkbar, daß Leben aller möglichen Entwicklungsstufen, auch Intelligenzen, auf Planeten existieren, jedoch ist ihre Evolution bislang offenbar nie den Weg der Technologie gegangen" [18].

F.J. DYSON hält die Entstehung von Intelligenz und Technologie für zwei separate Phänomene. Als Möglichkeit läßt sich allerdings nicht ausschließen, daß gleichzeitig, d.h. innerhalb einiger Jahrzehntausende, einige vergleichbare Zivilisationen die Milchstraße bevölkert haben oder noch bevölkern, aber sie sind weit genug entfernt, so daß ihre Signale uns bis heute noch nicht erreicht haben bzw. wir mit unseren Geräten noch nicht in der Lage sind ihre Signale aufzufangen. [27].

Die Frage nach extraterrestrischen Intelligenzen in unserer Galaxis ist von mindestens zwei Blickpunkten zu betrachten:

Die astronomisch-kosmologische Blickrichtung sieht vorerst $1,5 \times 10^{11}$ Sterne in unserer Galaxie, von denen etwa 10% also noch immer $1,5 \times 10^{10}$ Sterne sonnenähnlich sind und wahrscheinlich viele 10^6 Planeten besitzen, die eventuell erdähnlich sind, so daß statistisch gesehen, extraterrestrische Intelligenzen unbedingt mehrfach, ja sogar vielfach existieren m ü s s e n.

Die astro-biologische Blickrichtung sieht in der Entstehung intelligenten Lebens mit technologischer Evolution wegen seiner extremen Komplexität und der Unzahl von notwendigen, aufeinander abgestimmten, vorauszustzenden Parametern einen nahezu e i n m a - l i g e n Z u f a l l s p r o z e ß. Die Abschätzung der in der Milchstraße existierenden Intelligenzen kann vor tatsächlicher Kontaktaufnahme mit den Außerirdischen vorerst nur Spekulation bleiben, wenngleich diese auch sehr sinnvoll und wissenschaftlich fundiert ist.

STICHWORTVERZEICHNIS (GLOSSAR)

ABSOLUTE HELLIGKEIT Die Gesamtenergie, welche ein kosmischer Körper pro Zeiteinheit (Sekunde) emittiert.

ABSORPTIONSLINIEN Sie treten als dunkle Linien im kontinuierlichen Spektrum auf. Sie wurden von FRAUNHOFER zu Beginn des 19. Jahrhunderts entdeckt. Diese Linien sind für bestimmte chem. Elemente charakteristisch und begründeten eigentlich die Spektralanalyse in der Astrophysik. Die Strahlung der Linien erreicht uns aus höheren Sternatmosphären-Schichten (also näher dem Beobachter liegend). Sind diese Schichten kühler als der strahlende Hintergrund so erscheinen die Linien dunkel auf hellem Grund. Sind die Schichten jedoch heißer, sehen wir helle Linien auf dunklem Grund. Man nennt diese Linien EMISSIONSLINIEN.

AETHERDRIFT Im berühmten MICHELSON-MORELY-Versuch wurde nachgewiesen, daß die Lichtgeschwindigkeit von der Bewegungsrichtung der Erde um die Sonne (30 km/S) unabhängig ist, daß also keine "Aetherdrift" existiert, also kein "Kosmischer Aether" die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes beeinflusst.

AKKRETIONSSCHEIBE Schwarze Löcher ziehen kontinuierlich Gas vom benachbarten Stern ab, wobei Corioliskräfte, Zentrifugal- und Gravitationskräfte diese Gaswolke zu einer dünnen Scheibe um das SL abflachen.

ALFVEN-RADIUS ALFVEN ist Nobelpreisträger aus Schweden und hat u.a. ein Modell angegeben, wie die Bewegungen des Plasmas im Magnetfeld eines Neutronensternes (oder S.L.) erfolgen könnte, um das zeitweilige Ausbleiben der Röntgenstrahlung zu klären. Bei einer bestimmten Distanz vom S.L. wird die einstürzende Materie gebremst bzw. gestoppt. Diese Distanz heißt A.-Radius.

ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE A.R.T. Die in den Jahren 1906 bis 1916 von ALBERT EINSTEIN entwickelte Theorie der Gravitation. Der Grundgedanke dieser Theorie besagt, daß die Gravitation eine Folge der Krümmung des Raum-Zeit-Kontinuums ist.

(s.a. Relativitätstheorie spezielle).

ANISOTROPIE Gegenteil von Isotropie, das ist die dem Universum zugeschriebene Eigenschaft, daß es für einen typischen Beobachter nach allen Richtungen hin gleich aussieht.

ANTIMATERIE Sie besteht aus Antiteilchen. Sie sind in Masse und Spin mit einem anderen Teilchen (Koinomaterie) identisch. Die elektrische Ladung, die Baryonenzahl, die Leptonenzahl usw. haben jedoch das entgegengesetzte Vorzeichen. Für die meisten Teilchen gibt es ein entsprechendes Antiteilchen. Eine Ausnahme machen gewisse vollkommen neutrale Teilchen, wie das Photon und das π^0 -Meson, die ihre eigenen Antiteilchen sind.

Neutrino - Antineutrino

Proton - Antiproton

Neutron - Antineutron

Elektron - Antielektron = Positron

ANTIPOLE Ein Begriff aus der Theorie der kosmologischen Modelle und bedeutet den "Gegenpol" oder auch den Antipoden - Standpunkt im jeweiligen kosmologischen Modell.

ÄQUATOR, KOSMISCHER auch WELTÄQUATOR Ist jener geometrische Ort auf den ein kosmisches Objekt bestimmter Größe unter dem kleinsten parallaktischen Winkel beobachtet wird.

ÄQUIVALENT-TEMPERATUR Jeder materielle Körper emittiert bei einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes ein Radorauschen, das durch die Wärmebewegung der Elektronen innerhalb des Körpers hervorgerufen wird. Je höher die Temperatur, desto intensiver ist das Rauschen. Man kann deshalb die auf einer bestimmten Wellenlänge beobachtete Intensität des Radorauschens durch eine "Äquivalente Temperatur" ausdrücken. Das ist die Temperatur der Wände eines Behälters, innerhalb dessen das Radorauschen die beobachtete Intensität haben würde.

ASSOZIATIONEN (STERN-) Offenbar gemeinsam entstandene Sterngruppen, die sich jedoch immer mehr und mehr voneinander entfernen. Die meisten O-Sterne gehören zu Assoziationen und sind sehr junge Objekte.

ASTRONOMISCHE EINHEIT (AE) Darunter versteht man den mittleren Abstand der Erde von der Sonne (ca. $150 \cdot 10^6$ km) = 1 AE

BARYONEN Eine Klasse von stark wechselwirkenden Teilchen, zu der die Neutronen, Protonen und die instabilen Hadronen (auch Hyperonen) gehören. (siehe Tabelle einiger Elementarteilchen)

BARYONENZAHL Darunter versteht man die Gesamtzahl der in einem System vorhandenen Baryonen abzüglich der Gesamtzahl der Antibaryonen.

BIG BANG Siehe URKNALL-THEORIE

BJURAKANER SCHULE In Bjurakan (sowjetisch Armenien) ist das berühmte Radio-Observatorium der UDSSR errichtet, dessen Vorstand der bekannte Astrophysiker V.AMBARZUMJAN ist. Er hat eine Reihe von Thesen zur Kosmogonie der Sterne und Galaxien entwickelt, die teils revolutionierend und teils heftigst widersprochen waren.

BL-LACERTIDEN Sind quasarähnliche Objekte, die ihren Namen von der 1967 entdeckten Quelle BL Lacertae erhielten. (Lacerta-Sternbild Eidechse). Sie haben ähnliche Spektren wie die Quasare, ihre Helligkeit schwankt oft noch stärker als die der Quasare. Dennoch unterscheiden sie sich wesentlich von letzteren: ihre Strahlung besitzt keine Emissionslinien d.h. die umgebende Galaxie ist arm an Gas. Man wähnt sie daher als Kerne von elliptischen Galaxien und im aktiven Frühstadium.

BOLTZMANN'SCHE KONSTANTE Die fundamentale Konstante der statischen Mechanik, welche die Energie auf die Temperaturskala bezieht. Gewöhnlich mit k bezeichnet oder auch k_B beträgt sie $1,3806 \cdot 10^{-16}$ erg/Grad Kelvin bzw. $8,617 \cdot 10^{-5}$ eV/Grad Kelvin.

∫ -CEPHEIDEN Helle Sterne, die zur Klasse der Veränderlichen gehören. Zwischen der absoluten Helligkeit und der Schwankungsperiode und der Farbe besteht ein eindeutiger

Zusammenhang. Sie werden zur Entfernungsbestimmung relativ naher Galaxien verwendet (s.a. VERÄNDERLICHE).

CHANDRASEKHAR GRENZE (GRENZMASSE) CHANDRASEKHAR geb. in Lahore fand u.a. die Grenzmasse für Weiße Zwerge von 1,4 Sonnenmassen. Wird diese Masse überschritten, stürzt das Gebilde des W.Z. innerhalb von Sekunden zusammen. Erst wenn die Materie auf einen Radius von etwa 10 km (siehe MATH. ANHANG) geschrumpft ist, wird der Druck des Neutronengases so groß, daß er der Schwerkraft Einhalt gebieten kann.

CLOSE-BINARY-SYSTEM engl. Bezeichnung für ein sogenanntes "enges Doppelsternsystem". In einem derartigen System umkreisen die Komponenten (Einzelsterne) einander in nur wenigen Stunden. Man kann sie oft visuell nicht trennen, sondern nur mit Hilfe der Spektralanalyse (Überlagerung zweier Spektren). Die Bezeichnung erfolgt meist nach ihrem Entdecker, unsichtbare Begleiter werden fortlaufend mit a, b, c, ... , sichtbare mit A, B, C, ... usw. bezeichnet. Es gibt eigene Doppelsternkataloge (z.B. von AITKEN u.a.) .

CLUSTER engl. Bezeichnung für Haufenbildung sowohl bei Einzelsternen, als auch bei Galaxien.

CNO-PROZESS Darunter versteht man eine Variante des Kernverschmelzungsprozesses bei dem Wasserstoff zu Helium verschmilzt. H.BETHE aus USA und C.F.v.WEIZSÄCKER in Deutschland fanden unabhängig voneinander 1938 einen recht komplizierten Weg, wobei Kohlenstoffkerne als Katalysatoren wirken. An ihnen lagert sich Wasserstoff an, in ihnen bilden sich Heliumatome. Es ist dies ein Prozeß der "im Kreis" läuft [30], etwa wie folgt:

Aus C^{12} und einem Proton H^1 entsteht unter Abgabe von Strahlung (γ) N^{13}



Kurz darnach gibt N^{13} , das radioaktiv ist, 2 leichte Teilchen ab, ein Positron und ein Neutrino und verwandelt sich in Kohlenstoff der Massenzahl 13, also C^{13} (Isotop von C^{12})



Wieder kommt ein H-Atom (Proton) dazu, es entsteht wieder Stickstoff, aber mit der Massenzahl N^{14} unter Abgabe von Strahlung (γ)



Kommt wieder ein Proton (H-Atom) dazu, so entsteht unter neuerlicher Abgabe von Strahlung das radioaktive Sauerstoffisotop O^{15} also



O^{15} stößt wieder ein Positron und ein Neutrino ab, wobei es sich in Stickstoff mit der Massenzahl 15 verwandelt.



Kommt nun ein weiteres H-Atom dazu, dann entsteht Helium und wieder C^{12} , der Kreis ist geschlossen.



Insgesamt erhält man durch diese Reaktion 25,0 MeV, da durch die Neutrinos im Mittel etwas mehr Energie verloren geht.

DEUTERIUM Ein schweres Isotop des Wasserstoffes, H_2 . Die Kerne des Deuteriums, Deuteronen genannt bestehen aus einem Proton und einem Neutron.

DILATATION Nennt man die Verkürzung von Strecken und Zeitkoordinaten bei mit relativistischer Geschwindigkeit sich bewogender Körper. Das Analogon bei Massen nennt man allerdings "relativistische Massenzunahme"

DIPOL-STRAHLUNGSMECHANISMUS Von einem rotierenden magnetischen Dipol wird ein elektromagnetisches Feld aufgebaut mit einer Schwingung je Rotation (beim Pulsar NP 0532 also 30 Hz). Außerdem gibt der Pulsar laufend Masse ab und zwar so, daß der Teilchenstrom parallel zu den rasch rotierenden Magnetfeldlinien radial nach außen verläuft. Durch die hohe Rotationsgeschwindigkeit des Pulsars findet der entscheidende Beschleunigungsprozeß in jener Entfernung statt, wo die Umfangsgeschwindigkeit gegen die Lichtgeschwindigkeit konvergiert (bei NP 0532 ca. 1500 km vom Sternzentrum entfernt).

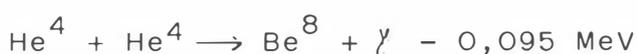
Dort erzeugen die rasch bewegten Magnetfelder starke elektrische Felder, die den fast auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigten Teilchen Energien von $5 \cdot 10^{13}$ eV vermitteln. Nur etwa 10% dieser Energie steckt in den Elektronen und wird als gepulste Strahlung registriert.

DOPPELSTERNE (s.a. CLOSE-BINARY-SYSTEM) Sie spielen eine bedeutende Rolle für die Massenbestimmung. Ihre Umlaufzeiten schwanken zwischen Stunden (kürzeste bekannte Umlaufzeit ist 4,5 Stunden) und Jahrzehntausenden. Die neuesten Theorien über Sternsysteme sprechen sogar von Systemen mit Umlaufzeiten von 10^6 Jahren (Größenordnung). Ein berühmtes Doppelsternpaar ist das kürzlich entdeckte Neutronen - Doppelsternsystem 1913 + 16. Es stellt gewissermaßen ein kosmisches Labor zum Nachweis einer Reihe von Aussagen aus der A.R.T. dar.

DOPPLER-BEWEGUNG Darunter versteht man lokale Bewegungen kosmischer Objekte, die durch die Rotverschiebung in den betreffenden Spektren, etwa ausströmende Materie bei Quasaren, gemessen werden kann. (Die Rotverschiebung kann auch kosmologischer Natur sein und resultiert dann aus der Urknall-Expansion)

DOPPLER-EFFEKT Jener Effekt der eintritt, wenn ein (kosmischer) Körper, der Strahlung emittiert, sich relativ zum Beobachter bewegt. Fliegt er auf den Beobachter zu, werden die Linien des Spektrums in Richtung violett verschoben, man spricht von "Blauverschiebung", die Frequenz wird größer, entfernt er sich hingegen, werden die Spektrallinien in Richtung rot verschoben, man spricht von "Rotverschiebung", die Frequenz wird kleiner. Das Maß der Verschiebung dient der Ermittlung der Relativgeschwindigkeit und damit nach E.HUBBLE auch der Entfernungsbestimmung.

DREI-ALPHA-REAKTION (3α -REAKTION) Darunter versteht man die Umwandlung von Helium in Kohlenstoff durch Vereinigung von drei Heliumsternen (die auch α -Teilchen genannt werden!) Dies geschieht oberhalb von $100 \cdot 10^6$ K :





Da der Berilliumkern Be^8 instabil ist, findet nur ein sehr geringer Bruchteil ($1:10^{10}$) der Be^8 -Kerne Gelegenheit die 2. Reaktion durchzuführen.

ELEMENTARLÄNGE Radius eines Elektrons (s.a. PHYSIKALISCHE GRÖSSEN)

ELEMENTARZEIT Zeit zum Durchlaufen der Elementarlänge mit Lichtgeschwindigkeit

EMISSIONSLINIEN siehe ABSORPTIONSLINIEN und SPEKTRUM

ENTARTETE MATERIE (1. und 2. STUFE) Die Energieverteilung der Teilchen ist in nichtentarteter Materie durch die MAXWELL'sche Geschwindigkeitsverteilung beschrieben. Diese Beschreibung versagt für Materie im hochenergetischen Zustand. (Bereits bei Zimmertemperatur kann das Elektronengas in einem Metall als degeneriert betrachtet werden, denn die niederen Energieniveaus sind gemäß dem PAULI'schen Ausschließungsprinzip besetzt und die Elektronen müssen Energieniveaus einnehmen, die einer Temperatur (kinetischen Energie) von 20.000°K (!) entsprechen. Im Sterninneren gilt diese Aussage bei den Endzuständen der Sternentwicklung auch für das Sternengas. Damit hängt die kinetische Energie der Elektronen nicht mehr von der Temperatur, sondern von der Dichte ab. Diese 1. Stufe der Materieentartung durch die Degeneration des Elektronengases ist für die Materieeigenschaften Weißer Zwerge bestimmt. Hier gilt:

$$p = 9,91 \cdot 10^{12} \left(\frac{\rho}{\mu_E} \right)^{5/3}$$
 wobei p der Druck, ρ die Dichte und μ_E das Molekulargewicht bezgl. des freien Elektrons bedeuten. Die Dichte ist $\sim 4,10^5 \text{g/cm}^3$. Ab einer gewissen kritischen Dichte werden die Elektronen des Sternengases gemäß einem inversen β -Prozeß in die Atomkerne "hineingedrückt" wodurch der Neutronenreichtum zunimmt. Die Kerne beginnen zu "lecken" und freies Neutronengas beginnt sich analog zu verhalten wie das Elektronengas ursprünglich im Metall. Diese 2. Stufe der Materieentartung ist für die Materie-

eigenschaften von Neutronensternen bestimmend. Es gilt für relativistisch entartetes Gas

$p = 1,23 \cdot 10^{15} \left(\frac{\rho}{\mu_E} \right)^{1/3}$. Dichte liegt bei $\sim 10^{14}$ g/cm³ und ist mit der von Atomkernen vergleichbar.

ENTROPIE Eine fundamentale Größe der statistischen Mechanik, die mit dem Grad der Unordnung (Chaos) eines physikalischen Systems zusammenhängt. In jedem Prozeß, indem das thermische Gleichgewicht ständig aufrecht erhalten wird, bleibt die Entropie erhalten. Nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik gibt es keine Reaktion, durch welche der Gesamtbetrag der Entropie abnimmt.

EREIGNISHORIZONT Jene Grenzfläche des Schwarzen Loches an der die Fluchtgeschwindigkeit die Lichtgeschwindigkeit erreicht. Innerhalb dieser Fläche existiert weder Materie noch Zeit oder wie vielleicht besser definiert: Zeit und Materie vertauschen ihre Positionen.

ERGOSPHÄRE Das Raum - Zeitgebiet zwischen der Stationaritätsgrenze (die Rotverschiebung z eines einfallenden Teilchens wird unendlich) und dem Ereignishorizont (s.a. Abb. 1.22) .

ERHALTUNGSSATZ Eine Regel, derzufolge der Gesamtbetrag einer Größe (Baryonenzahl z.B.) sich in einer Reaktion nicht ändert.

EXPANSIONSGESCHWINDIGKEIT Darunter versteht man i.a. die Geschwindigkeit mit der sich kosmische Objekte voneinander entfernen. Sie ist nach HUBBLE proportional der Entfernung der kosmischen Objekte für die man die Expansionsgeschwindigkeit bestimmen will: $V_{ex} = \alpha \cdot R$; für "nähere" Objekte gilt $\alpha = H$ (Hubble Konstante), R ist die Entfernung der Objekte, für welche V_{ex} bestimmt werden soll. Meist wird das V_{ex} relativ zur Erde bzw. zu unserem Sonnensystem gefragt.

FASERNEBEL Sternansammlungen in sehr loser, faserartiger Form.

FEINSTRUKTORKONSTANTE Fundamentale numerische Konstante der

Atomphysik und der Quanten-Elektrodynamik, definiert als das Quadrat der Ladung des Elektrons, dividiert durch $h \cdot c$ (Plancksches Wirkungsquantum mal Lichtgeschwindigkeit).

FELDGLEICHUNGEN, EINSTEIN'SCHE Das sind die 20 Differentialgleichungen die in der 2. Ordnung linear sind (nicht jedoch in der 1. Ordnung!), welche den Zusammenhang von Raumkrümmung (R_{ik}), Gravitationsparameter (g_{ik}) und Energieparameter (T_{ik}) herstellen.

FILAMENTE auch Protuberanzen genannt. Sind relativ kühle ($\sim 10^4$ K) Gaswolken, in der umgebenden heißen ($\sim 10^6$ K) Korona. Manches Mal auch die Bezeichnung für interstellare Materiereste, die auch von Supernovae herrühren könnten.

FLARES sind Eruptionen, welche sich durch Lichtblitze bemerkbar machen. Bei der Sonne dauern sie z.B. von wenigen Minuten bis zu ca. einer Stunde.

FLARE-STERNE sind UV-Ceti Sterne: Zwerge, meist der Spektralklassen m 3 bis m 6, mit raschem kurzen Aufleuchten mit Amplituden von 1 bis 6 Magnitude.

FRAGMENTATION Darunter versteht man den Zerfall einer Materiewolke in Fragmente, aus denen sich Sterne bilden (Fragmentationstheorie von MEADOWS, AMBARZUMJAN u.a.).

GALAXIE, GALAXIS Ein großer, durch Gravitation zusammengehaltener Haufen von Sternen, der bis zu 10^{12} Sonnenmassen enthalten kann. Unsere Milchstraße wird gelegentlich als "die Galaxis" bezeichnet. (s.a. EINTEILUNG der GALAXIEN 2.KAPITEL).

GALILEI-TRANSFORMATION Der zeitliche Abstand beliebiger Ereignisse ist unabhängig vom Bezugssystem und hat hier absolute Bedeutung, ebenso wie der räumliche Abstand gleichzeitiger Ereignisse. Der räumliche Abstand nichtgleichzeitiger Ereignisse hängt in der klassischen Mechanik (Galileische Relativität) vom benützten Inertialsystem ab und kann durch die Wahl eines geeigneten Systems stets zum Verschwinden gebracht werden. In der EINSTEINschen

RELATIVITÄT hingegen ist die GLEICHZEITIGKEIT räumlich getrennter Ereignisse, kein absoluter Begriff mehr, sondern hängt vom Bewegungszustand des Beobachters (Inertialsystem) ab. $t_0 = t$ und $x_0 = x - vt$ drücken die Galilei-Transformation aus.

GRAVITATION-(KONSTANTE) auch NEWTON'sche Konstante genannt. Nach der NEWTON'schen und EINSTEIN'schen Gravitationstheorie eine fundamentale Größe meist mit G bezeichnet. Nach NEWTON ist die Gravitation(skraft) zwischen zwei Körpern gleich

$$\frac{G \cdot m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

wobei m_1 und m_2 die Masse und r der Abstand der beiden Körper ist. $G = 6,67 \cdot 10^{-8} \text{ g}^{-1} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-2}$

GRAVITATIONSWELLEN Sie sollten sich mit Lichtgeschwindigkeit im Gravitationsfeld so ausbreiten, wie elektromagnet. Wellen im elektromagn. Feld. Experimentelle Beweise für Gravitationswellen gibt es bis dato nicht. Ihre Existenz ist jedoch auf Grund von Pulsar-Rotations-Beobachtungen praktisch gesichert.

GRAVITATIONEN Die vorerst noch theoretischen Teilchen, welche analog zu den Photonen der Quantentheorie der Strahlung mit den Gravitationswellen verbunden sind.

HADRONEN Zu ihnen zählt man alle Teilchen, die an starken Wechselwirkungen beteiligt sind. Man unterteilt sie in Baryonen (z.B. Neutronen, Protonen), die dem Pauli-Prinzip gehorchen und Mesonen, die diesem Gesetz *n i c h t* gehorchen.

HAUPTREIHE auch Hauptsequenz genannt, ist jener etwa geradlinig verlaufende bandförmige geometrische Ort im Hertzsprung-Russel-Diagramm, auf dem etwa 90% aller Sterne (Hauptreihen-Sterne) liegen. Dieser geometrische Ort ist die Darstellung der Leuchtkraft-Oberflächentemperatur-Relation. (Die Geradlinigkeit erreicht man durch die Wahl logarithmischer Maßstäbe).

HAYASHI-TRACK (Abb. 1.7) In der letzten Phase der Kontraktion eines Protosterns (s.o.), bevor er die Hauptreihe erreicht, wird er optisch dick. Dadurch verläuft die weitere Entwicklung wesentlich langsamer. Vor diesem Zeitpunkt konnte man die Entwicklungszeit abschätzen durch die Formel

$$t_E = \frac{1}{\sqrt{G \cdot \rho}}$$

worin G die Gravitationskonstante und ρ die jeweilige Dichte der Wolke ist. (siehe auch MATH.ANHANG). HAYASHI hat gezeigt, daß bei Einhalung von Gleichgewichtszuständen, der konvektive Energietransport der effektivste ist und daß sich bei einer derartigen Entwicklung der Stern vor Erreichen der Hauptreihe fast senkrecht nach unten im H.R.D. bewegt. D.h., der Stern verkleinert bei etwa konstanter Oberflächentemperatur seine Leuchtkraft und damit Oberfläche bzw. Radius. Erst gegen Ende dieser Entwicklungsphase setzt zusätzlicher Strahlungstransport ein und gewinnt die Oberhand. Die Oberflächentemperatur und die Leuchtkraft nehmen zu, der Stern erreicht nach links wandernd die Hauptreihe und verbleibt dort für die längste Zeit seiner Existenz fast unverändert am selben Ort im H.R.D.

HELIUMBLITZ (-FLASH) Die Instabilität ist die Ursache des Heliumblitzes, bei welchem im entarteten Heliumkern die $3-\alpha$ (s.v.) einsetzt und dann wegen fehlender Expansion mit steigender Temperatur immer rascher verläuft, bis in einem solchen Stern die etwa 10^{14} fache Energieproduktion der Sonne erfolgt. Wenn durch weiteren Temperaturanstieg der Druck noch mehr anwächst und der Kern expandieren kann, normalisiert sich die Energieproduktion! Der Blitz (flash) selber ist *u n b e o b a c h t b a r*, da fast die gesamte produzierte Energie (in dem kurzen Zeitraum der Instabilität) im Sterninnern absorbiert wird. Beobachtet kann nur der Materieabwurf (s. 1.KAPITEL) werden.

HELLIGKEIT (WAHRE, SCHEINBARE) Die wahre Helligkeit ist die Helligkeit eines kosmischen Objekts, bezogen auf eine Distanz

von 10 pc (32,6 L.J.). Die scheinbare Helligkeit ist jene, wie sie uns bei der Beobachtung tatsächlich erscheint. Die Helligkeiten werden in Magnitude (m) angegeben (s.1.KAPITEL).

HERZSPRUNG-RUSSEL-DIAGRAMM (H.R.D.) HERZSPRUNG und RUSSEL fanden einen funktionalen oder besser gesagt regressiven Zusammenhang zwischen Leuchtkraft und Oberflächentemperatur der Sterne. Der größte Teil der Sterne, etwa 90%, liegen auf der Hauptreihe, ein etwa gerades Band, das von rechts unten (niedere Temperatur und geringe Leuchtkraft) nach links oben (hohe Temperatur und starke Leuchtkraft) verläuft. Rechts oben sind die Roten Riesen, weiter gegen links die Gelben Riesen und noch weiter links die Blauen Riesen angesiedelt. Links unten ist der Raum der Weißen Zwerge. Ganz rechts unten ist der Raum der werdenden Sterne (Protosterne, aber nicht im Sinne AMBARZUMJANS, der unter Protomaterie etwas anderes versteht, s.a. 1. und 2. KAPITEL).

HINTERGRUNDSTRAHLUNG Darunter versteht man die 1964 von den Nobelpreisträgern PENZIAS und WILSON (beide USA) entdeckte Strahlung mit einer Äquivalenztemperatur von 2,7 K (daher auch 3K-Strahlung genannt), welche aus allen Richtungen im Kosmos fast gleichmäßig einfällt und als Reststrahlung des Urknalls (Big Bang) gedeutet wird (s.3.KAPITEL).

HOMOGENITÄT Die dem Universum zugeschriebene Eigenschaft, daß es zu einem gegebenen Zeitpunkt t allen typischen Beobachtern, wo immer sie sich befinden mögen, gleich erscheint.

HORIZONT (KOSMISCHER) Eine Entfernung in der Kosmologie, die so groß ist, daß ein aus dieser Distanz abgesendetes elektromagnetisches Signal (Lichtblitz) uns bislang nicht erreichen konnte. Sofern das Alter des Universums endlich ist, erhält man diese Horizont-Distanz als Produkt aus $T_w \cdot c = \frac{c}{H_0}$, also Weltalter mal Lichtgeschwindigkeit.

HUBBLE-KONSTANTE, HUBBLE-GESETZ Eine Größe aus der Kosmologie, mit der die Expansionsbeschleunigung des Kosmos be-

geschrieben wird. Ihre Dimension ist $\text{km}^3/\text{s Mpc}$, da km und Mpc (Megaparsec) Streckenmaße sind, ist ihre Dimension auch s^{-1} und man nennt sie deshalb auch das reziproke "Weltalter". Sie gibt für nicht allzuentfernte Galaxien (etwa einige 10^8 L.J.) das Verhältnis von Entfernung (R) zu Fluchtgeschwindigkeit (v_F) auf Grund der Formel

$$R = H_0 \cdot v_F$$

an. H_0 bedeutet den gegenwärtigen Wert von H, d.h. daß H keine Konstante im Sinne der physikalischen Naturkonstanten (z.B. G, c, h ...) ist, sondern eine Zeitabhängige, wobei die Zeitintervalle in der sie sich vielleicht Jahrtausende oder sogar Jahrtausende betragen. Die Bestimmung dieser "Konstanten" ist schwierig und nur indirekt möglich. Derzeit gilt der Wert von 50 km/sMpc entsprechend einem Kehrwert als Weltalter von $20 \cdot 10^9$ Jahren als der Wahrscheinlichste. 50 km/s.Mpc bedeutet, daß die Fluchtgeschwindigkeit je Mpc (3,26 Millionen Lichtjahre) Distanzzunahme um 50 km/s ansteigt. (Neueste Messungen lassen allerdings Werte von 75 km/s ja sogar 100 km/s je Mpc als wahrscheinlicher erscheinen)

HYPERONEN Das sind instabile Hadronen wie etwa die Mesonen und auch das Proton (s. Tabelle der ELEMENTARTEILCHEN)

H II-REGIONEN Darunter versteht man Regionen energetisch angeregten Wasserstoffs. D.h. in diesen Regionen ist der Wasserstoff ionisiert, die Atome sind positiv geladen, da die Elektronen als freie Elektronen existieren, durch die Energiezufuhr gewissermaßen "weggeschossen" wurden. H I ist neutraler Wasserstoff. Da z.B. das Eisenatom 4 Elektronen besitzt, so können Fe II bis Fe V Regionen existieren. Im Falle der Fe V Region wurde durch die Energiezufuhr alle 4 Elektronen "weggeschossen".

INERTIALSYSTEM Ein nicht-beschleunigtes System in welchem die bekannten physikalischen Gesetze ohne äußere Gravita-

tionseinflüsse gelten. So ist z.B. ein um die Erde kreisendes Satelliten-Labor ein kleines Inertialsystem. Die Planeten sind wieder jeder für sich Inertialsysteme im Sonnensystem. Ein auf der Erde situiertes Labor ist hingegen gegenüber dem Satellitenlabor durch die Erdgravitation kein Inertialsystem mehr, denn die Gravitation wirkt wie eine Beschleunigung (Äquivalenzprinzip).

INFRAROT-ASTRONOMIE Infrarotstrahlung hat eine Wellenlänge von 10^{-2} bis 10^{-4} cm (also 10^6 bis 10^4 Angström) und liegt zwischen sichtbarem Licht (5000 \AA) und der Mikrowellenstrahlung. (Die Strahlung von Körpern bei Zimmertemperatur liegt im infraroten Bereich). In neuerer Zeit haben Informationen von Sternen und Galaxien in diesem Wellenbereich viel zu den kosmogonischen Theorien beigetragen.

ISOTROPIE Die dem Universum zugeschriebene Eigenschaft, daß es für einen typischen Beobachter nach allen Richtungen hin gleich aussieht.

ISOTROPIE der STRAHLUNG Eine Strahlung, die von allen Richtungen gleich einfällt (s. 3K-HINTERGRUNDSTRAHLUNG).

JEANS-MASSE Die minimale Masse, bei welcher die Gravitations-Anziehung den inneren Druck überwinden und ein durch Gravitation zusammengehaltenes System hervorrufen kann. M_j (s.MATH.ANHANG)

JETS Darunter versteht man Materieströme (Konstante) die aus aktiven Galaxienkernen ausgestoßen werden. Sie können mehrere tausend Lichtjahre lang sein (!) .

KEPPLERS SUPERNOVA Die letzte in unserer Galaxie 1604 beobachtete Supernova. Sie wurde von Kepler (und koreanischen sowie chinesischen Hofastronomen) im Sternbild des Schlangenträgers (Ophicechus) beobachtet.

KOINOMATERIE Sie wird die im Gegensatz zur Antimaterie, in unserem bislang beobachteten kosmischen Bereich vorherrschende Materie bezeichnet, d.h. Materie mit positiver La-

derung der Elektronen.

KOHLENSTOFFZYKLUS siehe C N O -PROZESS

KONDENSATIONSTHEORIE Die klassische Theorie der Sternentstehung durch Kontraktion einer Urwolke aus Wasserstoff und kosmischen Staubteilchen. Dieser Theorie steht die Protosternhypothese der Bjurakaner Schule gegenüber.

KONTAKT-DOPPELSTERNSYSTEM Das ist ein enges Doppelsternsystem, bei welchem durch den Materieaustausch zwischen den Komponenten ein "Kontakt" besteht (siehe ENTWICKLUNG von DOPPELSTERNSYSTEMEN).

KONVEKTION Energieaustausch in dem sich die Sternmaterie fortlaufend durchmischt, indem heiße Materie aufsteigt und kältere Materie absinkt, um neuerlich erhitzt zu werden usf. Bei der Sternkosmogonie eine Entwicklungsphase, in welcher Energie derartig übertragen wird.

KOSMISCHE STRAHLUNG (ULTRA-) Hochenergetische Teilchen, die aus dem Weltraum in die Erdatmosphäre eintreten. Sie sind die kurzwelligste und damit energiereichste Strahlung, die wir kennen. Die Teilchen bewegen sich fast mit Lichtgeschwindigkeit. Ihre Energie liegt bei 10^{18} bis 10^{21} e V. Sie hat sich als wahre Fundgrube f.d. physikal. Elementarteilchen erwiesen. Erstmals wurde das Positron und diverse Arten von Mesonen (μ , π Mesonen, positiv, negativ und neutral etc) in ihr gefunden. Diese Strahlung besteht hinsichtlich ihrer Teilchenstruktur aus 90% Protonen (H-Kerne), 9% He-Kerne (die Komponente heißt auch α -Strahlung, s.o.), der Rest sind Atomkerne schwerer Elemente.

KOSMOGONIE Damit bezeichnet man im deutschen Sprachkreis grundsätzlich die Entstehungsgeschichte von kosmischen Objekten (Stern- und Galaxien-Kosmogonie).

KOSMOLOGIE Darunter versteht man das Zusammenspiel aller kosmischen Objekte. Der Versuch dieses Zusammenspiel oder Zusammenwirken mathematisch zu erfassen, geschieht mit Hilfe

sogenannter "Kosmologischer Modelle". Der russische Mathematiker A.FRIEDMANN u.a. haben hier im Anschluß an EINSTEINs A.R.T. Serien von Modellen entwickelt (s.MATH.ANHANG).

KOSMOLOGISCHE KONSTANTE λ Eine Größe die EINSTEIN 1917 in seine Feldgleichungen einführte und mit λ bezeichnete (s. MATH.ANHANG). Dadurch wurde bei sehr großen Distanzen und positiven λ eine Abstoßung hervorgerufen, die in einem statischen Universum (und nur ein solches schien damals denkbar) nötig wäre um der Gravitationsanziehung entgegenzuwirken. Heute ist die Größe überflüssig geworden und EINSTEIN selbst hat sehr bedauert, sie je eingeführt zu haben.

KOSMOLOGISCHES PRINZIP Die Hypothese, daß das Universum isotrop und homogen sei.

KRITISCHE DICHTEN Mindestwert der kosmischen Dichte, wenn die Expansion des Universums einst aufhört und von einer Kontraktionsphase abgelöst werden soll. Wenn die kosmische Dichte größer ist als die kritische, so ist das Universum "geschlossen" und endlich in räumlicher Hinsicht (elliptische oder positive Raumkrümmung).

LEPTONEN Eine Klasse von Teilchen, die nicht an den starken Wechselwirkungen beteiligt ist ; dazu gehören das Elektron, das Myon und das Neutrino. Die Leptonenzahl ist die Gesamtzahl der in einem System vorhandenen Leptonen abzüglich der Gesamtzahl der Antileptonen.

LEUCHTKRAFT Darunter versteht man die gesamte von einem kosmischen Objekt emittierte Energie, in allen Wellenbereichen. Nicht zu vergessen sind dabei auch die Neutrinostrahlung, die derzeit noch Rätsel aufgeben, da sie praktisch nicht "auffangbar" sind. (Ray DAVIS'Neutrinoexperiment [30]).

LOCH, SCHWARZES siehe SCHWARZES LOCH

LORENTZ-TRANSFORMATION (L.T.) Das Relativitätsprinzip und

die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit c stehen an der Spitze der speziellen Relativitätstheorie (S.R.T.). Aus diesen Prinzipien läßt sich die Lorentz-Transformation herleiten. EINSTEIN zeigt, daß die L.T. die Maxwell-Gleichungen form-invariant lassen. Ebenso ist das vierdimensionale Linienelement (Raum-Zeit-Element) ds^2 invariant. Raum und Zeit sind nicht mehr absolut, sondern nur mehr die Raum-Zeit (die Menge aller Ereignisse, von MINKOWSKI auch die WELT genannt). Die LORENTZ-Transformation lautet (auf die eine Dimension der Bewegungsrichtung beschränkt) :

$$x_0 = \gamma (x - vt) \quad \gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}$$
$$t_0 = \gamma (t - vx)$$

daraus folgt für $t = 0$ die Längenkontraktion $x_0 = \gamma x$ aus der 1. Gl. und für $x = 0$ die Zeitdilatation $t_0 = \gamma t$ aus der 2. Gl.. (Siehe auch GALILEI TRANSFORMATION.)

MAGNITUDE ist das Maß für Sternhelligkeiten (siehe auch HELBIGKEIT, WAHRE und SCHEINBARE). Ein Stern ist um eine Magnitude "heller", wenn seine Lichtemission 2,5 mal größer ist als der nächst schwächere Stern (s.a. MATH.ANHANG).

MAXIMALE TEMPERATUR Nach Theorien der starken Wechselwirkungen bestehende Obergrenze der Temperatur. Sie beträgt nach diesen Theorien $2 \cdot 10^{12}$ °Kelvin.

MESONEN Eine Klasse von stark wechselwirkenden Teilchen, mit der Baryonenzahl Null. Dazu gehören neben den π -Mesonen noch die κ - und η -Mesonen.

METAGALAXIS oder auch metagalaktisches System wird von einigen Wissenschaftlern die Ansammlung extrem vieler Galaxien (etwa der Virgo-Haufen mit tausenden Galaxien) genannt. Mittlerweile hat man derartige Ansammlungen von Galaxien mehrfach entdeckt (Clusters).

M.K.K.-KLASSIFIKATION Morgan, Keeman und Kellman überar-

beiteten und verfeinerten die Havard-Klassifikation. Sie werden hier nicht nur nach ihrem Spektraltyp (Temperatur), sondern konsequent auch nach der Leuchtkraft unterschieden z.B. I a = helle Überriesen bis V = Zwerge, besser Hauptreihensterne.

MYONEN Ein instabiles Elementarteilchen mit negativer Ladung, wie das Elektron, aber 207 mal so schwer. Symbol μ wird auch als μ -Meson bezeichnet, obwohl es nicht entgegen den echten Mesonen an starken Wechselwirkungen beteiligt ist.

NEUTRINOASTRONOMIE - NEUTRINO Das Neutrino ist ein masseloses, elektrisch neutrales Teilchen, das bei Kernfusionen (z.B. 3α -Reaktion, CNO-Reaktion, Proton-Proton-Kette etc.) entsteht und emittiert wird. Es unterliegt nur der schwachen- und der Gravitationswechselwirkung. Symbol: ν . Es existieren auch Antineutrinos. Es gibt wenigstens 2 Unterarten und zwar die Elektron-Neutrinos (ν_e) u.d. Myon-Neutrinos (ν_μ).

NEUTRONENSTERN Meist Restobjekte nach einer Supernova-"Explosion". Diese Sterne haben eine extrem hohe Dichte (10^{14}g/cm^3) und ein meist extrem starkes Magnetfeld. Sie rotieren sehr rasch (1 bis 30 Hz) und senden häufig Röntgen- und Radialstrahlung aus (Pulsare).

NOVA So wird das Aufleuchten eines Sternes bezeichnet, wenn er im Endstadium seiner Entwicklung plötzlich seine Helligkeit verstärkt. Diese kann 7 bis 16 Magnitudine in einer Zeit von einigen bis etwa 100 Tagen erreichen. Danach erfolgt die Abnahme der Helligkeit unterschiedlich schnell. Dies kann bei einem Stern öfters hintereinander geschehen. Nicht zu verwechseln mit Supernova. Der Name rührt daher, daß man fälschlich annahm, ein "neuer" Stern sei erstanden, als man dieses Phänomen erstmals beobachtete.

NULLJAHRSTERN Ein Begriff aus der Modellrechnung für die Sternentwicklung. Man bezeichnet den Stern oder besser das

Sternmodell am Beginn der Berechnungen als Null-Jahr-Stern.

ÖKOSPHERE Ist jener schmale kugelschalenförmige Raum, der ein Zentralgestirn umgibt, in welchem lebensfördernde bzw. lebenserhaltende Bedingungen herrschen. Verläuft in diesem Raum zufällig eine Planetenbahn, so könnte Leben entstehen. Bei der Sonne ist diese Ökosphäre nur $\pm 1\%$ der mittleren Entfernung Erde-Sonne (AE) d.h. $3 \cdot 10^6$ km (!) dick.

PARSEC (pc) Astronomisches Entfernungsmaß. Jene Distanz, von wo aus man 1 AE unter einem parallaktischen Winkel von 1" (Bogensekunde) sähe d.i. $3,0856 \cdot 10^{13}$ km oder 3,2615 Lichtjahre (L.J.). 1 Megaparsec (Mpc) = $3,2615 \cdot 10^6$ L.J. Die Hubble Konstante wird in $\text{km}^1 \cdot \text{s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ angegeben.

PAULISCHES AUSSCHLIESSUNGSPRINZIP Das Prinzip, nach dem zwei Teilchen der gleichen Art nicht genau den gleichen Quantenzustand einnehmen können. Ihm unterliegen die Baryonen und Leptonen, nicht aber die Photonen und Mesonen (s.a. Tabelle der ELEMENTARTEILCHEN).

PECULIARBEWEGUNG Darunter versteht man die vorerst regellose individuelle Bewegung der Sterne bezgl. ihrer Umgebung. Die Sonne bewegt sich z.B. mit 20 km/s auf einem Punkt der Sphäre (Apex) mit den Koordinaten $\alpha = 18^h$ und $\delta = + 30^\circ$ zu.

PERIODE-LEUCHTKRAFT-BEZIEHUNG Die periodischen Helligkeitsänderungen P beruhen auf Pulsationen, d.h., freien radialen Schwingungen der Sterne. Dies ist heute so gut wie sicher. Die Periode wächst mit abnehmender mittl. Sterndichte ρ gemäß

$$P = Q \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho}}$$

worin Q eine Konstante und ρ_0 die Sonnendichte mit $1,409 \text{g/cm}^3$ bedeutet. 1912 wurde von Miß LEAVITT eine wichtige Relation (empirisch) gefunden: die Beziehung zwischen Leuchtkraft und Periodenlänge. Diese wichtige Beziehung ist für die Distanzbestimmung dieser Pulsations-Variablen und damit

der kosmischen Objekte (Sternhaufen) in denen solche Sterne vorkommen äußerst wichtig, ja oft die e i n z i g e Möglichkeit.

PLANETARISCHER NEBEL Sie umgeben als kleine, ringförmige Nebel einen Zentralstern, der sie zum Leuchten anregt. Ihr Name rührt daher, weil sie i.a. eine Farbe haben die grünlich ist u. der der Planeten Uranus und Neptun ähnlich ist. Man nimmt an, daß sie mögliche Vorstadien der Weißen Zwerge sind, wie etwa, daß Rote Riesen einen Teil ihrer Hülle abstoßen. Der Zentralstern wäre demnach der Kern des Roten Riesen. Sie sind kurzlebige Objekte (~ 30.000 Jahre).

PLANCK'sche STRAHLUNGSKURVE (VERTEILUNG) Die Intensitätsverteilung der Energie auf verschiedene Wellenlängen einer Strahlung im thermischen Gleichgewicht, d.h., eines schwarzen Körpers, kurz: der schwarzen Strahlung.

PLANCK'sches WIRKUNGSQUANTUM (KONSTANTE) Die fundamentale Konstante der Quantenmechanik. Symbol: h oder auch $\frac{h}{2\pi} = \hbar$. Die Energie eines Photons ist gleich h mal c (Lichtgeschwindigkeit) geteilt durch λ (Wellenlänge) oder auch $E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$.

PLASMA Darunter versteht man ionisiertes Gas. Wird ein Elektron abgestoßen, ist das Gas einfach ionisiert (z.B. bei Wasserstoff H II Region, da mit H I neutraler, nicht ionisierter Wasserstoff bezeichnet wird). Je mehr Elektronen ein Element besitzt, umso schwerer ist es und umso höher kann es ionisiert werden (z.B. FeV).

PI-MESONEN (π^-) Das Hadron mit der kleinsten Masse. Es gibt davon 3 Unterarten: ein positiv geladenes Teilchen (π^+), sein negatives Antiteilchen (π^-) und ein etwas leichteres neutrales Teilchen (π^0), zuweilen auch als Pionen bezeichnet.

POPULATION I und II Diese Begriffe wurden 1944 von W.BAADE eingeführt. Populationen umfassen Gruppen von Objekten, die Ähnlichkeiten aufweisen und zwar bezgl.: a) Alter, b) chem. Zusammensetzung, c) Bewegungsverhältnisse in der Galaxis,

d) räuml. Verteilung in der Galaxis.

Zur Population II (BAADE'sche) zählt man:

Halo Population II

Unterzwerge

Kugelhaufen

RR-Lyrae-Sterne

mittl. Abstand v.d. galakt. Ebene 2000 pc

starke Konzentration zum galakt. Zentrum

homogene Verteilung

Alter 12 bis 15 mal 10^9 Jahre

Schnell-Läufer vom Spektraltyp F bis M, welche h i n t e r
der allgemeinen galakt. Rotation ihrer Umgebung zurückblei-
ben.

Alter 10 bis 15 mal 10^9 Jahre.

Planetarische Nebel (+ Zentralstern bezgl. Alter)

Novae

helle Rote Riesen

Sterne d. galakt. Zentrums

Alter 10 bis 12 mal 10^9 Jahre

Sterne mit schwachen Metall-Linien im Spektrum

Alter 2 bis 10 mal 10^9 Jahre

Zur Population I zählt man:

Sterne mit starken Metall-Linien im Spektrum

A-Sterne

M-Zwerge

normale Riesen

mittl. Abstand v.d. galakt. Ebene 160 pc

geringe Konzentration zum galakt. Zentrum

wolkige Verteilung in den Spiralarmen

Alter 0,1 bis 2 mal 10^9 Jahre

ferner zählt man noch zur extremen Population I

Interstellares Gas

O-B-Sterne

Überriesen

δ -Cephei-Sterne

T Tauri-Sterne

junge galakt. Sternhaufen

mittl. Abstand v.d. galakt. Ebene 120 pc
geringe Konzentration zum galakt. Zentrum
extrem wolkige Verteilung i.d. Spiralarmen
Alter $0,1 \text{ mal } 10^9 = 10^8$ Jahre

POSITRON positiv geladenes Elektron, also das Antiteilchen des Elektrons.

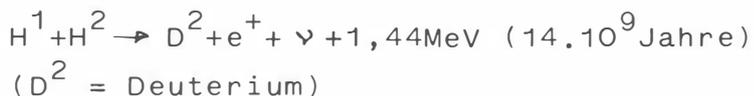
Symbol: e^+

PROTOGALAXIE Jener Galaxienzustand, der am Beginn der Entwicklung steht, etwa also jener Zeitraum in dem die Sterne der ersten Generation ihre Anfangsphase haben.

PROTOSTERNE, PROTOMATERIE Dies ist streng zu unterscheiden, ob man den Begriff mit der klassischen Evolutionstheorie der Sternentstehung in Verbindung bringt, oder mit der Protosternhypothese von V.AMBARZUMJAN. In der klassischen Theorie ist jener Zeitabschnitt bis zum Erreichen der Hauptreihe gemeint (s.a. HAYASHI-TRACK).

V.AMBARZUMJAN versteht darunter jene Protomaterie, die seiner Meinung nach unbedingt zur Sternbildung vorhanden sein muß und über deren physikalische Eigenschaften wir noch im Dunkeln sind.

PROTON-PROTON-ZYKLUS Oberhalb $5 \cdot 10^8$ Kelvin beginnt die Umwandlung von Wasserstoff in Helium durch die sogenannte Proton-Proton-Reaktion (pp-Reaktion) und zwar:



Der Energiehaushalt ergibt insgesamt 26,19 MeV, da durch das Neutrino 0,26 MeV verloren geht und die ersten beiden Zeilen 2fach zu nehmen sind, also $2 \times (1,44 - 0,26 + 5,49) + 12,85 = 26,19 \text{ MeV}$

PROTOSTERNHYPOTHESE siehe PROTOSTERNE

PULSAR siehe NEUTRONENSTERN

QUARKS Hypotetische fundamentale Teilchen, aus denen alle Hadronen zusammengesetzt sein sollen. Isolierte Quarks hat man bislang nicht beobachten können. Es gibt theoretische Gründe für die Annahme, daß es niemals gelingt Quarks als isolierte Teilchen zu beobachten, auch wenn sie in einem gewissen Sinne real sind. In neuester Zeit spricht man sogar von Quark-Sternen als supermassive Objekte, massiver noch als Schwarze Löcher.

QUASARE Kurzname für Quasi-stellare-Objekte. Eine Klasse kosmischer Objekte von sternähnlicher Erscheinung, wobei das Zentrum (aktiver Kern) ca. 1 Lichttag und das ganze Objekt etwa 1 Lichtjahr Ausdehnung besitzt. Man nahm an, diese Objekte wären Frühformen der Galaxienentwicklung, dies auch wegen der starken Rotverschiebung. Neueste Erkenntnisse sprechen allerdings wieder sehr dagegen, da ihr Spektrum völlig anders geartet ist, als ein Galaxienspektrum im Frühzustand sein müßte. Sicher ist jedoch, daß sie mit Galaxienkernen im Frühstadium eng zusammenhängen. Man bringt sie als Frühkerne von Spiral-, Seyfert- und N-Galaxien in Zusammenhang.

RADIOASTRONOMIE Ein entscheidender Fortschritt in der beobachtenden Astronomie gelang mit der Erfassung von Informationen im Bereich der Radiowellen. Durch die Konstruktion großer Parabol-Antennen (Hrecibo z.B. 300 m Durchmesser) gelang es, Information aus den entferntesten Tiefen des Kosmos zu erlangen.

RADIOGALAXIE Galaxien, welche starke Röntgenemissionen aufweisen. Diese Emission kommt meist aus zwei Gebieten symmetrisch zum Zentrum gelegen. Man nimmt an, daß diese Galaxien in einem früheren Evolutionsstadium sind (s. 2.Kap.).

RAUMKRÜMMUNG Darunter versteht man einen Begriff der RIEMANNschen Geometrie, welcher in den Feldgleichungen EINSTEINS eine wichtige Rolle spielt und die "Krümmung des Raumes", hervorgerufen durch Massen, mathematisch ausdrückt

und zwar durch R (Krümmungsskalar) und R_{ik} (Krümmungstensor), (s. Feldgleichungen).

RAUM-ZEIT-KONTINUUM Dieser Begriff stammt von MINKOWSKI 1908. Raum und Zeit für sich allein sind nicht mehr absolut, vielmehr die Raum-Zeit, d.h., die Menge aller Ereignisse, von MINKOWSKI auch die "Welt" genannt (s. LORENTZ-Transformation).

RELATIVITÄTSPRINZIP es lautet: Es gibt keine absolute Ruhe (bzw. Geschwindigkeit) in einem absoluten Raum, die sich etwa dadurch äußern würde, daß in dem absolut ruhenden System etwa der Wert der Proton-Elektron-Anziehung einen Extremwert erreicht. Ebenso gibt es keinen ausgezeichneten Raumpunkt, keine ausgezeichnete Richtung, keinen ausgezeichneten Zeitpunkt (Isotropie und Homogenität). Es kommt nie auf absolute Geschwindigkeiten, Abstände, Winkel, Zeilen, sondern immer nur auf *r e l a t i v e* Werte dieser Größen an.

RELATIVITÄTSTHEORIE, SPEZIELLE (S.R.T.) Die von A. EINSTEIN 1905 vorgelegte neue Auffassung von Raum und Zeit. Auch in der klassischen (NEWTONschen) Mechanik gibt es eine Reihe von math. Transformationen, die Raum-Zeit-Koordinaten verschiedener Beobachter derart miteinander verknüpfen, daß die Naturgesetze diesen Beobachtern gleich erscheinen. Die Raum-Zeit-Transformationen der S.R.T. bringen zum Ausdruck, daß die Lichtgeschwindigkeit eine Naturkonstante ist und daher unabhängig von der Geschwindigkeit des Beobachters ist. Ein System, das Teilchen enthält, die sich mit Geschwindigkeiten, vergleichbar der Lichtgeschwindigkeit, bewegen, wird relativistisch genannt. In diesem Fall müssen Formeln der Relativitätstheorie an Stelle der der NEWTONschen Mechanik verwendet werden (s. "LORENTZ-Transformationen" und "Allgemeine Relativitätstheorie").

REMNANT aus dem Englischen und bezeichnet den Sternrest nach einer katastrophalen Evolutionsphase, z.B. den Rest nach einem Supernova-Ereignis.

RIEMANNsche RÄUME Begriffe aus der RIEMANNschen Geometrie, die für die Formierung von Weltmodellen größte Bedeutung erlangt hat. Wir unterscheiden grundsätzlich drei mögliche kosmische Räume:

- a) Euklidischen Raum
 - b) Elliptischen Raum (auch geschlossener Raum genannt)
 - c) Hyperbolischer Raum (auch offener Raum genannt)
- (s. Math. Anhang).

ROCHE-GRENZE Bezeichnet man jenen ca. kugelförmigen Bereich eines Sterns bis zu dem die Gravitationskraft des Sterns groß genug ist Materie an den Stern zu binden. Überschreitet die Materie durch das Aufblähen des Sterns diese Grenze, so sind die Gravitationskräfte nicht mehr groß genug und Sternmaterie entflieht in den Weltraum oder wird, z.B. bei Doppelternen, vom Partner aufgesogen (s. 1. Kapitel).

RÖNTGENASTRONOMIE Seit man in der Lage ist Röntgenteleskope in eine Umlaufbahn außerhalb der Erdatmosphäre zu senden, gelingt es, Informationen auch in diesem Wellenbereich zu erhalten. In irdischen Observatorien konnte man kaum nennenswerte Erfolge wegen der Erdatmosphäre erzielen.

RÖNTGEN-BURSTERS Darunter versteht man Röntgenquellen, welche die Strahlung nicht kontinuierlich, sondern in Form von Ausbrüchen emittieren. Nicht zu verwechseln mit Pulsaren, die ihre Strahlung kontinuierlich emittieren, jedoch wegen ihrer raschen Rotation bei uns als Pulse beobachtet werden.

RÖNTGENSTERNE Darunter versteht man Sterne, die Röntgenstrahlen emittieren. Meist sind dies Sterne extremer Dichte, wie z.B. Neutronensterne oder Schwarze Löcher bzw. Doppelternsysteme, wobei ein Partner ein extrem massiver Stern ist.

ROTER RIESE Darunter versteht man ein Entwicklungsstadium von Sternen mit einer bis etwa zwei Sonnemassen, welches gewissermaßen das Endstadium der Evolution der Evolution einleitet. Die Sonne wird etwa in acht Milliarden Jahren in dieses Stadium gelangen. Im Inneren hat sich eine große

Wandlung vollzogen, aller Wasserstoff ist zu Helium fusioniert. Die Fusion findet nun auch am Rande der inneren Heliumkugel statt und frißt sich nach außen. Der Sonnenball wird immer größer und gleichzeitig auch kühler. Nach 13 Milliarden Jahren ist die Sonne ca. 100 mal größer, die Leuchtkraft 2000 mal stärker als heute. Die Sonne hat dann einen Radius, der größer als der derzeitige Abstand des Merkurs ($57 \cdot 10^6$ km) ist.

ROTVERSCHIEBUNG Die bei einer sich entfernenden Quelle durch den Dopplereffekt hervorgerufene Verschiebung der Spektrallinien nach dem langwelligen Ende des Spektrums. In der Kosmologie bezieht sie sich auch auf die Verschiebung der Spektrallinien ferner astronomischer Objekte. Als relative Vergrößerung der Wellenlänge ausgedrückt, erhält sie das Symbol: z . Wir unterscheiden kosmologische Rotverschiebung durch die Expansion des Kosmos bewirkt und Dopplerbewegungen, womit Gasbewegungen in Galaxien oder bei Quasaren verstanden werden.

RR-LYRAE-STERNE oder auch Haufenveränderliche genannt. Sie werden auch als kurzperiodische Cepheiden bezeichnet. Sie besitzen einen regelmäßigen Lichtwechsel mit Perioden von 1,2 Stunden bis 1,2 Tagen und Amplituden von 1 bis 2 Magnituden. Spektraltyp von A bis F, häufig in Kugelhaufen situiert, zur Population II gehörig. Typischer Vertreter: RR Lyr.

SEQUENZ s. Hauptsequenz = Hauptreihe im H.R.D.

SPEKTRUM Die in der Natur vorkommende Strahlung ist in der Regel ein Gemisch aus Wellen verschiedener Frequenzen. Ein derartiges nach Frequenzen (oder Wellenlängen, da ja $\nu \cdot \lambda = c$ ist) zerlegtes Strahlungsgemisch nennt man ein Spektrum (s. auch Emissions- und Absorptionslinien im Spektrum).

SPINPRÄZESSION, SPIN Der Spin ist ein fundamentales Merkmal von Elementarteilchen, welches den Rotationszustand des Teilchens beschreibt. Nach den Gesetzen der Quantenmechanik kann der Spin nur bestimmte spezielle Werte annehmen, die ein ganzzahliges oder halbzahliges Vielfaches der PLANCK-Konstante h

betragen. Da auf die Rotationsachse der Teilchen Kräfte einwirken können (z.B. magnetische Felder) so beschreibt diese Rotationsachse eine Präzessionsbewegung.

SPIRALARM nennt man die Sternansammlungen in Spiralgalaxien. Wenn eine derartige Galaxie nur zwei ausgeprägte Arme hat, heißt sie auch Balkenspirale. Die Milchstraße hat eine Vielzahl kleiner, eng gewundener Arme, von denen laufend genauere Daten erhoben werden.

STATIONARITÄTSGRENZE - (s.a. EREIGNISHORIZONT-ERGOSPHÄRE)
Nennt man jene Grenzfläche, die ein Schwarzes Loch umgibt, und an der die Rotverschiebung für ein einfallendes Teilchen unendlich wird. Bei einem rotierenden SL existiert innerhalb der Stationaritätsgrenze der EREIGNISHORIZONT. Zwischen diesen beiden Grenzflächen liegt die ERGOSPHÄRE. Bei nicht-rotierenden SL (SCHWARZSCHILD-SL) fallen beide Grenzflächen zusammen, die Ergosphäre verschwindet.

STEPHAN-BOLTZMANN-GESETZ (STRAHLUNGSGESETZ) Die bei der schwarzen Strahlung bestehende Proportionalitätsbeziehung zwischen der Energiedichte und der vierten Potenz der Temperatur.

STERN-BEZEICHNUNGS-SYSTEME Diese sind mehrfach verfeinert worden. Die HAVARD-Klassifikation ist die Grundlage fast aller Systeme, welche dann mehr und mehr verfeinert wurde. Nach fallender Temperatur geordnet, ergeben sich die folgenden Spektralklassen

S
O-B-A-F-G-K-M
R-N

Jede Spektralklasse ist noch in 10 Klassen unterteilt (z.B. B0 bis B9).

Weitere Besonderheiten sind:

- g Spektrum zeigt Kennzeichen eines Riesensterns, z.B. BgK2
- c,s Spektrallinien sind besonders scharf
- n Linien sind verwaschen
- ✓ Spektrum ist zeitlich variabel
- d Spektrum weist auf Zwergstern hin, z.B. dK0

- e Spektrum hat Emissionslinien, z.B. B0e
- p Spektrum zeigt irgendwelche Besonderheiten, z.B. B0p

Die Spektralklassen

- Q Novae
- P Planetarische Nebel
- W Wolf-Rayet-Sterne lassen sich in das HAVARD-Schema nicht einordnen.

Die MKK-Klassifikation (MORGAN-KEENAN-KELLMAN) ist eine Verfeinerung der HAVARD-Klassifikation und zwar:

- Ia Überriesen höchster Leuchtkraft
- Ib Überriesen geringerer Leuchtkraft
- II Helle Riesen
- III Normale Riesen
- IV Unterriesen
- V Hauptreihensterne (Zwerg)
- VI Unterzwerg, Zwergsterne mit nur 1 bis 2^m geringerer absoluter Helligkeit
- VII Weiße Zwerg (Sterne mit kleinen Radien und daher extrem niedriger absoluter Helligkeit)

Beispiele für die MKK-Klassifikation einiger bekannter Sterne:

Wega	(α Lyr.)	A0V
Polarstern	(α U.Mi)	F8Ib
Sirius	(α C.Ma)	A1V
Sonne		G2V

VERÄNDERLICHE erhalten einen oder zwei Buchstaben und den Sternbildnamen. Dies ergibt 334 Buchstabenkombinationen. Dann geht's weiter mit V335, V336 ... usf.

Für einige wenige Veränderliche sind noch die durch griechische Buchstaben gebildeten Sternnamen in Gebrauch.

Pulsierende Veränderliche:

- C Langperiodische (1 bis 70 Tage), z.B. C δ -Cepheiden
- RR RR-Lyrae-Sterne oder Haufenveränderliche oder auch kurzperiodische Cepheiden genannt (0,05 bis 1,2 Tage)
- M Langperiodische (80 bis 1000 Tage), auch Mira-Ceti-Sterne genannt

SR Halbbregelmäßige Veränderliche (pulsierende Riesen und Überriesen mit Perioden von 30^d bis 1000^d)

ferner gibt es hier fünf Untergruppen

I Irreguläre Variable mit maximaler Amplitude von 2^m

Eruptive Veränderliche

N Novae mit fünf Untergruppen

Na rasch entwickelnde Nova

Nb langsam entwickelnde Nova

Nc sehr langsam entwickelnde Nova

Nd wiederkehrende Nova

Ne novaähnliche Veränderliche

SN Supernova

RCB R-Coronae-Borealis-Veränderliche. Hohe Leuchtkraft der Spektralklasse F bis R. Helligkeitsausbrüche von 1^m bis 9^m .

RW RW-Aurigae-Sterne. Hauptreihensterne der Spektralklasse B bis M mit unregelmäßigen Lichtänderungen um 4^m

UG U-Geminorum oder SS-Cygni-Sterne, Zwerge mit raschem Aufleuchten großer Amplitude in Intervallen von 20^d bis 600^d

UV UV-Ceti-Sterne, auch Flare-Sterne genannt. Kurzes Aufleuchten um 1^m bis 6^m .

Z Z-Camelopardalis-Variable, ähnlich den U-Geminorum-Sternen, jedoch plötzlich die Helligkeitsausbrüche unterbrechend, auf mittlerer Helligkeit verweilend.

STERNHAUFEN Die meisten Sterne unserer Galaxis sind etwa gleichmäßig im Raum verteilt. Gelegentlich stehen jedoch viele Sterne eng beieinander und bilden so einen Sternhaufen mit so großer Dichte, daß es sich nicht um eine zufällige Ansammlung handeln kann. Die Sterne eines Haufens haben alle etwa das gleiche Alter, was für die Kosmogonie der Sterne ein wichtiger Parameter ist. Die Sterne eines Haufens heißen Haufensterne zum Unterschied von Feldsternen (diese gehören keinem Haufen an). Alle Sterne eines Haufens haben auch in etwa die gleiche Geschwindigkeit. Sternhaufen sind kugelförmig (Kugelhaufen), wobei die Sterndichte zum Rand

hin abnimmt. Es gibt auch offene Haufen. Der Unterschied liegt in der Anzahl der Haufensterne. In offenen Haufen zählt man 20 bis 30, in Kugelhaufen an die 10 000 und mehr Mitglieder. Die Kugelhaufen liegen im Bereich des Halo und nehmen an der Galaxienrotation wenig bis gar nicht teil. Die offenen Haufen liegen in der Nähe der galaktischen Ebene (in einer ca. 200 pc dicken Schicht) und nehmen an der allgemeinen Rotation teil. Der mittlere Durchmesser der Kugelhaufen liegt bei 60 pc, der der offenen Haufen etwa bei 4 pc.

STRAHLUNGSDICHTE Die Gesamtenergiedichte der Strahlung eines schwarzen Körpers läßt sich durch das St. BOLTZMANN Gesetz ausdrücken und hat die Dimension $T^4 \cdot \text{erg/cm}^3$ oder auch eV/Liter.

STRAHLUNGSDRUCK Nach dem von EINSTEIN vorgeschlagenen Modell, kann man das Strahlungsfeld auch als Gas von Photonen auffassen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen und eine Energie von $h \cdot \nu$ besitzen. Ihr Impuls ist $h\nu/c$. Die Zahl der Photonen wird durch Absorptionsprozesse verringert, durch Emissionsprozesse vermehrt. Hierbei wird der Impuls, wie bei der Streuung auch, durch Photonenstoß auf Materie übertragen. Damit übt das "Photonengas" einen Druck aus, den Strahlungsdruck. Bei sehr hohen Temperaturen kann der Strahlungsdruck überwiegen. Der Druck auf die Innenwand eines Gefäßes wird durch die Energie der bewegten Gasteilchen erfolgen, aber auch die eingeschlossene Strahlung besitzt Energie und bewirkt einen Druck auf die Gefäßwand. Bei Änderung des Volumens, in das die Strahlung eingeschlossen ist, wächst der Strahlungsdruck mit $V^{-4/3}$.

STREUUNGSRATE Ein Teil des emittierten oder einfallenden Lichtes wird meist "gestreut". Bei Streuung geschieht folgendes: Ladungsträger, z.B. Elektronen, werden von der einfallenden Lichtquelle zum Mitschwingen angeregt und werden so eine Quelle der sekundären, gestreuten Strahlung. In den Atmosphären heißer Sterne ist dieser Prozeß von Bedeutung, dort handelt es sich um freie Elektronen, wodurch die Streu-

ungs-Theorie besonders einfach. Die Streuung hochenergetischer (elektromagnetischer) Strahlung an Elektronen ist auch als Compton-Effekt bekannt. Hier übertragen die hochenergetischen Photonen einen erheblichen Teil ihrer Energie und ihres Impulses auf das Elektron. Die Strahlung wird dadurch energieärmer, also langwelliger.

SUPERHAUFEN (SUPERCLUSTER) Darunter versteht man die Ansammlung von Galaxien. Unsere Galaxis gehört z.B. dem Superhaufen Virgo an, der aus einigen tausend Galaxien bestehen soll.

SUPERNOVA Die Theorie der Sternentwicklung sagt voraus, daß manche massereiche Sterne (größer als zwei bis drei Sonnemassen) am Ende ihrer Entwicklungszeit als Supernova enden können. Es ist bis heute nicht erforscht, welche zusätzliche Voraussetzungen (außer Massereichtum) nötig sind, damit ein solcher Stern als Supernova endet. Dieses Ende besteht in einer gewaltigen "Explosion" des Sterns, bei dem die gesamte Sternmaterie (außer dem innersten Kern) in den interstellaren Raum geschleudert wird. Innerhalb weniger Tage wird die milliardenfache Jahres-Sonnenenergie emittiert (10^{43} bis 10^{44} Joule). Der Rest des Sterns (Remnant) ist häufig (oder immer?) ein Neutronenstern. In unserer Galaxie nimmt man eine Häufigkeit von etwa drei Supernovae in einem Jahrhundert an. Die bekannteste Supernova ist die vom Jahre 1054 (Remnant ist der Krebsnebel). Die letzte beobachtete in unserer Galaxis ist die vom Jahre 1604 (KEPLER), doch glaubt man, daß die Radioquelle Cas A auf eine jüngere Supernova zurückzuführen ist.

SYNCHROTRONSTRAHLUNG Nach den Gesetzen der klassischen Elektrodynamik, strahlt jede beschleunigte (positiv oder negativ beschleunigt) elektrische Ladung elektromagnetische Wellen aus. Im Kosmos sind es relativistische Elektronen, welche die Synchrotronstrahlung emittieren. Da sie nahezu Lichtgeschwindigkeit besitzen, ist ihre Energie sehr groß und zwar $m_0^e \cdot c^2 = 0,511 \cdot 10^6$ eV.

Die Beschleunigung erfahren sie in Magnetfeldern und werden auf ihrer Spiralbahn, also quer zur Fortpflanzungsrichtung beschleunigt. Diese Art der Strahlung kann im sogenannten Elektronensynchrotron beobachtet werden.

SCHÖNBERG-CHANDRASEKHAR-GRENZE auch 'SCHÖNBERG-CHANDRA-SEKHAR-Kriterium genannt, ist jene Obergrenze für die Masse der Heliumkerne, die durch die Kernfusion von Wasserstoff entstanden sind, damit der Stern nach Verlassen der Hauptreihe noch stabil bleibt. Sie liegt etwa bei einem Zehntel der Gesamtmasse des Sterns.

SCHWARZES LOCH = SCHWARZSCHILD-SINGULARITÄT,
SCHWARZSCHILD-RADIUS Warum und wie sich Schwarze Löcher bilden, ist derzeit noch unbekannt, jedenfalls glaubt man, daß sie entstehen, wenn am Ende der Sternentwicklung zuviel Masse übrig bleibt, um einen stabilen Weißen Zwerg zu bilden oder als Neutronenstern ins Gleichgewicht zu kommen (Chandra-sekhar-Grenzmasse). In einem solchen Fall wird das Restgebilde "ewig in sich zusammenfallen". Sie sind nur indirekt "sichtbar" und zwar durch Röntgen- und Radioemission der auf sie einstürzenden Materie. K. SCHWARZSCHILD hat aufgrund der Gleichungen der A.R.T. die erste exakte Lösung geliefert, in ihr ist der Effekt des Schwarzen Loches enthalten. Den Radius, auf den man einen Körper zusammendrücken muß, damit kein Licht mehr entweichen kann, nennt man SCHWARZSCHILD-Radius. Ein Schwarzes Loch wird auch mit SCHWARZSCHILD-Singularität bezeichnet. Bei der Röntgenquelle Cygnus-X1 glaubt man, daß mehr als drei Sonnemassen im kompakten Gebilde sind. Dies kann kein Neutronenstern mehr sein; ist es also ein Schwarzes Loch? Bisher hat man keine eindeutigen Beweise für die Existenz dieser kosmischen Objekte.

SCHWARZER STRAHLER, SCHWARZE STRAHLUNG Eine Strahlung, die in allen Wellenbereichen die gleiche Energiedichte aufweist wie die von einem total absorbierenden erwärmten Körper (Schwarzer Strahler) emittierte Strahlung. Jegliche

Strahlung im thermischen Gleichgewichtszustand heißt Schwarze Strahlung.

SCHWARZER ZWERG Damit bezeichnet man das Endstadium eines Weißen Zwerges, der schließlich allen "Brennstoff" verbraucht hat und als dunkler erkalteter Stern mit oder ohne Planeten mit der Galaxis rotiert.

SCHWELLENTEMPERATUR Die Untergrenze des Temperaturbereichs, in dem eine bestimmte Teilchenart in großer Fülle aus Schwarzer Strahlung erzeugt wird. Sie ergibt sich aus der Masse des Teilchens, multipliziert mit dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit und geteilt durch die BOLTZMANN-Konstante $\left(\frac{m_T \cdot c^2}{k}\right)$.

THERMISCHES GLEICHGEWICHT Ein Zustand, bei dem Teilchen einen bestimmten Bereich von Geschwindigkeiten, Spins, etc. mit genau der gleichen Häufigkeit betreten und verlassen. Jedes abgeschlossenen physikalische System wird, wenn man es genügend lange unangetastet läßt, schließlich einen thermischen Gleichgewichtszustand erreichen.

TREIBHAUSEFFEKT Darunter versteht man jenen Effekt, der eintritt, wenn z.B. einem System ständig Wärme zugeführt wird, ohne daß dieses System die Möglichkeit hat, diese zugeführte Energie wieder abzustrahlen. Wenn z.B. ein Planet eine sehr dichte Atmosphäre hat (z.B. Venus) und diesem Planeten durch die Sonneneinstrahlung ständig Energie zugeführt wird, ohne daß er diese etwa auf der "Nachtseite" wieder in den Weltraum abgeben kann, so wird sich diese Atmosphäre immer mehr und mehr aufheizen. (Wir beobachten, daß auch auf der Erde in klaren Nächten mehr Energie abgestrahlt wird, als in Nächten mit Wolkenbedeckung.)

TRIPLE-ALPHA-PROZESS s. DREI-ALPHA-REAKTION

TYCHO BRAHES SUPERNOVA Diese wurde 1572 von T. BRAHE entdeckt. Sie hatte eine Helligkeit von $m = -4,1$. Es ist heute noch eine Radioquelle als Remnant beobachtbar. In unserer Galaxis leuchtet etwa alle 30 Jahre eine Supernova auf. Nur drei Supernovae sind in unserer Galaxis mit Sicherheit beobachtet worden und zwar: 1054, die von chinesischen Astronomen (Krebs-Nebel), 1572, die von T. BRAHE und 1604, die von KEPLER beobachteten Supernovae.

URKNALLTHEORIE, AUCH BIG BANG THEORIE Aufgrund der Entdeckung der sogenannten Hintergrundstrahlung durch PENZIAS und WILSON im Jahre 1964 wurde die Urknalltheorie gewissermaßen bestätigt. Danach begann die Expansion des Universums vor einem endlichen Zeitraum mit einem Zustand von ungeheurer Dichte, Druck und Temperatur.

VERÄNDERLICHE Ein veränderlicher Stern ist ein solcher, bei dem eine oder mehrere Zustandsgrößen einer zeitlichen Änderung unterworfen sind. Das charakteristische Unterscheidungsmerkmal ist die Lichtkurve. Sie werden mit einem oder zwei Buchstaben vor dem Sternbildnamen bezeichnet. Für einige wenige Veränderliche sind auch noch griechische Vorbuchstaben in Verwendung (δ -Cepheiden). Es gibt langperiodische (klassische) Cepheiden, sogenannte $C\delta$ -Cepheiden der Sternpopulation I (Periode 1 - 70 Tage), CW Cepheiden der Sternpopulation II, auch W-Virginis-Sterne genannt. (Man unterteilt in weitere 12 Gruppen von Veränderlichen; ferner noch in eruptiv-veränderliche Sterne mit 12 weiteren Untergruppen.) (s. a. δ -Cepheiden)

VERZÖGERUNGSZAHL (DECELERATIONSPARAMETER) Darunter versteht man jenen Faktor, um den sich die Fluchtgeschwindigkeit ferner Galaxien verlangsamt. Im HUBBLE-Gesetz ist ja die Expansionsgeschwindigkeit der Galaxien proportional zu ihrer Distanz. Dieses so einfache Gesetz gilt jedoch nicht mehr für ferne Galaxien (weiter als etwa ein bis zwei Lichtjahre). Das Symbol dieses Parameters ist q_0 (bezogen

auf die Jetztzeit) , ansonsten q .

WEISSER ZWERG s. ENTARTETE MATERIE UND NEUTRONENSTERNE

WELTÄQUATOR s. ÄQUATOR KOSMISCHER

WELTMODELLE Aufgrund der A.R.T. lassen sich unter bestimmtem Annahmen Mathematische Modelle für den Ablauf des Weltgeschehens berechnen. Am bekanntesten sind die von A. FRIEDMANN berechneten. Es wurden auch Modelle ohne Berücksichtigung der A.R.T. aufgestellt. Sie sind aber mehr oder weniger bedeutungslos geworden. Die Steady-state Theorie hatte eine gewisse Zeit einige Bedeutung erlangt, ist aber nunmehr völlig überholt.

WELTPERIODE Unter der Annahme eines oszillierenden Weltmodells, das bei einer größeren als der kritischen kosmischen Dichte wahrscheinlich ist, versteht man unter Weltperiode den Zeitraum vom Urknall über die Expansionsphase, die von der Kontraktionsphase abgelöst wird, wieder bis zur Materiezusammenballung und neuerlichem Urknall. Wenn man das derzeitige Weltalter mit etwa 20 Milliarden annimmt, dauert eine Weltperiode etwa 120 Milliarden Jahre.

WELTRADIUS Darunter versteht man den "Krümmungsradius" der (positiv) gekrümmten Welt, aufgrund der vorhandenen Massenansammlungen nach der A.R.T. Er beträgt unter bestimmten Voraussetzungen, s.o., etwa 13 Milliarden Lichtjahre.

WOLF-RAYET-STERNE Sie werden mit dem Buchstaben W bezeichnet. Die hervorstechendsten Eigenschaften liegen im Spektrum und zwar in Form von Emissionslinien atomaren Ursprungs, welche 10 bis 20 mal heller sind, als das angrenzende kontinuierliche Spektrum. Sie gehören zu den heißesten Sternen mit 60 000 bis 100 000^o K Oberflächentemperatur. Man hat gute Gründe anzunehmen, daß sie alle Doppeltsternkomponenten sind.

YERKES-SYSTEM Ist ein verfeinertes System für die Einteilung der Galaxien. HUBBLE Einteilung betraf die Grundtypen Ellipsen - Spiralen - Balkenspiralen - und Irreguläre Galaxien. MORGAN hat vier neue Typen dazugesellt; eine weitere Verfeinerung brachte das YERKES-System.

ZWERGE, WEISSER, SCHWARZER s. "Weißer Zwerg" und "Schwarzer Zwerg".

Geowiss. Mitt. 15
1979, 169 - 192

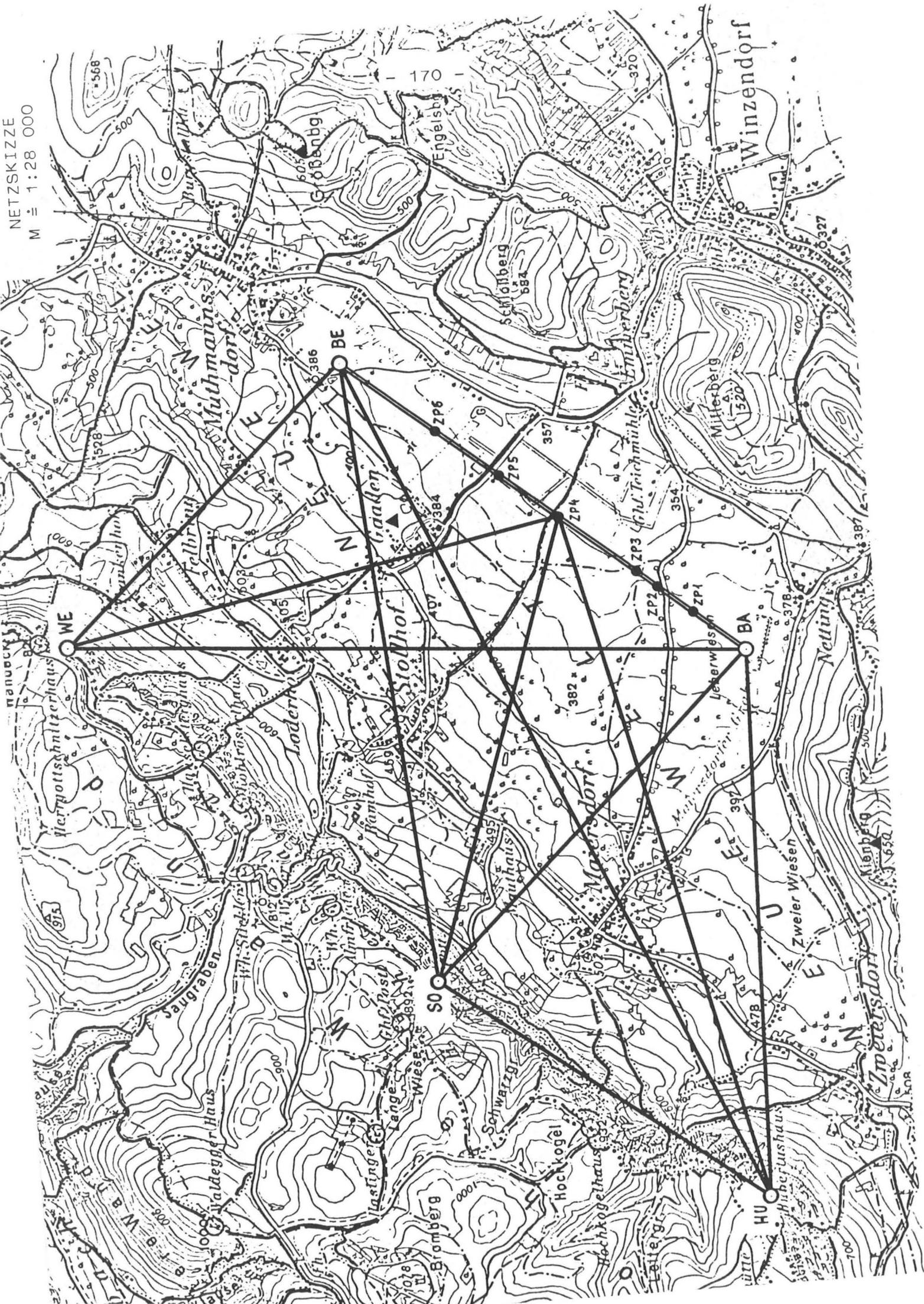
TESTNETZ NEUE WELT

von

R. BRUCKMÜLLER u. E. KORSCHINECK

Dipl.Ing. Reinhard Bruckmüller, Universitätsassistent am
Institut für Landesvermessung der Technischen Univ. Wien
Dipl.Ing. Erich Korschineck, Wiss. Oberrat am Institut für
Landesvermessung der Technischen Univ. Wien
1040, Gußhausstraße 27-29

NETZSKIZZE
M = 1:28 000



I. AUFGABENSTELLUNG

Das Institut für Landesvermessung der Technischen Universität Wien, unter Leitung von O.Prof. Dr. H. SCHMID, hat sich im Jahre 1971 die Aufgabe gestellt, ein geodätisches Freiluftlaboratorium zu schaffen.

Diesem Entschluß gingen eingehende Gespräche mit den fachverwandten Instituten der Technischen Universität Wien voraus, um vorerst das Interesse zu erkunden bzw. spezifische Wünsche zu erfassen. Die Forschungsstätte sollte so konzipiert werden, daß Untersuchungen über den Einfluß der Atmosphäre auf die elektromagnetische und elektrooptische Entfernungsmessung, Untersuchungen über die Bodenreflexion bei der elektromagnetischen Entfernungsmessung, Untersuchungen zur Bestimmung des Refraktionskoeffizienten bei der trigonometrischen Höhenmessung, Genauigkeitsuntersuchungen beim trigonometrischen Nivellement, Genauigkeitsuntersuchungen über photogrammetrisch erstellte EP-Netze, Untersuchungen über die Haltbarkeit und Unveränderlichkeit von verschiedenen Festpunktsvermarkungen, Untersuchungen über die topographische und photogrammetrische Erfassung des Felsgeländes und seine kartographische Darstellung, Geoidstudien, etc., möglich sind. Weiters war zu erwarten, daß eine Reihe weiterer Untersuchungen im Rahmen von Diplomarbeiten, die durch die neue Studienordnung anstatt der schriftlichen Staatsprüfung vorgeschrieben sind, dort durchgeführt werden würden.

II. VORBEREITENDE ARBEITEN

Nun mußte ein Gebiet gesucht werden, welches von den topographischen Gegebenheiten her, obige Untersuchungen erlaubte, geologisch ruhig ist, von Wien aus verkehrstechnisch gut erreichbar ist, geringe Bautätigkeit aufweist und Beherbergungsbetriebe hat. Ein für dieses Vorhaben geeignetes Gebiet, welches obige Forderungen im hohen Maße erfüllt, war bald gefunden. Es ist das Becken der "Neuen Welt" am Fuße der Hohen Wand. Eine landschaftlich reizvolle Gegend, am Rande der

Steinfeldes gelegen, zwischen den Fischauer Vorbergen und dem Bergstock der Hohen Wand. Ausschlaggebend für die Wahl, dieses Areals war auch das Vorhandensein einer Präzisions-nivellementlinie des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen von Winzendorf quer durch das Becken der "Neuen Welt" nach Stollhof und von dort entlang der Mautstraße auf die Hohe Wand.

Im September 1971 wurde mit der Erkundung des Testnetzes begonnen. Einige Schwierigkeiten bereitete uns das Ausschuchen eines für die klassische Basismessung geeigneten Streckenprofils. Die Basis war zur Maßstabsbestimmung des unabhängigen Netzes notwendig und sollte später als Eichstrecke für die elektronischen Entfernungsmesser dienen. Deswegen sollten auch neben Basisanfang und Basisende 6 Zwischenpunkte stabil vermarktet werden. Aus topographischen Gründen konnte die Basis nur in Längsrichtung des Beckens der "Neuen Welt", also parallel zur Hohen Wand, angelegt werden. Hierbei waren zwei Straßen, etliche Feldwege und zwei größere Gräben zu queren, die Winschutzgürtel und das kupierte Terrain zu berücksichtigen und die beiden Basisendpunkte so festzulegen, daß zwischen Ihnen und dem Großteil der Zwischenpunkte direkte Sicht bestand, eine Verbauung durch Häuser vorausschauend unwahrscheinlich war und die Vielfachen von 24 m (Drahtlänge) nicht gerade auf der Straße oder im Graben zu liegen kamen. Nun, alle oben genannten Parameter voll zu berücksichtigen, gelang zwar nicht, aber es konnte mit viel Mühe ein recht guter, 3,2 km langer Kompromiß gefunden werden. Außerdem wurden noch die drei Netzpunkte "Hubertus Haus", "Sonnenuhrfelsen" und "Wandeck" am Rande des Steilabfalles der Hohen Wand erkundet. Von diesen Punkten auf der Wand ist dann später eine Ausbreitung des Netzes in das Steinfeld möglich. Auf den Fischauer Vorbergen gelang es uns wegen der Bewaldung nicht Punkte zu erkunden, die sowohl Sicht zur Hohen Wand als auch freie Sicht ins Steinfeld erlaubten. Hier wäre der Bau von Hochständen notwendig gewesen.

Anfangs Oktober 1971 wurde im Zuge der Großen Feldübungen aus Landesvermessung mit den Studenten die erkundete Basis

ausgepflockt und ein Längsprofil gemessen. Aufgrund des ausgewerteten Längsprofils konnten im Frühjahr 1972 endgültig Basisanfang, Basisende und die Zwischenpunkte lokalisiert werden. Mit Hilfe der Katastermappe wurden nun die von der Stabilisierung der Festpunkte betroffenen Grundstücke festgestellt und die Eigentümer erhoben. Es wurde dann mit viel Überredungskunst eine schriftliche Bewilligung der Grundeigentümer für den Bau und die dauerhafte Vermarkung der Festpunkte eingeholt.

Wegen der vorgesehenen Präzisionsmessungen hätten wir am liebsten alle Festpunkte mit Pfeilern stabilisiert. Aber sowohl wegen der Forderung der Grundeigentümer, daß die Bewirtschaftung der Felder nicht behindert werden dürfte, als auch aus Kostengründen wurden nur die beiden Basisenden und die beiden äußeren Hohen Wand Punkte "HU" und "WE" für eine Vermarkung mit Pfeilern vorgesehen. Die übrigen Festpunkte sollten dauerhaft bodengleich in einem Betonbett vermarktet werden.

III. GEOLOGIE

Von besonderer Wichtigkeit war nun noch für uns über die geologische Situation der "Neuen Welt" Bescheid zu wissen. Einmal wegen der Stabilität der Basis und des gesamten Netzes, zum anderen wegen der Beschaffenheit des Untergrundes an jenen Stellen, an denen die Festpunkte situiert werden sollten. Diese Kenntnisse sind von ausschlaggebender Bedeutung für die Dimensionierung und Bauart der Pfeiler und somit auch für die zu erwartenden Baukosten. Zur Lösung dieses Fragenkomplexes wandten wir uns um Hilfestellung an das Institut für Geologie der TU Wien. Die Herren Dr. EPPENSTEINER und Dr. RIEHL erklärten sich freundlicherweise sofort bereit uns zu unterstützen und machten den Vorschlag, auch noch einen Bodenmechaniker, Herrn Dr. FROSS, zuzuziehen. Dieses Team, verstärkt durch Dr. PETERS und mich, führte im März 1972 Probebohrungen mit der leichten Rammsonde (Rillensonde) entlang der Basis durch. Die Schlagzahl pro Dezimeter und das durch die Rille entnommene Material geben Aufschluß über Dichte und Art des Unter-

grundes. Eine äußerst anstrengende und schweißtreibende Arbeit. Die dem Boden abgerungenen Proben zeigten beim Basisende in Muthmannsdorf zuerst eine Anschüttung, dann Verwitterungslehm bis ca. 0,90 m, darunter Seetone mit kalkartiger Substanz und bei 6,50 m unter der Oberfläche fest gelagerte Sande, vermisch mit Mergel. Die weiteren Sondierungen bei den Zwischenpunkten der Basis ergaben durchwegs harte und trockene Böden mit verfestigten Sanden, in Tiefen von 1,50 m bis 3,30 m. Beim Basisanfang in Netting, auf einem Damm gelegen, konnte die Sonde wegen des groben Schüttmaterials nicht eingesetzt werden. Es wurde erwogen, eine Probebohrung mit einem großen Bohrgerät durchführen zu lassen.

Einen Überblick über die geologische Situation der "Neuen Welt" gab Dr. RIEHL in seinem Bericht zur Frage der Stabilität der Basismeßstrecke.

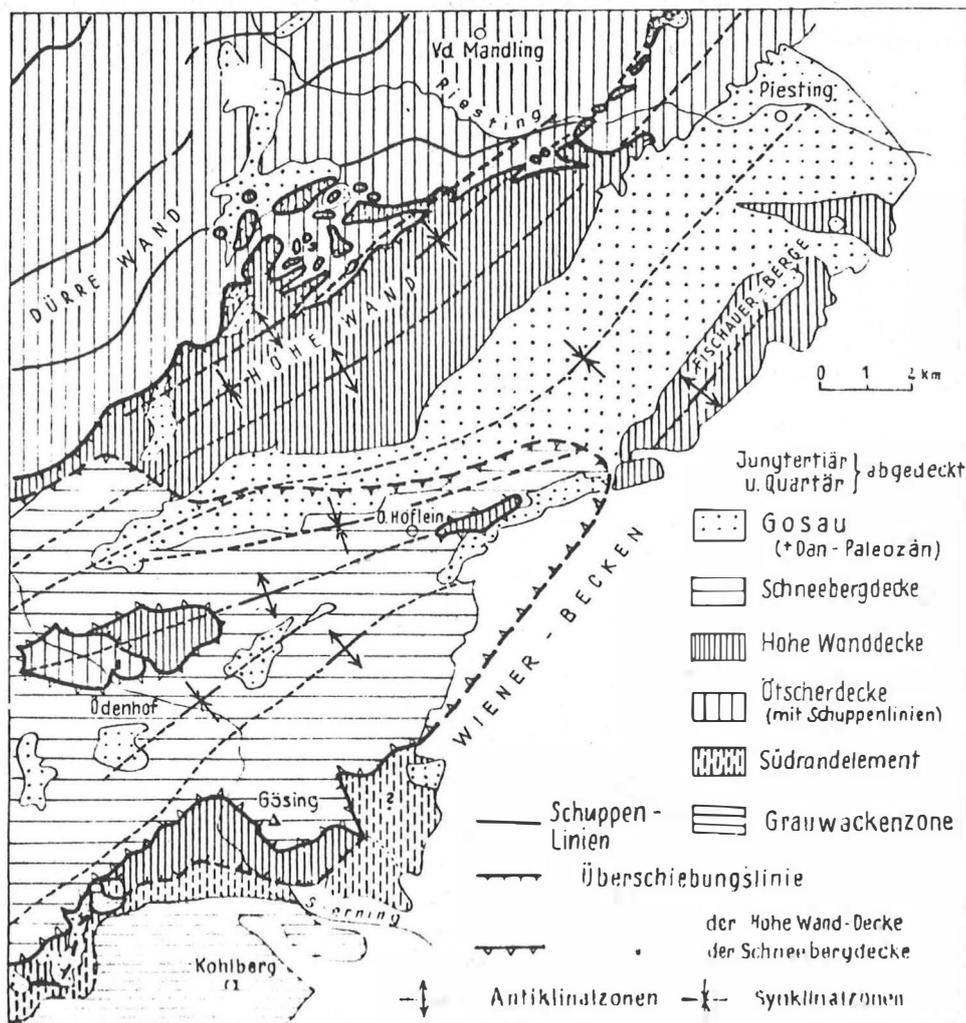


Abb. 1: Tektonische Übersichtsskizze

Ausgehend von der tektonischen Übersichtsskizze PLÖCHINGERS, in der der komplizierte geologische Bau des Gebietes zu sehen ist, unterscheidet er 4 grundsätzliche Einheiten:

- 1.) die stark verschieferte Grauwackenzone
- 2.) den Kalkalpenanteil, der in Einzeldecken verschuppt, und überschoben ist
- 3.) die Ablagerungen der Gosau, als Mulde eingefaltet und in den Schuppenbau eingebaut
- 4.) die Sedimentation des Wiener Beckens im SE

RIEHL meint, daß die älteren tektonischen Vorgänge 1.) bis 3.) rezent sicher nicht mehr wirksam sind. Die Vorgänge der Deckenüberschiebung sind abgeschlossen. Die Bewegungszonen könnten nur als Schwächezonen wieder Bewegungsvorgänge "anziehen" und so zu neuerlichen Verstellungen führen. In diesem Sinne sind die zahlreichen Deckengrenzen und Schuppenlinien von relativ geringer Bedeutung.

Von Bedeutung sind die Linien junger Bewegungen an denen das Wiener Becken abgesunken ist und noch absinkt. Diese Störungszonen verlaufen parallel zur Basismeißstrecke, östlich der Fischauer Vorberge. Ihr Einfluß auf die "Neue Welt" ist somit sicher sehr gering.

Kritischer beurteilt RIEHL ältere Störungszonen, die quer zur Basisrichtung verlaufen, wie etwa die Erosionsfurche der Prosetklamm. Hier könnten entlang dieser Störungen im Verlauf der Beckenabsenkung Krustenspannungen abgebaut werden, die Bewegungen zur Folge hätten. Diese Störungszonen sind im Becken von Seetonen verdeckt. Die Frage, inwieweit heute solche Bruchzonen unter Spannung stehen, ist schwer zu beantworten. RIEHL möchte dieser Frage durch Messung des CO_2 -Gehaltes im Eodengas nachgehen. Zusammenfassend meint er, daß die Basismeißstrecke entlang der Faltenachse der Gosaumulde eine sehr stabile Position hat.

Im Frühjahr 1972, nachdem das Vorhaben konkrete Gestalt angenommen hatte und damit die Kosten abschätzbar wurden, versuchten wir durch Ansuchen an Forschungsförderungsstellen die Finanzierung zu sichern. Laut Kostenvoranschlag wurden Mitteln in der Größenordnung von S 185 000,- für Probeboh-

rungen, Pfeilerbau, Stabilisierung der Nebenpunkte, Personalkosten für Hilfskräfte bei Basismessung benötigt. Erfreulicherweise erhielten wir am 14. 7. 1972 die Nachricht, daß das Kuratorium der Hochschuljubiläumsstiftung der Stadt Wien uns S 100 000,- Förderungsmittel zur Verfügung stellte. An dieser Stelle wollen wir uns nochmals herzlich für die Unterstützung bedanken. Dies blieb auch die einzige finanzielle Zuwendung für dieses Projekt.

IV. PFEILERBAU

Nach Auswertung der mit Hilfe der Rillensonde entnommenen Bodenproben im Erdbaulabor der TU Wien legte das Team aus Geologen, Bodenmechanikern und Geodäten anfangs November 1972 die weitere Vorgangsweise fest.

Aus Kostengründen wurde die beim Basisanfang vorgesehene Probebohrung mit einem Großgerät gestrichen. Inzwischen eingeholte Erkundigungen bei Baufirmen ergaben, daß die Pfeiler am günstigsten mittels Bohrpfählen zu erstellen sind. So wurde denn beschlossen, die Pfeiler mittels gezogener Rohrpfähle zu bauen, wobei der Bodenmechaniker Dr. FROSS an Ort und Stelle anhand der Bodenproben die erforderliche Bohrtiefe festzulegen hat. Der Durchmesser des Pfahles soll mindestens 18 Zoll (45 cm) betragen. Die Füllung soll mit Leichtbeton erfolgen, damit das Raumgewicht nicht mehr als 2 t/m^3 beträgt und somit das Gewicht des Pfahles möglichst gering gehalten werden kann. Dadurch ist es möglich, auch bei nicht sehr tragfähigen Böden, über die Mantelreibung den Pfahl zu stabilisieren und man erspart sich die Bohrung in größere Tiefen. Der oberirdisch sichtbare Teil des Pfeilers wird dann mittels Steckeisen und konischer Schalung auf den Pfahl aufgesetzt. An der Pfeileroberfläche wird eine Aussparung freigehalten, die es dann später erlaubt, Messingplatte und Pfeilerbolzen einzusetzen. Die Pfeilerbolzen wurden so konzipiert, daß einschraubbare Einsätze es erlauben, sowohl Geräte mit Wild- und Zeiß- als auch Kerngewinde auf den Pfeiler zwangszentriert zu befestigen.

Die Zwischenpunkte der Basis sollen nur ca. 1,5 m tief fundam-
mentiert werden und eine sich nach oben verjüngende Form haben.
Den bodengleichen Abschluß bildet ein einbetonierter Gußeisen-
rahmen mit Schachtdeckel. In einer freigelassenen Aussparrung
wird dann später ein genau eingefluchteter Bolzen eingesetzt
und gekörnt.

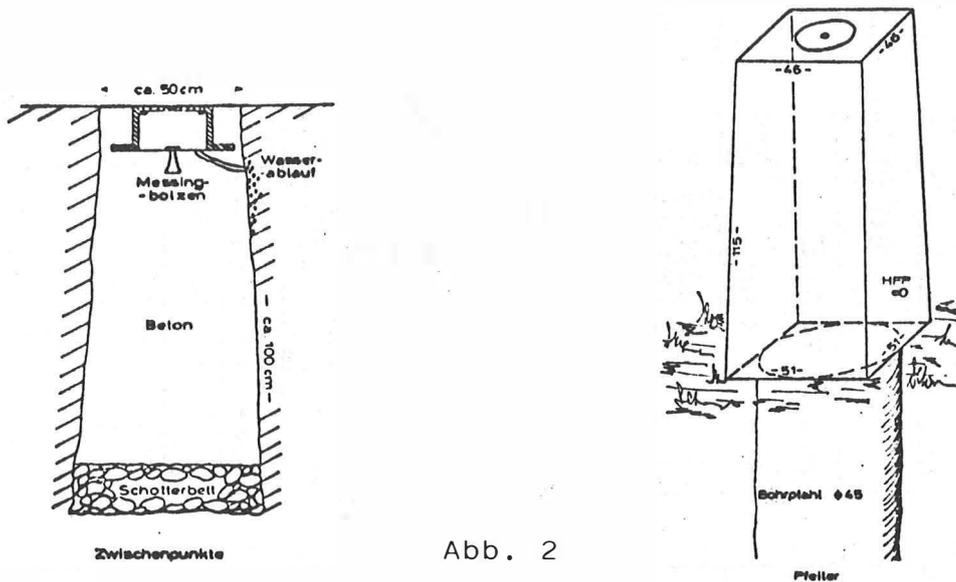


Abb. 2

Nach Einholung einiger Angebote wurde das Brunnenbau- und Tief-
bohrunternehmen Dipl.Ing. Siegfried URBAN, Himberg, beauftragt,
die Abteufung der beiden Bohrungen an den Basisenden, wie oben
beschrieben, vorzunehmen. Für die Herstellung der Pfeiler-
schalung und die Betonierarbeiten für Pfeiler und Zwischen-
punkte wurde die Bauunternehmung HALBWEIS, Maiersdorf, ver-
pflichtet.

Am 28. 11. 1972 wurde mit den Bohrarbeiten beim Pfeiler Net-
ting (BA) begonnen und am 14. 12. 1972 beim Pfeiler Muthmanns-
dorf (BE) beendet. Auf Anraten von Dr. FROSS wurde der Pfeiler
BA 5,40 m und der Pfeiler BE 7,60 m tief abgeteuft. Bis
21. 12. 1972 war auch der Bau der Zwischenpunkte abgeschlossen.

Zur gleichen Zeit wurde auch der Pfeiler "Wandeck" und der
Bodenpunkt "Sonnenuhrfelsen" errichtet. Der Pfeiler Wandeck
ist auf Fels gegründet. Beim Netzknoten Sonnenuhrfelsen mußte
wegen der Ausgesetztheit auf einen Pfeilerbau verzichtet wer-
den. Er wurde mit einem im Fels eingelassenen Bolzen vermark-
t, der durch einen bodengleich einbetonierten Gußeisenrahmen mit



DIPL. ING. SIEGFRIED URBAN
BRUNNENBAU- UND TIEFBOHRUNTERNEHMEN
2325 HIMBERG B. WIEN, NÖ., HAUPTSTR. 2, TEL. 0222/84 13 85, 02235/93 72
1060 WIEN, NIKOLSDORFERGASSE 31, TELEFON 0222/67 79 288
BOHRABTEILUNG

TH WIEN, Institut
f. Landesvermessung
Auftraggeber: *f. Landesvermessung*
Bauvorhaben: *Netting a.d.
Hohen Wand NÖ*

BOHRUNG / ~~SCHURF~~ BRUNNEN NR. 1

ZCHG. NR.: 72134	MASSTAB 1:100	<i>delberger</i>	
DATUM 11.12.1972	NEIGUNG 0°	Bohrbeginn 30.11.1972	Bohrende 5.12.1972
Signatur			Bemerkungen (Proben, Versuche, etc.)
1,60		<i>φ 600%</i>	Anschüttung Erde, Schotter
1,60			
2,20	0,60		Durchdringung Lehm u. Steinens bis <i>φ 380</i>
2,70	0,50		Anschüttung Sand, Lehm u. Erde, Lehm u. Schotter - <i>φ 380</i> sandig, lehmig gelb
3,30	0,60		Lehm u. Schotter - <i>φ 250</i> %, gelbgrün
3,80	0,50	<i>φ 450%</i>	Lehm u. Schotter - <i>φ 15</i> %
4,50	0,80		Lehm, gelbgrün
4,90	0,30		Tagel u. Mergel, grünlich
5,40	0,50		Mergel, graubraun
<p><i>φ 11%</i> = Grundwassersp. Datum <i>WP</i> = Grundwasserprobe = Meißelarbeit</p> <p>Bohrung 2 (Muthmannsdorf) Z.Nr. 72135</p>			



DIPL. ING. SIEGFRIED URBAN
BRUNNENBAU- UND TIEFBOHRUNTERNEHMEN
2325 HIMBERG B. WIEN, NÖ., HAUPTSTR. 2, TEL. 0222/84 13 85, 02235/93 72
1060 WIEN, NIKOLSDORFERGASSE 31, TELEFON 0222/67 79 288
BOHRABTEILUNG

TH WIEN, Institut
f. Landesvermessung
Auftraggeber: *f. Landesvermessung*
Bauvorhaben: *Muthmannsdorf
N.Ö*

BOHRUNG / ~~SCHURF~~ BRUNNEN NR. 2

ZCHG. NR.: 72135	MASSTAB 1:100	Bohrmeister: <i>Heidelberger</i>	
DATUM 15.12.1972	NEIGUNG 0°	Bohrbeginn 6.12.1972	Bohrende 14.12.1972
Bohrer	Koten NN	Schichtstärke m	Signatur
	0,00		
	0,80	0,80	Anschüttung Erde, Ziegel
	1,10	0,30	Lehm, sandig, graubraun
	2,20	1,10	Lehm, graubraun
	2,50	0,30	Lehm, sandig, hellgrün, feucht
	2,90	0,40	Lehm u. Pflanzens graubraun
	3,30	0,40	Lehm, grünlich
	3,80	0,50	Lehm, schwarz, feucht - maß
	4,10	0,30	Lehm u. Schotter - <i>φ 75</i> %, graugelb
	4,40	0,30	Schotter - <i>φ 50</i> "/m u. Lehm, gelbbraun
	5,00	0,60	Lehm u. Steinens - <i>φ 70</i> "/m, Pflanzens grünlich
	5,00	0,60	Lehm u. Schotter - <i>φ 10</i> "/m braungrün
	6,00	0,40	Lehm u. Mergel, sandig graubraun
	6,30	0,30	Sand, lehmig, gelb
	6,60	0,30	Sand, tagelig, graugelb
	7,60		
<p><i>φ 11%</i> = Grundwassersp. Datum <i>WP</i> = Grundwasserprobe = Meißelarbeit</p> <p>Bohrung Nr. 1 (Netting) Z.Nr. 72134 <i>φ 11%</i> = Grundwassersp. Datum</p>			

Abb. 3 : Bohrprotokolle

Deckel geschützt wird. Der Pfeiler Hubertushaus, auch auf Fels gegründet, wurde erst im Herbst 1975 gebaut.

Die Kosten für den Bau von 4 Pfeilern und 7 Bodenpunkten betragen rund S 61 000,-.

Im August 1973 wurden Pfeilerplatten und Pfeilerbolzen beim Basisanfang und Basisende, sowie die Bolzen der Zwischenpunkte sorgfältig, mit Hilfe eines Theodolits, eingefluchtet und dann einbetoniert. Anschließend wurden die Pfeiler mit dem witterungsbeständigen Schutzanstrich "Disbon" versehen. Die Pfeiler Wandeck (WE) und Hubertus Haus (HU) wurden erst im Herbst 1975 mit Pfeilerplatten und Pfeilerbolzen bestückt und mit "Disbon" gestrichen.

V. BASISMESSUNG

Die Basismessung ist eine sehr personal- und zeitintensive Tätigkeit. Es müssen dabei nicht nur 17 Mann Fachpersonal zur Verfügung stehen, sondern auch die äußeren Bedingungen, wie abgeerntete Felder und eine für die Basismessung günstige Witterung, müssen gegeben sein. Daher war die Basismessung nur unter Mithilfe der Studenten möglich, entweder im Zuge der 14tägigen Feldübungen oder anschließend an die Feldübungen gegen Bezahlung der Studenten. Diese Voraussetzungen, die alle gleichzeitig erfüllt sein mußten, waren auch der Grund warum sich die Basismessung auf einen Zeitraum von über zwei Jahren erstreckte.

Anfangs Oktober 1973 wurden im Zuge der Landesvermessung Feldübungen die Vorarbeiten für die Basismessung im Angriff genommen. Es wurden Holzstege über die Gräben gebaut und zwei Teilstücke ZP5 - ZP6 und ZP6 - BE ausgepflockt, d.h., in 24 m Abständen Pflöcke in die Basisflucht eingeschlagen. Weiters wurde die Lage der Zentrierdreiecke erkundet, die dort notwendig wurden, wo aus topographischen Gründen die Länge eines Teilstückes der Basis kein ganzzahliges Vielfaches von 24 m ergab. Dann wurde über alle Pflöcke ein Nivellement geführt, daraus ein Längenschnitt gezeichnet und in den geplanten Drahthorizont eine ausgleichende Gerade gelegt, von der weg die je-

weiligen Stativhöhen abgegriffen werden konnten. Unter Rücksichtnahme auf die relativ kurze Bauweise der WITTRAMschen Spannböcke war eine Stativhöhe über 1,1 m nicht möglich, ein Umstand, der sich wiederholt als sehr nachteilig erwiesen hat. Über den Pflöcken wurden nun die Stative zentrisch mit der vorgegebenen Instrumentenhöhe aufgestellt, jedoch war es im weichen Ackerboden notwendig, für alle drei Stativbeine eigene Pflöcke einzuschlagen, um die nötige Stabilität der Stative zu gewährleisten. Bei der Aufstellung der Stative wurden einheitlich zwei Stativbeine parallel in Basisrichtung gelegt, um dem Beobachter eine bequeme Ablesung zu ermöglichen und vor allem ein Anstoßen zu verhindern.

Knapp vor Beginn der Drahtmessung wurden von den stabilisierten Zwischenpunkten aus mit einem T2 die Jäderinzapfen eines Teilstückes eingefluchtet und die Zapfenschneiden ausgerichtet. Der durch das Alignement auf die Drahtmessung wirksame Fehler ($K_6 = -\frac{a^2}{2s}$) blieb dadurch weit unter 1μ .

Die Drahtmessung selbst wurde von 2 Drahtpartien mit 4 Invardrähten in Hin- und Rückmessung durchgeführt, d.h., jede Teilstrecke wurde acht mal gemessen.

Die Ablesungen an den Regletten erfolgten je Satz drei mal, wobei die maximale Differenz $\leq 0,2$ mm bleiben mußte. Wurde diese Schranke nicht erreicht, wurde der Satz verworfen und ein neuer gemessen. Bei der Rückmessung wurden bei jeder Drahtlage die Ergebnisse mit denen der Hinmessung verglichen, um grobe Meßfehler auszuschalten. Als Meßgeschwindigkeit wurden ca. 300 m pro Stunde einfache Messung mit einem Draht erreicht.

Zur Erfassung der Temperatur zum Zeitpunkt der Messung wurde pro Drahtlage die Temperatur mittels Schleuderthermometer auf $1/10^{\circ}$ C genau bestimmt.

Das Zapfennivellement wurde mit einer aus Gewichtsgründen speziell angefertigten 1,2 m langen Alulatte mit $1/2$ cm Teilung und zwei versetzten Skalen sowie dem automatischen Nivellier ZEISS Ni2 mit Planplattenvorsatz durchgeführt. Die Messung selbst wurde jeweils unmittelbar vor der Hinmessung und nach der Rückmessung mit den ersten zwei Drähten

ausgeführt sowie nach der Rückmessung mit dem 3. und 4. Draht. Als Genauigkeit wurde die Erfassung des Höhenunterschiedes auf besser $\pm 0,1$ mm angestrebt und erreicht. Bei einem Δh von 1 m z.B. beträgt bei dieser Genauigkeit der auf die Längenmessung wirksame Fehler bereits $\pm 4 \mu$ ($K_{3,1} = \frac{h^2}{2B}$).

Unmittelbar nach Beginn der Drahtmessung wurde an den Teilstückendpunkten die große Lotung durchgeführt. Hierbei wird mittels Sekundentheodolit in beiden Kreislagen und zwei Sätzen der Winkel zwischen Bodenpunkt und Jäderinzapfen von einem 2 - 5 m rechtwinklig zur Basis gewählten Standpunkt aus gemessen. Anschließend wurden die Winkel im Zentrierdreieck in 4 Sätzen gemessen. Angestrebt wurde ein mittlerer Fehler von $\pm 5^{\text{cc}}$. Dies ergibt bei ungünstigster Annahme einen in Basisrichtung wirksamen Fehler von $\pm 0,2$ mm. Die Seitenmessung im Zentrierdreieck besorgten die Drahtmeßpartien.

Bei der erwähnten Meßanordnung beträgt der Personalaufwand 17 Mann. 3 Mann besorgen das Nivellement, 2 Mann die Lotung und je 6 Mann bilden eine Drahtmeßpartie.

Mitte Oktober 1973 konnten die Teilstücke ZP5 - ZP6 und ZP6 - BE gemessen werden. Ein Jahr später konnte wegen der schlechten Witterung zu Trainingszwecken nur das Teilstück ZP5 - ZP6 nachgemessen werden. Im Herbst 1975 konnte dann im Rahmen der lehrplanmäßigen Feldübungen das Basisteilstück ZP5 - ZP4 und im Anschluß daran, unter der dankenswerten Mit Hilfe von sechs Herren der wissenschaftlichen Abteilung des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen, die einen eigenen Drahtmeßtrupp stellten, das gesamte Reststück der Basis von ZP4 - BA gemessen werden.

Die Komparierung der 4 Invardrähte vor der Basismessung erfolgte im August 1972 durch das BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS & MESURES (BIPM) in Sevres, Frankreich.

Nach der Basismessung wurden im August 1976 die Invardrähte an der PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN BUNDESANSTALT (BTB) in Braunschweig kompariert.

Der Schwerewert für die Basis Neue Welt wurde durch Mittelung von fünf über die Länge der Basis verteilten Schwerewerten,

die im Jahre 1961 von der wissenschaftlichen Abteilung des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen gemessen wurden, gefunden. Seine Größe 980,7928 Gal bezogen auf das Alte Potsdamer Schweresystem.

Die Auswertung der Meßergebnisse und Berechnung der Basislänge hat R. BRUCKMÜLLER im Rahmen seiner Diplomarbeit mit großer Akribie und mit Hilfe der EDV durchgeführt. Er verarbeitete das umfangreiche Datenmaterial auf der CYBER 74. Die Programmierung besorgte Herr FÜRST.

Ein Vergleich der Drahtmessung BIPM - PTB ergab, nachdem die Eichwerte auf ein einheitliches System gebracht wurden, bis auf einen Draht eine durchaus gute Übereinstimmung. Eine Verlängerung der Drähte in 4 Jahren um $40 - 60 \mu$ entspricht durchaus den praktischen Erfahrungen, daß Invardrähte durch Alterung länger werden. Die Drahtlänge für die Messungzeitpunkte wurde durch lineare Interpolation zwischen den Eichwerten ermittelt. Die gemessenen Daten mit einem der 4 Drähte (Nr. 656) mußten, wegen einer Verlängerung des Drahtes um 274μ , ausgeschieden werden.

Die Auswertung der Meßdaten und Berechnung der Längen der Teilstücke der Basis brachten folgendes zufriedenstellendes Ergebnis:

Horizontale Längen der Basisteilstücke

	im Messungshorizont	reduziert auf Meeresniveau
BA - ZP1	401,139 m \pm 0,5 mm	401,116 m
ZP1 - ZP2	312,123 m \pm 0,3 mm	312,104 m
ZP2 - ZP3	153,440 m \pm 0,2 mm	153,431 m
ZP3 - ZP4	621,350 m \pm 0,8 mm	621,315 m
ZP4 - ZP5	497,696 m \pm 0,7 mm	497,668 m
ZP5 - ZP6	476,120 m \pm 0,7 mm	476,093 m
ZP6 - BE	730,183 m \pm 0,8 mm	730,140 m

Horizontale Entfernung Basisanfang - Basisende

BA - BE	3192,051 m \pm 3,3 mm	3191,867 m
---------	-------------------------	------------

Schräge Entfernung Basisanfang - Basisende

BA - BE	3192,055 m \pm 3,3 mm
---------	-------------------------

Nähere Einzelheiten bezüglich der Auswertung der Basis sind in der Diplomarbeit von R. BRUCKMÜLLER vom November 1976 zu finden.

VI. HÖHENBESTIMMUNG

Wie schon anfangs erwähnt, führt die Präzisionsnivellementlinie 787 des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen vom Steinfeld quer durch die Neue Welt auf die Hohe Wand. In den Jahren 1973, 1974, 1977 und 1978 wurde nach Versetzen von HFP-Bolzen an den Pfeilern, von den Hörern im Rahmen der Großen Feldübungen aus Landesvermessung, Basisanfang, Basisende und die Zwischenpunkte mittels Präzisionsnivellement an das staatliche Höhensystem angeschlossen.

An Geräten wurden das Kompensatornivellier MOM-Ni-A3 und das Libellennivellier WILD-N3 sowie 1 Paar KERN- und 1 Paar ZEISS-Invarbandlatten verwendet. Die Invarbandlatten wurden nach den Messungen vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen kompariert. Die Ergebnisse der Komparierung wurden im Höhenausgleich berücksichtigt.

Aus nachstehender Nivellementübersicht kann ersehen werden, wann welche Nivellementlinien mit welcher Gerätschaft gemessen wurden und welcher mittlere Kilometerfehler μ' erreicht wurde. In der letzten Spalte der Übersicht sind die aus einer strengen Ausgleichung hervorgegangenen Höhen der Basispunkte und deren mittlerer Fehler nach der Ausgleichung angeführt.

Der strenge Ausgleich sämtlicher Nivellements zur Höhenbestimmung sowohl der Basisendpunkte als auch der Zwischenpunkte wurde mit dem Ausgleichsprogramm NETZ-3D von ELMIGER auf der CDC-CYBER 74 der TU Wien von Dipl.Ing. LEPUSCHITZ gerechnet. Da dieses Programm zur Berechnung des Höhenausgleichs nur Höhenwinkel verwendet, mußten die aus dem Nivellement bestimmten Höhendifferenzen darauf umgerechnet werden. Durch eine geeignete Überkorrektur der Gewichte für diese fiktiv gemessenen Höhenwinkel, sowie durch die Änderung von bestimmten Parametern war es möglich, einen strengen Nivellementausgleich mittels eines Höhenwinkelausgleichs zu berechnen.

NIVELLEMENT-ÜBERSICHT NEUE WELT

		Präz. Niv. 1973	Präz. Niv. 1974	Präz. Niv. 1977		Präz. Niv. 1977		Techn. Niv. 1977			Präz. Niv. 1978				weitere Ermittlung der Werte m. Datum
Absolute Höhe <small>(m. Ermittlung)</small>	HB 28681-BE- -HB 30672	HB 30672-BE	HB 30672-BE	HB 39671-BA	HB 30671-BA	HB 30672-ZP4	HB 30672-ZP4	BE-BA	BA-BE	BA-BE	HB 30671- -HB 30672-ZP4	HB 30672-BE- -HB 30673	HB 30673-ZP3	HB 30673-ZP3	
		Wild N3 $\mu' = \pm 0,27$	Wild N3 $\mu' = \pm 0,17$	Wild N3 $\mu' = \pm 0,22$	MM NI-A3 $\mu' = \pm 0,17$	Wild N3 $\mu' = \pm 0,17$	MM NI-A3 $\mu' = \pm 0,14$	Zeiss OPTON $\mu' = \pm 3$	MM NI-A3 $\mu' = \pm 3$	Zeiss OPTON mit Vorabsstell $\mu' = \pm 0,23$	Wild N3 $\mu' = \pm 0,19$	MM NI-A3 $\mu' = \pm 0,19$	Wild N3 $\mu' = \pm 0,38$	MM NI-A3 $\mu' = \pm 0,08$	
HB 39671	347,197			↓	↓						↓				
HB 39672	350,8160	↑	↑			↓	↓				↓				
HB 39675	390,8587											↑	↓	↓	
BA				↓	↓			↑	↓	↓		↑	↓	↓	378,1090 $m_p = 0,29$
ZP 1								↑	↓	↓					373,9578 $m_p = 1,29$
ZP 2								↑	↓	↓					367,5417 $m_p = 0,22$
ZP 3								↑	↓	↓					367,3146 $m_p = 1,18$
ZP 4						↓	↓	↑	↓	↓	↓				359,5374 $m_p = 0,67$
ZP 5								↑	↓	↓			↓	↓	363,3821 $m_p = 0,72$
ZP 6								↑	↓	↓					372,6900 $m_p = 1,01$
BE		↑	↓					↓	↓	↓		↓			382,6671 $m_p = 0,55$
HB 28681	412,8844	↓													
Bemerkungen:		HB 28681 Die Höhe wurde 1961 ermittelt		Für beide Nivellements wurden die selben Wechsel- punkte benutzt.		Für beide Nivellements wurden die selben Wechsel- punkte benutzt.		Beide Nivellements wurden über neu gepflugte Äcker geführt, die Leitern wurden auf Frosche aufgestellt.			Leite wurde auf eingeschla- genen Placken aufgestellt.				

Abb. 4

Die Höhe der Messingplatte des Pfeilers Wandeck und des Pfeilers Hubertus Haus sowie die Höhe des Messingbolzens des Punktes Sonnenuhrfelsen ist einstweilen nur vorläufig bestimmt. Im Zuge der Feldübungen in den Jahren 1978 und 1979 wurden einfache Nivellements, ohne Messung des Rückweges, ausgehend von den Höhenfestpunkten der Dollfußkapelle, zu den einzelnen Punkten geführt. Die Messung zum Pfeiler Wandeck erfolgte mit dem MOM-Ni-A3 und Präzisionsnivellierlatten. Statt wie üblich pro Standpunkt vier mal den Höhenunterschied zu bestimmen, wurde er hier aus Zeitgründen nur zwei mal gemessen.

Dieselbe Methodik wurde auch beim ca. 7 km langen Nivellement zum Pfeiler Hubertus Haus angewendet. Hier nivellierten zwei Meßpartien von den Endpunkten der Nivellementlinie aus gegeneinander.

Der Punkt Sonnenuhrfelsen wurde mittels doppelten Präzisionsnivelements bestimmt, wobei zwei Nivellierpartien mit den Geräten MOM-Ni-A3 und KONI 007, sowie Invarbandlatten hintereinander beobachteten.

Vorläufige Höhen der Punkte:

Pfeiler Hubertus Haus:	925,835 m	\pm 6,7 mm
Pfeiler Wandeck	: 839,987 m	\pm 6,1 mm
Sonnenuhrfelsen	: 867,822 m	\pm 6,0 mm

Der oben angegebene mittlere Fehler setzt sich aus dem aus der Fehlergrenze des Nivellements I. Ordnung abgeleiteten mittleren Höhenfehler des Höhenfestpunktes und dem aus dem Kilometerfehler errechneten mittleren Fehler der gemessenen Nivellementlinie zusammen. Wobei die Höhenfestpunkte im Becken der Neuen Welt, von denen die Höhen der Basis abgeleitet wurden, als fehlerfrei angenommen wurden.

Eine Überprüfung der Höhe des Punktes Hubertus Haus mittels trigonometrischen Nivellements vom Basisanfang aus brachte eine sehr gute Übereinstimmung ($\Delta = 4$ cm).

VII. RICHTUNGS- UND STRECKENMESSUNG

Die Beobachtung der Richtungen und Strecken im Testnetz erfolgte in den Jahren 1977, 1978 und 1979. In jedem dieser Jahre wurde das Netz komplett durchgemessen.

Aus der beiliegenden Netzskizze sind die beobachteten Richtungen und Strecken zu ersehen. Im Jahre 1979 wurden die KT Größenberg, Bühel und Kienberg in das Beobachtungsprogramm miteinbezogen um eine Transformation des Testnetzes in das Landessystem zu ermöglichen. Pro Standpunkt wurden im allgemeinen 6 Richtungssätze gemessen. Wobei ein mittlerer Fehler einer gemittelten Richtung von $\pm 2^{\text{CC}}$ erzielt wurde. Gemessen wurde mit Sekundentheodoliten der Firmen KERN, WILD und ZEISS. Signalisiert wurden die Ziele mit auf normale WILD Zieltafeln aufsteckbaren großen Signaltafeln.

Die Strecken wurden mit dem Lasergeodimeter AGA8 und dem WILD Distomat Di60 gemessen. Vor jeder Messungsperiode wurde das Geodimeter und der Di60 auf der Basis geeicht, d.h., es wurde die Additionskonstante jedes Jahr neu bestimmt. Von einer Bestimmung der Multiplikationskonstanten wurde abgesehen, da die Strecken im Netz ungefähr alle gleich lang wie die Basis sind, außerdem relativ kurz sind und die Frequenzabnahme beim AGA8 nicht ganz einfach zu bewerkstelligen ist. Die für die Reduzierung der gemessenen Distanzen notwendigen meteorologischen Daten wurden wie gewöhnlich an den Endpunkten der Strecken gemessen. Fallweise wurde versucht, das meteorologische Profil durch Sondenmessungen in der Mitte der Strecken zu erfassen. Für die relativ kurzen Strecken ergab sich dadurch aber keine signifikante Verbesserung.

Zu Übungszwecken und zur Reduktion der gemessenen Strecken auf die Horizontale wurden auch alljährlich die gegenseitigen Zenitdistanzen gleichzeitig gemessen.

VIII. NETZBERECHNUNG

Der Ausgleich des Netzes erfolgte mittels des äußerst flexiblen Programmes "Netz 3D" von ELMIGER auf der CDC-CYBER 74 der TU-Wien.

Die Berechnungen wurden ab 1977 alljährlich durchgeführt, wobei der Ausgleich immer mehrfach, d.h., in verschiedenen Variationen, gerechnet wurde. Im wesentlichen wurde der Lageausgleich nach vermittelnden Beobachtungen einmal mit den aktuellen Jahresbeobachtungsdaten und ein zweites Mal mit dem ganzen vorhandenen Datenmaterial durchgerechnet.

Die Berechnung erfolgte in einem lokalen System, in welchem Basisanfang und Basisende als Festpunkte betrachtet wurden. Die Basislänge, als maßstabsbestimmender Faktor des Netzes, blieb somit vom Ausgleich unberührt. Die positive y-Achse verläuft in der Basisrichtung.

Die Genauigkeitsverhältnisse der Beobachtungen wurden wie folgt in den Ausgleich eingeführt: Für die einzelnen Strecken wurden die von den Herstellern angegebenen, geläufigen Fehlerformeln herangezogen

$$(AGAB \pm (6 \text{ mm} + 1.10^{-6}D)); \text{ Di60 } \pm (10 \text{ mm} + 3.10^{-6}D));$$

für die Richtungen je Standpunkt die aus der Messung empirisch berechneten Standardabweichungen.

Der mit den Beobachtungsdaten von 3 Jahren (1977 - 1979) durchgeführte Lageausgleich ergab folgendes Resultat:

Lokale Koord. d. Pkte		y	x
Basisanfang (BA)		5000,00	5000,00
Basisende (BE)		8191,87	5000,00
Zwischenpunkt 4 (ZP4)		6487,97	5000,00
Hubertus Haus (HU)		3059,31	7964,46
Sonnenuhrfelsen (SO)		5469,70	7959,01
Wandeck (WE)		8595,29	7507,97

Die in nachstehender Abbildung dargestellten Fehlerellipsen geben Aufschluß über die erreichte Punktlagegenauigkeit.

FEHLERELLIPSEN AUS DEM LAGEAUSGLEICH 1979

$M_{\text{Loge}} \quad 1:25000$

$M_{\text{Eil.}} \quad 1:1$

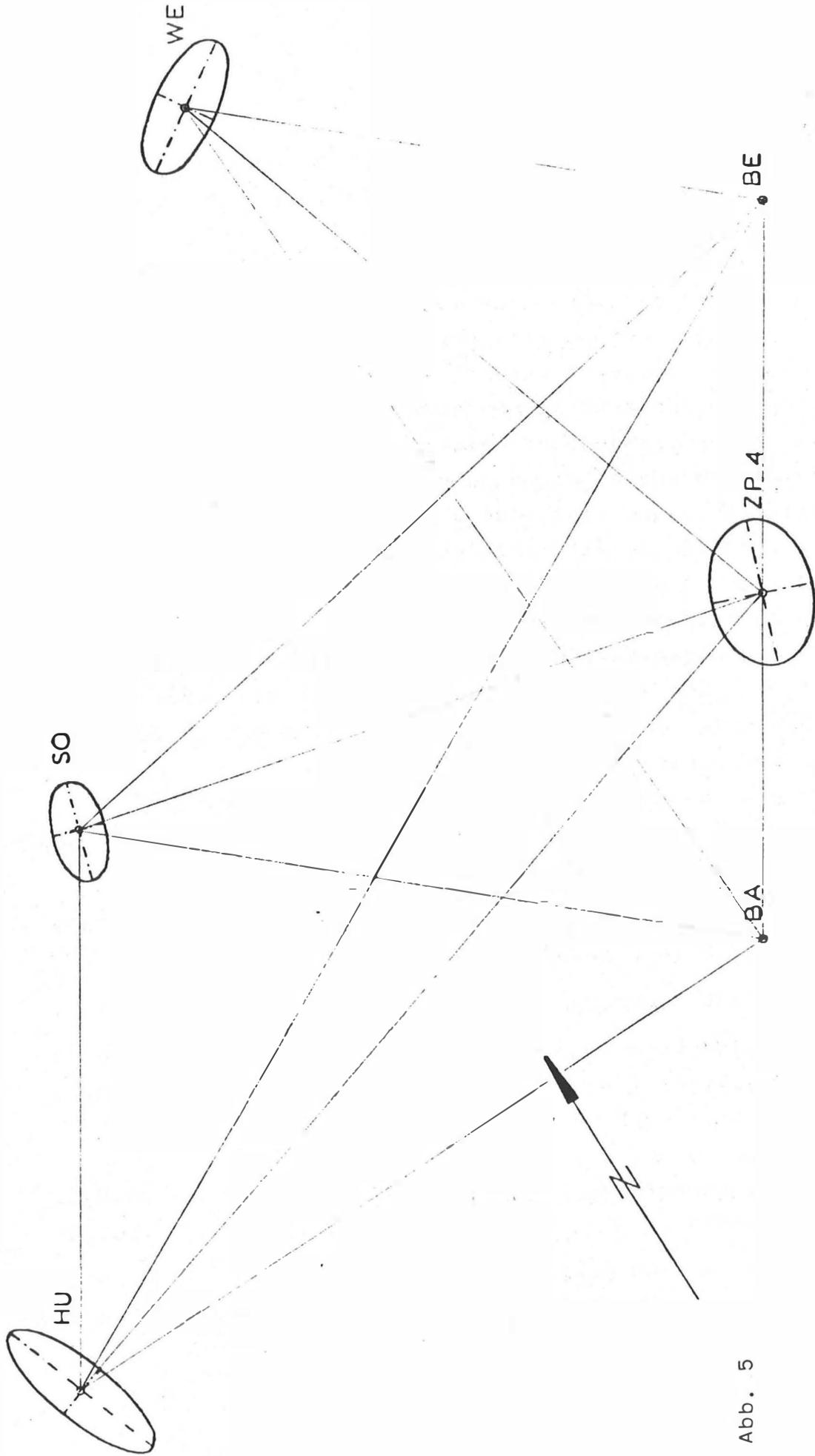
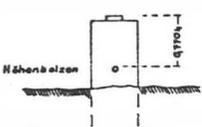
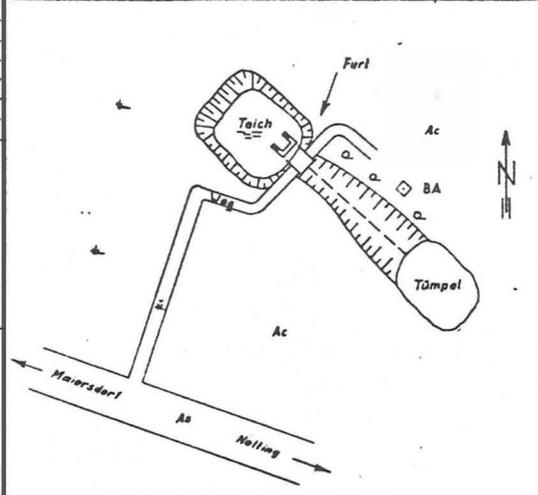
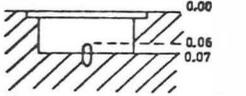
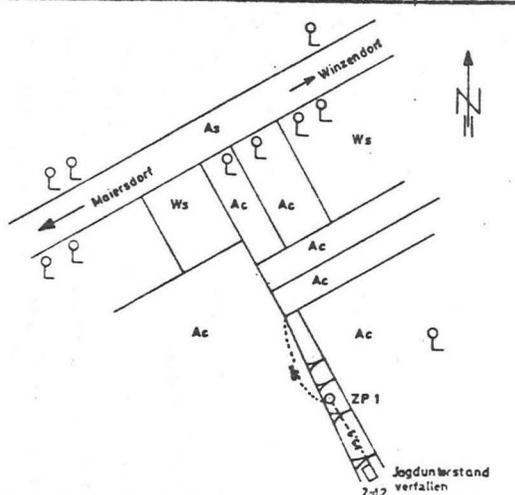


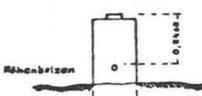
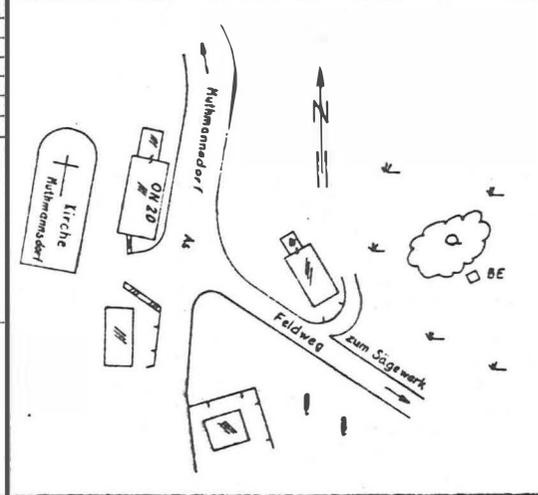
Abb. 5

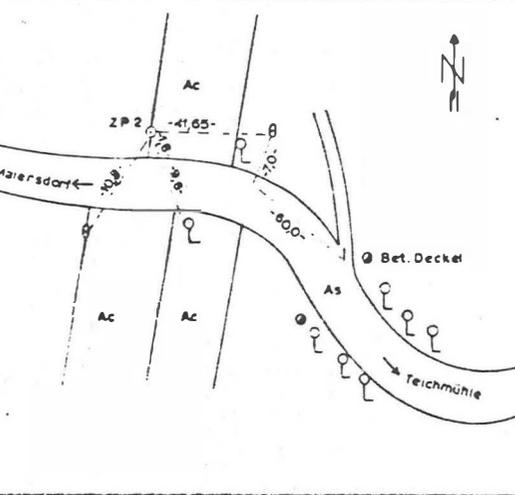
Wie schon vorhin erwähnt, wurden im Jahre 1979 die Koordinaten der KT Größenberg, Kienberg und Bühel zum Zwecke der Transformation des Testnetzes in das Landessystem im lokalen System bestimmt. Mit Hilfe einer überbestimmten HELMERT-Transformation wurden die Punkte des Netzes nun in das Landessystem übertragen. Da die Transformation sehr schwach überbestimmt ist, mit den Beobachtungsdaten nur eines Jahres gerechnet wurde und die Koordinaten der 3 Stützpunkte leichte Spannungen aufweisen, sind die Koordinaten der Netzpunkte im Landessystem nur als vorläufig zu betrachten.

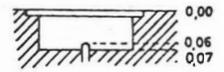
Vorl.Landeskoordinaten d.Punkte		y	x
Basisanfang	(BA)	- 19 197,44	5 296 895,07
Basisende	(BE)	- 17 231,53	299 409,70
Zwischenpunkt 4	(ZP4)	- 18 280,98	298 067,33
Hubertus Haus	(HU)	- 22 728,18	297 191,97
Sonnenuhrfeisen	(SO)	- 21 239,34	299 087,57
Wandeck	(WE)	- 18 958,83	301 272,23

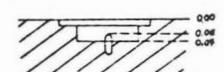
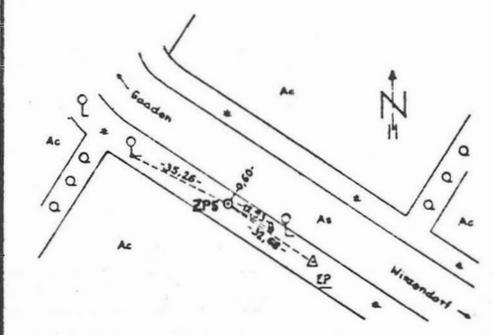
Punktnummer BA	Punktbezeichnung Basisanfang	Stabilisierg.	Koordinaten		System	Höhe u. Adria
			y	x		
Operate: Neue Welt						
Land: Niederösterreich						
Pol. Bezirk: Wr. Neustadt						
Verm. Bezirk: Wr. Neustadt						
Pol. Gemeinde: Hone Wand						
Kat. Gemeinde: Netting						
Grundst. Nr.: 19						
Besitzer: Gem. Maierdorf						
Letzte Begehung: Oktober 1977						
Mappenblatt Nr.: 75						
Stabilisierung: Pfeiler mit Platte						
						
						
<p>Zufahrt: Nach dem Ortsende von Netting ca 280 m in Richtung Maierdorf, rechts den Feldweg hinunter, über eine Furt und dann neunmal nach rechts 124 Schritte.</p>						

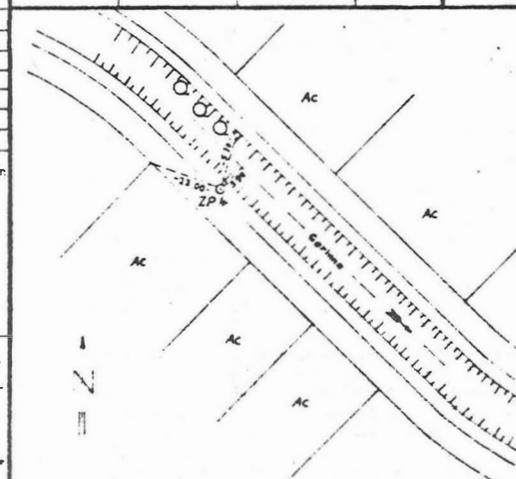
Punktnummer ZP1	Punktbezeichnung Zwischenpunkt 1	Stabilisierg.	Koordinaten		System	Höhe u. Adria
			y	x		
Operate: Neue Welt						
Land: Niederösterreich						
Pol. Bezirk: Wiener Neustadt						
Verm. Bezirk: Wiener Neustadt						
Pol. Gemeinde: Hone Wand						
Kat. Gemeinde: Netting						
Grundst. Nr.: 148						
Besitzer: Franz u. Auguste Bauer						
Letzte Begehung: Okt 77						
Mappenblatt Nr.: 75						
Stabilisierung: Messingbolzen im Betonschacht mit Eisendeckel						
						
						
<p>Zufahrt: Auf der Straße von Maierdorf zur Teichmühle auf der Höhe von Netting am Ende der größten Baumücke nach rechts, einen Ackerrain 250 Schritte entlang, bei einer kleinen Böschung Richtung verfallener Jagdunterstand.</p>						

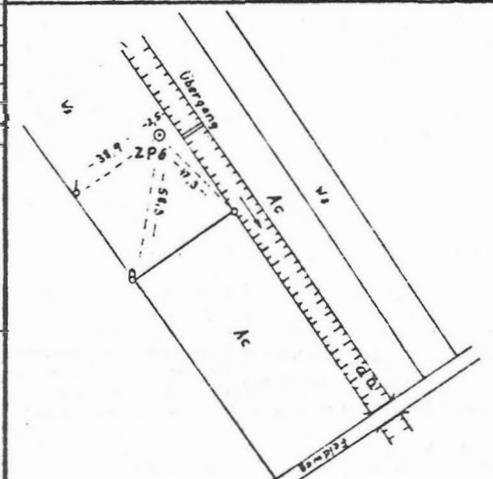
Punktnummer BE	Punktbezeichnung Basisende	Stabilisierg.	Koordinaten		System	Höhe u. Adria
			y	x		
Operate: Neue Welt						
Land: Niederösterreich						
Pol. Bezirk: Wr. Neustadt						
Verm. Bezirk: Wr. Neustadt						
Pol. Gemeinde: Winzendorf-Muthmannsdorf						
Kat. Gemeinde: Muthmannsdorf						
Grundst. Nr.: 1793						
Besitzer: Wilhelm und Anna Pirmbauer						
Letzte Begehung: Okt 77						
Mappenblatt Nr.: 76						
Stabilisierung: Pfeiler mit Platte						
						
						
<p>Zufahrt: Von der Kirche Muthmannsdorf ca 250 m auf dem Feldweg in Richtung Emmerberg, 31 Schritte links in der Wiese vor dem Gebüsch.</p>						

Punktnummer ZP2	Punktbezeichnung Zwischenpunkt 2	Stabilisierg.	Koordinaten		System	Höhe u. Adria
			y	x		
Operate: Neue Welt						
Land: Niederösterreich						
Pol. Bezirk: Wiener Neustadt						
Verm. Bezirk: Wiener Neustadt						
Pol. Gemeinde: Winzendorf, Muthmannsdorf						
Kat. Gemeinde: Emmerberg						
Grundst. Nr.: 65/1						
Besitzer: Straßenmeisterei II						
Letzte Begehung: Okt. 77						
Mappenblatt Nr.: 75						
Stabilisierung: Messingbolzen im Betonschacht mit Eisendeckel						
						
						
<p>Zufahrt: Auf der Straße von Maierdorf zur Teichmühle am Anfang einer S-Kurve und etwa 100 m vor einer Feldwegzufahrt</p>						

Punktnummer ZP 3	Punktbezeichnung Zwischenpunkt 3	Stabilisierg.	Koordinaten		System	Höhe ü. Adria
			y	x		
Operate: Neue Welt						
Land: Niederösterreich						
Pol. Bezirk: Wiener Neustadt						
Verm. Bezirk: Wiener Neustadt						
Pol. Gemeinde: Hohe Wand						
Kat. Gemeinde: Maiersdorf						
Grundst. Nr.: 1504/1						
Besitzer: Johann Reiter						
Letzte Begehung: Okt. 77						
Moppenblatt Nr.: 76						
Stabilisierung: Messingbolzen in betoniertem Schacht mit Eisendeckel						
						
						
<p>Zufahrt: In der S.-Kurve der von Maiersdorf zur Teichmühle führenden Straße kurz vor den Betondeckeln links auf einem Feldweg etwa 160 m hinein.</p>						

Punktnummer ZP5	Punktbezeichnung Zwischenpunkt 5	Stabilisierg.	Koordinaten		System	Höhe ü. Adria
			y	x		
Operate: Neue Welt						
Land: Niederösterreich						
Pol. Bezirk: Wiener Neustadt						
Verm. Bezirk: Wiener Neustadt						
Pol. Gemeinde: Winzendorf, Muthmannsdorf						
Kat. Gemeinde: Muthmannsdorf						
Grundst. Nr.: 1623						
Besitzer: Johann u. Hermine Aschenbrenner						
Letzte Begehung: Okt. 1977						
Moppenblatt Nr.: 76						
Stabilisierung: Messingbolzen in betoniertem Schacht mit Eisendeckel						
						
						
<p>Zufahrt: Auf der Straße von Gaden nach Winzendorf, nach der ersten, rechts gelegenen Buschreihe etwa 50 m.</p>						

Punktnummer ZP 4	Punktbezeichnung Zwischenpunkt 4	Stabilisierg.	Koordinaten		System	Höhe ü. Adria
			y	x		
Operate: Neue Welt						
Land: Niederösterreich						
Pol. Bezirk: Wiener Neustadt						
Verm. Bezirk: Wiener Neustadt						
Pol. Gemeinde: Hohe Wand						
Kat. Gemeinde: Stollhof						
Grundst. Nr.: 12/1						
Besitzer: Kurt u. Irmgard Gosch						
Letzte Begehung: Okt. 77						
Moppenblatt Nr.: 76						
Stabilisierung: Messingbolzen in betoniertem Schacht mit Eisendeckel						
						
						
<p>Zufahrt: Von der Abzweigung zur Teichmühle auf der Straße von Winzendorf kommend etwa 320 m Richtung Muthmannsdorf, Feldweg links Richtung Stollhof. Nach 70 m über eine Brücke dem Graben entlang etwa 600 m.</p>						

Punktnummer ZP6	Punktbezeichnung Zwischenpunkt 6	Stabilisierg.	Koordinaten		System	Höhe ü. Adria
			y	x		
Operate: Neue Welt						
Land: Niederösterreich						
Pol. Bezirk: Wiener Neustadt						
Verm. Bezirk: Wiener Neustadt						
Pol. Gemeinde: Winzendorf, Muthmannsdorf						
Kat. Gemeinde: Muthmannsdorf						
Grundst. Nr.: 1620						
Besitzer: Johann u. Hermine Aschenbrenner						
Letzte Begehung: Okt. 77						
Moppenblatt Nr.: 76						
Stabilisierung: Messingbolzen in betoniertem Schacht mit Eisendeckel						
						
						
<p>Zufahrt: Auf der Straße von Winzendorf nach Muthmannsdorf 750 m nach der Abzweigung nach Gaden auf einem Feldweg nach links. Nach weiteren 20 m wieder nach links bis zu einer Brücke. Von hier etwa 200 m den Graben entlang.</p>						

Punktnummer HU	Punktbezeichnung Hubertushaus	Stabilisierung	Koordinaten		System	Höhe U. Adria
			y	x		
Operate: Neue Welt						
Land: Niederösterreich						
Pol. Bezirk: Wr. Neustadt						
Verm. Bezirk: Wr. Neustadt						
Pol. Gemeinde: Hohe Wand						
Kat. Gemeinde: Maiersdorf						
Grundst. Nr.: 244						
Besitzer: Johann u. Theresia Steiner						
Letzte Begehung: Oktober 1977						
Mappenblatt Nr.: 75						
Stabilisierung: Pfeiler mit Platte						
<p>Zufahrt: Auf der Mautstrasse Hohe Wand bis Wr. Neustädter Haus, auf dem, östlich vom großen Parkplatz gelegenen Fahrweg durch den Leitergraben bis zum Schranken und zu Fuß bis zum Pfeiler.</p>						
<p>r.M. = rote Markierung</p>						

Punktnummer WE	Punktbezeichnung Wandeck	Stabilisierung	Koordinaten		System	Höhe U. Adria
			y	x		
Operate: Neue Welt						
Land: Niederösterreich						
Pol. Bezirk: Wr. Neustadt						
Verm. Bezirk: Wr. Neustadt						
Pol. Gemeinde: Hohe Wand						
Kat. Gemeinde: Stalhof						
Grundst. Nr.: 972						
Besitzer: Fa. Ideal-Standard Ges.m.b.H. Wr. Neustadt						
Letzte Begehung: Okt. 77						
Mappenblatt Nr.: 75						
Stabilisierung: Pfeiler mit Platte						
<p>Zufahrt: Vom Herrgottschnitzerhaus am Fußweg entlang, vorbei am Erholungsheim und nach dem anschließenden Wochenendhaus links, entlang des Zaunes bis 3m vor den Wandabbruch.</p>						

Punktnummer SO	Punktbezeichnung Sonnenuhrfels	Stabilisierung	Koordinaten		System	Höhe U. Adria
			y	x		
Operate: Neue Welt						
Land: Niederösterreich						
Pol. Bezirk: Wr. Neustadt						
Verm. Bezirk: Wr. Neustadt						
Pol. Gemeinde: Hohe Wand						
Kat. Gemeinde: Maiersdorf						
Grundst. Nr.: 141						
Besitzer: Wald- u. Weidengenossenschaft Maierdorf						
Letzte Begehung: Oktober 1977						
Mappenblatt Nr.: 75						
Stabilisierung: Messingbolzen in Betonschacht mit Eisendeckel						
<p>Zufahrt: Auf der Hohen-Wandstraße, Abzweigung zum Gasthof Postl bis zu einem, auf der rechten Straßenseite gelegenen Haus mit Doppelgarage, zu Fuß bis zur Felsnase vor.</p>						

Punktnummer	Punktbezeichnung	Stabilisierung	Koordinaten		System	Höhe U. Adria
			y	x		
Operate:						
Land:						
Pol. Bezirk:						
Verm. Bezirk:						
Pol. Gemeinde:						
Kat. Gemeinde:						
Grundst. Nr.:						
Besitzer:						
Letzte Begehung:						
Mappenblatt Nr.:						
Stabilisierung:						
Zufahrt:						

Geowiss. Mitt. 15
1979, 193 - 204

ERFAHRUNGEN MIT DER AUTOMATISCHEN
PRÄZISIONSZEICHENANLAGE CONTRAVES 1700

von

J. FÜRST

Johannes Fürst, tätig als EDV-Fachmann am
Institut für Landesvermessung der Technischen Univ. Wien
1040, Gußhausstraße 27 - 29

ERFAHRUNGEN MIT DER AUTOMATISCHEN PRÄZISIONSZEICHENANLAGE
CONTRAVES 1700

Seit dem Jahre 1976 ist an der Technischen Universität Wien die Präzisionszeichenanlage Contraves Coragraph DC 2 in Verwendung und es sollen hier die Möglichkeiten eines solchen Gerätes für die graphische Datenausgabe erläutert werden.

Die nachstehend beschriebene Anlage wurde vom Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung den geodätischen Instituten zur Verfügung gestellt (Projekt "Digitale Kartierung") und kann, insbesondere für Arbeiten, welche hohe Genauigkeitsanforderungen stellen, auch von anderen Benützern verwendet werden.

Der Unterschied zu den häufiger vertretenen und damit bekannteren einfacheren Zeichenmaschinen (sogenannten "Plottern") besteht im wesentlichen darin, daß bei der Contraves-Anlage eine wesentlich genauere - und damit vom Aufbau her - massivere Zeichenmaschine verwendet wird und daß diese bezüglich der einsetzbaren Zeichenwerkzeuge wesentlich mehr Möglichkeiten bietet. Die Steuerung der Zeichenanlage erfolgt durch einen Prozeßrechner, der selbstverständlich auch für andere Aufgaben nutzbar ist, wie z.B. Programmentwicklungen, Berechnungen usw.

Die an der Technischen Universität Wien installierte Anlage besteht aus folgenden Einzelgeräten:

a) Präzisionskoordinatograph 1700

Dieses eigentliche graphische Ausgabegerät in Tischform hat eine maximale Arbeitsfläche von 1,13 mal 1,70 m und ist für folgende Betriebsarten ausgestattet:

- Zeichnen mit Tusche, Kugelschreiber, Bleistift (maximal fünf Federn gleichzeitig benützbar)
- Gravieren auf Gravurfolie mit einem Stichel, der durch einen zusätzlichen Motor immer nach der jeweiligen Zeichenrichtung ausgerichtet wird,

- Schneiden von Stripfolien mit einem tangential gesteuerten Schneidmesser (Anwendung vor allem zur Herstellung elektronischer Schaltkreise).

Die auf dem Tisch zu montierenden Materialien werden durch Unterdruck (Luftansaugung über kleine Löcher in der Tischplatte) festgehalten. Der äußerst massive Arm ist in der x-Richtung (= Längsrichtung des Tisches) beweglich und trägt den Werkzeugschlitten, der die Bewegung in der y-Richtung (Querrichtung zum Tisch) ausführt. Die Bewegung des Armes erfolgt durch zwei Servomotoren. Der Tisch wird daher nicht durch Impulse (digital) sondern analog gesteuert, wobei vom Rechner an das Tischinterface digital die Werte für Geschwindigkeit und Beschleunigung für jeden der beiden Motoren übergeben werden. Der Tisch selbst enthält Zähler für die jeweiligen Koordinatenwerte des Schlittens, welche an den Rechner zurückgemeldet werden. Dadurch bietet die Anlage einen gewissen, im praktischen Betrieb nicht zu unterschätzenden Bedienungskomfort: Man kann bei einer Unterbrechung der Zeichnung den Schlitten "wegstellen" und den Blick auf den Zeichenträger ermöglichen, denn der Rechner kann bei Wiederaufnahme der Zeichnung seine ursprüngliche Position wieder finden. Außerdem werden durch dieses Konstruktionsprinzip Digitalisierungen möglich, wenn auch mit geringem Datenumfang, aber dafür mittels Episkop in großer Genauigkeit. Die Rechtwinkeligkeit des Tisches ist einstellbar (auch durch einen geübten Operator) und es können die vom Hersteller angegebenen Genauigkeiten bei sorgfältiger Justierung durchaus erreicht werden:

Auflösung der Eingabe (und Digitalisierung) 0,01 mm,
Wiederholgenauigkeit eines Punktes $\pm 0,02$ mm.

Das Bedienungsfeld des Tisches ist sehr gut ausgestattet und läßt beim Betrieb keine Wünsche offen. Sein Nachteil besteht allerdings in einer etwas zu geringen Übersichtlichkeit, Tastenverwechslungen sind durchaus möglich und passieren dann meist im unangenehmsten Augenblick. Die maximale Geschwindigkeit des Tisches beträgt 30 cm/sec, die maximale Beschleunigung jedoch nur 60 cm/sec².

b) Steuerrechner CORA II B:

Dieser Rechner mit Bedienungspult und Konsolschreibmaschine (IBM) bildet die Kommandozentrale der gesamten Anlage, ja er ist wegen der geschilderten Funktionsweise des Koordinatographen zum Betrieb der Zeichenanlage unbedingt nötig (im Gegensatz zu "normalen" Plottern, welche für einen offline Betrieb ohne Rechner ausrüstbar sind). Der CORA II B-Rechner hat eine Wortlänge von 24 Bit und ist in unserer Version mit einer Speicherkapazität von 20 k Worten ausgestattet. Der verwendete Befehlsvorrat besteht aus Einadressbefehlen, deren Adressteil jedoch nur 12 Bit lang ist. Demnach können im CORA-Rechner nur 4 k Worte durchgehend adressiert werden. Man spricht daher bei der Programmierung von sogenannten "Pages" und hat immer zu berücksichtigen, daß die Wirkung der einzelnen Befehle von den Page-Registern abhängt. In der Praxis ist der Rechner so organisiert, daß in der Page 0 (auch Basispage) das Betriebssystem (BACOS) untergebracht ist und das Anwendungsprogramm in Page 1. Die einzelnen Module eines größeren Anwendungsprogramms werden dann bei Bedarf aus dem weiteren Pages in diese überlagert ("Memory"-Overlay-Technik, da innerhalb des Hauptspeichers überlagert wird). Diese etwas exotische Rechnerstruktur betrifft selbstverständlich den durchschnittlichen Anwender nicht. Hat man sich jedoch mit technischen Fehlern (Testprogramme) oder mit dem Anschluß fremder Peripheriegeräte zu beschäftigen, merkt man bald, daß die Programmierung dieses Rechners recht zeitaufwendig sein kann. Überdurchschnittlich "sensibel" scheint der - sonst sehr robuste - Rechner gegen Spannungsspitzen zu sein, welche von Geräten stammen, die gemeinsam mit ihm an einer Stromversorgung hängen. So konnte ich einmal als Verursacher eines immer wieder auftretenden Systemzusammenbruches einen Lochstreifenaufwickler identifizieren, dessen Motor den Rechner so stören konnte, daß ein normaler Betrieb nicht möglich war.

c) Ein Magnetbandgerät mit Vakuum-Bandausgleich (9-Spur, 800 bpi) für Ein- und Ausgabe.

- d) Ein Magnetplattenlaufwerk (Kassetten) mit 12 Millionen Bit Speicherkapazität
- e) Ein Lochstreifenlaser
- f) Später wurde zusätzlich noch ein alphanumerisches Bildschirmterminal angeschafft, zusammen mit einem passenden V 24-Interface am Rechner.

Über dieses Interface kann auch eine Datenkommunikation mit dem Rechnersystem des Prozeßrechenzentrums der TU-Wien stattfinden (Übertragung von Dateien in beiden Richtungen).

Das Betriebssystem BACOS ermöglicht die Ausführung aller notwendigen Bedienungsfunktionen und ist für den Benutzer über eine Commandinterpreter-Schnittstelle (Eingabe der Befehle über Konsole) zugänglich. Direkte Aufrufe des Betriebssystems aus Programmen sind nur für den Assembler-Programmierer möglich.

BACOS ist magnetplattenorientiert und unterstützt eine einfache sequentielle Fileorganisation. Zusätzliche Software für erweiterte Filemanipulation ist erhältlich.

Die Command-Eingabe kann von der Konsolschreibmaschine auf andere Peripheriegeräte umgeschaltet werden. Debugging und Tracemöglichkeiten für die Programmentwicklung sind vorhanden, ebenso wie einfache Utility-Programme.

Speziell auf einer Entwicklungsanlage wäre die Multiprogrammingversion des Betriebssystems, die jedoch auf der TU Wien nicht installiert ist, von großem Vorteil, da die Wartezeiten während einer Zeichnung auf diese Weise besser genutzt werden könnten, z.B. für die Durchführung von Programmtests.

Als echte Mehrbenutzeranlage dürfte diese jedoch nicht geeignet sein, da der Rechner dafür zu langsam ist. Als Programmierhilfen stehen ein Makro-Assembler (MACCAS) sowie ein FORTRAN-Compiler zur Verfügung, wobei der letztere die Page-Organisation des Hauptspeichers nur teilweise unterstützt, was die Verwendung von langen Programmen oder von Programmen mit großen Datenfeldern erschwert.

Eine große Hilfe für die Benützung der Zeichenanlage ist das Steuerungsprogramm für den Zeichentisch, das AZP (allgemeines

Zeichenprogramm). Dieses Programm hat ein sehr hohes Niveau und unterscheidet sich von entsprechenden Programmen bei anderen Zeichenmaschinen durch die folgenden Merkmale am deutlichsten:

Das AZP ist kein Subroutinenpaket, welches nur von einem Programmierer angesprochen werden kann, sondern es ist ein selbständiges Programm, welches Datensätze verarbeitet. Diese Datensätze sind frei formatiert und in klar verständlicher Mnemonik aufgebaut. Die Verarbeitung dieser Datensätze kann von jedem Peripheriegerät inklusive - und mit besonderem Vorteil für den Operator - der Konsolschreibmaschine in gleicher Weise verarbeitet werden. Dadurch ist z.B. eine direkte Eingabe von Fahrbefehlen für den Zeichentisch möglich. Das AZP verwaltet außerdem die Zeichenwerkzeuge selbständig. Dies wiederum ist die Voraussetzung dafür, daß graphische Elemente als Einheit der Eingabe klar gegliedert auftreten können. Diese Eigenschaft ist von großem Vorteil, wenn man Programme schreibt, welche AZP-Datensätze erzeugen und bietet damit eine große Unterstützung für den Programmierer.

Selbstverständlich enthält das AZP auch Möglichkeiten zur Figurendefinition und Möglichkeiten zu einer Abschnittsorganisation der Zeichnung. Ich würde das AZP aber dennoch nicht als eigene Programmiersprache bezeichnen, da es keine Variablen kennt, sondern eben nur konstante Daten, und da keine bedingten Verzweigungen möglich sind.

Allerdings muß gesagt werden, daß der Zugang zur Anlage nach deren Lieferung etwas mühevoll war, da die vom Hersteller mitgelieferten Beschreibungen nicht sehr instruktiv waren. Diese waren zwar in Deutsch verfaßt, aber sie enthielten viele zu Mißverständnissen Anlaß gebende Formulierungen. Insbesondere gab es keine Verweise auf viele Nebeneffekte bei der Verwendung einzelner AZP-Statements.

Daher wurde im Anschluß an die Abnahmetests und sobald die

notwendige Vertrautheit mit der Anlage hergestellt war, ein Bedienungshandbuch für unsere Anlage auf einer gänzlich anderen Basis geschaffen. Dieses Bedienungshandbuch wurde vom Institut für Photogrammetrie (Dipl.Ing. KAGER, Dipl.Ing. ASSMUS) und vom Institut für Landesvermessung (J. FÜRST) in gemeinsamer Arbeit verfaßt und sollte ein schnell zu benutzendes und trotzdem vollständiges Nachschlagwerk für den Praktiker darstellen.

Da die AZP-Statements prinzipiell nach der Logik "Schlüsselwort + Parameterliste" aufgebaut sind und außerdem in gewissen Fällen spezielle Details in der Parameterliste wesentlichen Einfluß auf die Ausführung der Anweisungen haben, wurde die Darstellung der Befehle mittels Syntaxdiagrammen gewählt. Diese sind im vorliegenden Fall maximal übersichtlich, aber trotzdem vollständig und korrekt für die Verarbeitung durch den Programmierer.

Im großen und ganzen erwies sich das AZP als sehr brauchbares Hilfsmittel zum Betrieb der Anlage, da es sehr gut auf die praktischen Bedürfnisse eingeht. So gibt es ausreichende Möglichkeiten zum Ausführen von Transformationen und insgesamt fünf verschiedene Maßstabsfaktoren. Jeder, der einmal die Probleme bei der Darstellung von Plotterzeichnungen in verschiedenen Maßstäben erfahren hat, wird diese Möglichkeiten erst richtig zu schätzen wissen. Andererseits ist mir unverständlich, warum ein Programm, welches so praxisorientiert ist, beim Zeichnen von Hektarmarken die Leerwege nicht optimiert ausführen kann. Das wäre besonders bei dieser nicht sehr schnell arbeitenden Anlage ein vordringliches Problem.

Von großem Vorteil sind die Interpolationsmöglichkeiten: Je nach verwendeter Programmversion zeichnet das AZP Polynom- oder Splineinterpolationskurven durch vorgegebene Punktmengen. Dabei wird die Splineinterpolation wesentlich schneller ausgeführt als die Polynominterpolation. Andererseits stehen in der Programmversion, welche die Splineinterpolation

enthält, nicht alle Befehle des AZP zur Verfügung. Die Ursachen dafür dürften in der geringen Speicherkapazität der Anlage liegen.

Sehr komfortabel sind auch die Möglichkeiten der Ausschnittsbegrenzung, d.h., der Selektion von Zeichnungsteilen. Dieses sicher nicht ganz einfache Problem ist im AZP so gelöst, daß prinzipiell alle geometrischen Elemente (auch Geraden und Kreise) durch Interpolation gezeichnet werden. Die für diese Interpolation hinzugezogenen Stützwerte werden als Beurteilungshilfe verwendet, ob Teile des zu zeichnenden graphischen Elements außerhalb des ausschnittsbegrenzenden, geschlossenen Polygons zu liegen kommen.

Diese Möglichkeit der Ausschnittsbegrenzung bietet eine große Hilfe beim Kartieren kleinerer Punktmengen, da die Reduktion der Koordinatenwerte bzw. die Ausschnittsbegrenzung und Rotation durch das AZP einfach angegeben werden können. Größere Punktmengen lassen sich auf diese Weise nicht durch das AZP verarbeiten, da die Anlage für das Durchsuchen größerer Datenmengen während der Zeichnung doch zu langsam ist. Abgesehen von der langen Zeichenzeit kann es dabei passieren, daß bei Tuschezeichnungen die Feder eintrocknet. Dennoch muß es als großer Vorteil der Anlage vermerkt werden, daß durch einen geschickten Operator eine Vielfalt von Aufgaben ohne eigene Programmierarbeit und ohne aufwendige Vorbereitung erledigt werden kann.

Zum Zweck von Kartierungen mußte auch ein eigenes Interface-Programm für den Philips-Computer geschrieben werden, um eine Ausgabe der Koordinaten auf Lochstreifen von diesem und damit die Übertragung auf die Contraves-Anlage zu ermöglichen. Für die Aufbereitung der Koordinaten für die Kartierung (Blattdefinition, Rahmen, Beschriftung, Transformation, Auswahl) wurde ein FORTRAN-Programm auf der Contraves-Anlage entwickelt, das mit Operator-Anweisungen versehene AZP-Daten ausgibt. Diese werden dann mit dem Zeichenprogramm gezeichnet.

Für die zusätzliche Beschriftung von Zeichnungen im Nachhinein wurde ein Programm verfaßt, welches nach Digitalisierung von Ort und Schriftrichtung die Eingabe eines Textes über die Schreibmaschine und dessen anschließende Einfügung in eine Zeichnung gestattet. Die Datenverbindung von der Philips-Anlage zur Contraves-Anlage brachte auch die Möglichkeit, den Lochkartenleser der Philips-Anlage über diesen Umweg für die Contraves-Anlage zu benützen, da die Eingabe von Programmen auf der Konsolschreibmaschine doch sehr mühsam ist.

Wie schon früher erwähnt, ist der Lösung von größeren Aufgaben eine gewisse Grenze durch die beschränkte Speicherkapazität und das Handling des Rechners gesetzt. Durch die gute Verwendbarkeit des AZP ist jedoch eine Unterstützung gegeben, welche den Zugang zur Contraves-Anlage von anderen Rechnern her, welche für die Erstellung aufwendiger Programme besser geeignet sind, sehr erleichtert.

Dies konnte ich aus einem konkreten Anlaß feststellen, als ich das Problem der automatischen Platzierung symbol- oder punktbezogener Beschriftungen zu lösen hatte. Überschreibungen bei der Beschriftung selbst von Kartierungen, welche nur als Arbeitsunterlage dienen, können sehr stören, und bei gewissen "systematischen" Darstellungen (Straßen etc.) können die Beschriftungen so ungünstig liegen, daß sie über weite Teile unleserlich sind. Daher versuchte ich mich an einem entsprechenden Computerprogramm, welches Überschreibungen verhindern sollte. Dieses erstellte ich am Großrechner, da dieser doch wesentlich leichter zugänglich ist und Sortierprogramme etc. zur Verfügung stehen. Dieses Programm erstellt AZP-Datensätze und diese wiederum werden über Magnetband an die Contraves-Anlage übergeben. Das Testen der Programme machte einen Vorteil des AZP selbst deutlich: Es ist als gut lesbarer Zwischencode sehr geeignet, die Richtigkeit von solchen Programmen zu beurteilen, ohne daß die Zeichnung nach jeder Programmänderung auszuführen ist. Außerdem kann man sich durch die Verwendung des AZP einen beachtlichen Teil der Programmierarbeit sparen, da die AZP-Statements selbst sehr leistungsfähig sind.

Bei diesem Programm legte ich großen Wert auf Maschinenunabhängigkeit und geringen Speicherbedarf, um eine Verwendung auf kleineren Rechnern möglich zu machen. Besonders vermeiden wollte ich eine Lösungsmethode über Rastermatrizen, welche den Belegungszustand der Zeichenfläche darstellen. Denn bei dieser Methode liegt eine bitweise Darstellung des Rasters auf der Hand, welche wiederum von vielen Programmiersprachen nicht unterstützt wird und zu Maschinenabhängigkeiten führt. Ich ging daher von dem Gedanken aus, daß bei der Abarbeitung der Symbole in der Reihenfolge sortierter Koordinatenwerte nur ein relativ schmaler Streifen im Speicher gehalten werden muß (abhängig im wesentlichen von der maximalen Länge der auftretenden Beschriftungen) und daß ein endlicher Katalog von zu beschriftenden Symbolen vorliegt; ebenso kommen für die Platzierung der Beschriftung nur eine endliche Anzahl von leicht zu beschreibenden Lagen der Beschriftung relativ zu dem zu beschriftenden Symbol in Frage, da sonst entweder der augenfällige Zusammenhang zwischen Symbol und Beschriftung verloren ginge oder gegen ein ästhetisches Ordnungsprinzip verstoßen würde. Die Ableitung von überschreibungsfreien Beschriftungen direkt aus den Koordinatenwerten war eigentlich ohne Schwierigkeiten möglich und auch in der Programmierung recht effektiv. Das entstandene FORTRAN-Programm besteht aus sieben Subroutinen mit insgesamt ca. 800 Statements und bewerkstelligt die überschreibungsfreie Beschriftung von 2 500 Symbolen inklusive Ausgabe der AZP-Daten auf Magnetband in 6 CPU-Sekunden (CDC-Cyber 74, Sortierung mittels Systemprogramm nicht einbezogen).

Im Gegensatz zu dem vorangegangenen Beispiel soll nun eine Arbeit beschrieben werden, welche ohneweiters auf der Contraves-Anlage alleine durchgeführt werden kann, da bei der Programmierung eher Formelberechnungen als kompliziertere Algorithmen im Vordergrund stehen und die Programme keine allzu großen Anforderungen an den Rechner stellen. Das an mich herangetragene Problem bestand darin, für die Erzeugung von Verbreitungskarten verschiedene Symbole, deren Lage durch geographische Koordinaten gegeben war, zu kartieren.

Die Kartierung sollte in eine Verkleinerung der Übersichtskarte von Österreich 1 : 500 000 erfolgen.

Die Übersichtskarte 1 : 500 000 ist eine konforme Kegelabbildung mit zwei längentreuen Parallelkreisen. Eine Ableitung ihres Abbildungsgesetzes findet sich in der Österreichischen Zeitschrift für Vermessungswesen, welcher Artikel die Grundlage für die Erstellung des Computerprogrammes bildete. Es war eine Umrechnungsroutine für geographische Koordinaten, entsprechend dem Abbildungsgesetz sowie ein Programm zu erstellen, welches das Netz zeichnen konnte, und das eigentliche Kartierprogramm. Das Netz konnte vorteilhafterweise durch Aufruf der Umrechnungsroutine mit den Gitterwerten erzeugt werden, da dem AZP nur die Gitterpunkte übergeben werden; die Netzlinien selbst wurden durch Interpolation vom AZP erzeugt. Mit der Kartierung selbst werden Paßmarken erzeugt, damit das Netz auch mit späteren Nachkartierungen zur Deckung gebracht werden kann. Wie dieses Beispiel zeigt, ist die Contraves-Anlage auch bestens geeignet, Spezialprobleme zu lösen, mußten doch für die Original-Übersichtskarte selbst im Jahr 1968 die Berechnungen noch logarithmisch bzw. mit einer Sprossenradmaschine durchgeführt werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden:

Die Genauigkeit der Anlage entspricht den Firmenangaben und ihre Universalität im Hinblick auf die verschiedenen Zeichenwerkzeuge ist hervorzuheben, ebenso wie die mitgelieferte Software. Als Nachteil muß in jedem Fall die geringe Geschwindigkeit infolge der großen bewegten Massen und die veraltete Technologie des Steuerrechners gesehen werden. Die besondere Stärke der Anlage liegt trotzdem darin, daß mit dem eingebauten Rechner eine für viele Probleme ausreichende und vom Anwender nutzbare Rechnerkapazität zur Verfügung steht und daß komplexe Probleme an der Zeichenanlage selbst gelöst werden können. Besonders hervorzuheben ist auch die gute technische Ausführungsqualität der mit der Anlage hergestellten Zeichnungen und Gravuren.

Geowiss. Mitt. 15
1979, 205 - 220

LASER ALS ZIELHILFE IN DER LANDESVERMESSUNG

von

E. KORSCHINECK
und R. BRUCKMÜLLER

Dipl.Ing. Erich Korschineck, Wiss. Oberrat und
Dipl.Ing. Reinhard Bruckmüller, Universitätsassistent am
Institut für Landesvermessung der Technischen Univ. Wien
1040, Gußhausstraße 27 - 29

EINLEITUNG

Jeder, der einmal Richtungsbeobachtungen über größere Distanzen durchgeführt hat, weiß über die Problematik der Zielsprache Bescheid. Wenn das Ziel, vom Beobachter aus gesehen, am Horizont situiert ist, gibt es sowohl bei der Auffindung als auch bei der Beobachtung des Punktes selten Schwierigkeiten. Häufig tritt jedoch der Fall auf, daß sich das Ziel gegen den Himmel nicht abhebt, d.h., der signalisierte Punkt z.B. an einer Bergflanke im Schatten liegt oder ein auf einem Bergrücken signalisierter Punkt wegen der dahinter liegenden höheren Bergketten gegen den Hintergrund nicht erkennbar ist.

Genau mit dieser Situation wurden wir bei den Richtungsbeobachtungen im Jahre 1975 im Erdkrustenbewegungsnetz "Periadriatische Naht" (ein Detailprojekt des Internationalen Geodynamik Projekts) konfrontiert. Die Signalisierung mit Handscheinwerfern und Rundumleuchten brachte nicht den gewünschten Erfolg. Da die Beobachtungen stets unter großem Zeitdruck durchgeführt werden müssen, kamen wir wegen der schlechten Sichtverhältnisse auf die Idee, die schlecht sichtbaren Ziele mit Reflektoren zu besetzen, das Lasergeodimeter AGA 8 exzentrisch beim Theodolit zu postieren und es als Zielbeleuchtung zu gebrauchen.

Da dies ja keine Dauerlösung war, gingen wir daran, die Problematik zu untersuchen. Schon die ersten Versuche zeigten die Vielfalt der auftretenden Probleme und ließen in der Folge nach einem Konzept suchen, mit dem die Lasertechnologie auch auf dem Gebiet der Richtungsmessung vorteilhaft eingesetzt werden könnte. Nach einigen Tests mit im Handel befindlichen Geräten, vor allem der Baubranche, hatte sich nach und nach ein Konzept für die Konstruktion einer Laserzielhilfe herauskristallisiert, so daß in der Folge im Rahmen einer Diplomarbeit von STRENN (1) die Realisierbarkeit sowie die Abschätzung von Auswirkungen auf die Richtungsmessung

untersucht wurden.

Es darf gleich erwähnt werden, daß es uns bis jetzt, vor allem aus finanziellen Gründen, noch nicht möglich war unser Konzept in die Realität umzusetzen, wir möchten es jedoch nicht verabsäumen, an dieser Stelle jenen Herren zu danken, die uns bei der Erstellung desselben unterstützt haben.

Herr Dozent RIEGL vom Institut für Hochfrequenztechnik und Nachrichtentechnik hat uns bei Problemen der Lasertechnologie vorteilhaft beraten, weiters haben uns die Chefkonstrukteure Geodäsie der Firma WILD, Dipl.Ing. SCHWENDENER sowie der Firma KERN, Dr. AESCHLIMANN, Möglichkeiten der Realisierung bzw. Adaptierungsvarianten ihrer Firmen angeboten.

RÜCKBLICK

Bei Richtungsmessungen über große Strecken haben die Beobachter immer schon mit Schwierigkeiten der Zielerfassung zu kämpfen gehabt. GAUSS hat 1820 mit der Konstruktion des ersten Heliotrops eine entscheidende Verbesserung erreicht. Das Prinzip, das Sonnenlicht mit Hilfe eines ebenen Spiegels in die Richtung des Beobachters zu reflektieren, wurde auch später beibehalten, jedoch durch andere ähnliche Konstruktionen ergänzt (BERTRAM, HAAG-STREIT, etc.). Der Vorteil dieser Geräte lag sicher in ihrer Einfachheit und Unkompliziertheit, der Nachteil vor allem in der Abhängigkeit von der Sonne mit ihren Parametern, Lage (Nachführen des Spiegels) und Lichtstärke (abhängig von Tageszeit, Bewölkungsgrad, etc.).

Eine wesentliche Verbesserung der Situation in der Zielerfassung brachte der Einsatz von Scheinwerfern, die Beobachtungen zu allen Tages- und Nachtzeiten ermöglichten, allerdings um den Preis einer gewissen Unhandlichkeit, ist doch stets für eine geeignete Stromzufuhr durch Batterien oder

Generatoren zu sorgen. Die Konstruktionskriterien für Signalscheinwerfer sind demnach optimale Bündelung des Lichts in eine bestimmte Richtung durch Parabolspiegel und Linsen (Kollimatoren) und damit eine hohe Lichtstärke bei geringer Stromaufnahme, - weiters eine hinreichend gute Zentriermöglichkeit sowie akzeptables Gewicht. Einer der neuesten geodätischen Signalscheinwerfer für Triangulationen hoher Genauigkeit ist der TGS 200 von VEB Carl ZEISS, Jena. Der Zentrierfehler beträgt ca. ± 2 mm und der Öffnungswinkel ca. 10', die Stromaufnahme lediglich 5 W bei 6 V.

Die Reichweite dieser Zielhilfe beträgt je nach Tageszeit, atmosphärischen Verhältnissen und Fernrohrvergrößerung des Beobachters das ca. 1,5 bis 4fache der Sichtweite mit unbewaffnetem Auge.

Mit unterschiedlichem Erfolg wurden noch andere Leuchten als Zielhilfe eingesetzt, so vor allem die aus dem Straßenverkehr bekannten Rotationsleuchten sowie Blitzleuchten.

ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN DES LASERS

Nachdem die theoretische Voraussage des Lasers (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) im Jahre 1958 von SCHALOW und TOWNES bereits zwei Jahre später durch MAIMAN praktisch bewiesen wurde, hat die Lasertechnologie erst gegen Ende der 60er Jahre im Vermessungswesen Fuß gefaßt.

Vor allem die elektrooptische Distanzmessung über große Entfernung kämpfte mit dem Problem einer modulierbaren Trägerwelle mit ausreichender Intensität, war doch bis zum Einsatz von Lasern die Glühlampe, später die Quecksilberdampf Lampe die einzige hierfür verwendbare Lichtquelle.

Im bereits erwähnten Lasergeodimeter Modell 8 der Firma AGA wurde nun erstmals in einem geodätischen Instrument ein He Ne Laser mit 5 mW Leistung verwendet. Diesem Gerät folgten noch große Impulslaser, die zur Entfernungsmessung zu Mond und Satelliten dienten und im ingenieurgeodätischen Bereich

vor allem Laserfluchtungsgeräte sowie Laser, die in bestehende geodätische Instrumente wie Nivelliere und Theodolite eingespiegelt werden konnten. Bei den letzteren handelt es sich durchwegs um Gaslaser, während in der Totalstation von HEWLETT PACKARD erstmals eine Laserdiode verwendet wurde.

Welches sind nun die wesentlichen Lasereigenschaften?

Es soll hier bewußt auf die umfangreichen quantentheoretischen Vorstellungen und mathematischen Beziehungen der Lasertechnologie verzichtet werden, jedoch soll die Wirkungsweise des Lasers mit einem Zitat aus PANZER (2) kurz erläutert werden. "Laser sind atomare Verstärker oder Oszillatoren, bei denen es durch die 'induzierte oder erzwungene' Emission gelingt, eine Vielzahl von angeregten Atomen bei der Strahlungsemission zu 'synchronisieren'."

Am Beginn der Laserentwicklung gelang es noch nicht Laser mit kontinuierlicher Strahlung zu erzeugen (vor allem thermische Gründe waren dafür ausschlaggebend), erst als ein oder mehrere Gase, die nicht optisch sondern elektrisch angeregt wurden, als aktive Materialien zur Anwendung kamen, waren die Voraussetzungen für eine Verwertung dieser Technologie auf vielen Anwendungsgebieten gegeben.

Die heute gebräuchlichen Gaslaser bestehen aus einem Glasrohr, das als optischer Resonator dient und an dessen Enden ein plan- und ein sphärischer Hohlspiegel oder zwei konfocale Spiegel angeordnet sind, und dem Hochfrequenzteil, in dem entweder bei einer Gleichspannung von 1 - 3 kV oder durch eine erzeugte Hochfrequenz von 28 - 30 MHz, das Gas zur Lichtemission angeregt wird.

Vorteil dieser Anordnung ist die äußerst geringe Strahldivergenz bei einer kontinuierlichen Ausgangsleistung von 0,1 bis 100 mW, die noch ohne Kühlung erreicht wird. Halbleiter-Laser weisen neben ihrer Kleinheit die Möglichkeit der direkten Intensitätsmodulation der erzeugten Strahlung auf, haben aber die Nachteile der großen Strahldivergenz ($1^{\circ} - 10^{\circ}$), die sich aus den kleinen Abmessungen ergibt, als

auch die auf Materialunvollkommenheit beruhenden hohen Verluste, die eine aufwendige Wärmeabfuhr notwendig machen.

Die nachstehende Tabelle von PANZER (2) soll einen Überblick über die Emissionseigenschaften der verschiedenen Lasertypen ermöglichen.

Angaben zur Strahlungs-Emission verschiedener Laser-Arten

Strahlungsquelle	Strahlungsdichte	Öffnungswinkel der Strahlung	Impulsleistung	kontinuierliche Leistung	Bereich, in dem die Material abhängigen Wellenlängen liegen (μm)
	$\frac{W}{\text{cm}^2 \cdot \text{sr}}$		(W)	(W)	
Kristall und Glas-Laser Normalbetrieb	$10^6 - 10^8$	$10' - 30'$	$10^3 - 10^5$ (10-0,5 ms)	0,5-5 (300 ^o -70 ^o K)	0,59-2,6 (0,31)
gesteuerter Riesenimpuls	$10^9 - 10^{13}$	$10' - 30'$	$10^6 - 10^9$ (100-10 ns)	-	
Halbleiter oder Injektions-Laser	$10^4 - 10^7$	$1^\circ - 10^\circ /$ $5^\circ - 10^\circ$	5- (10-0,1 μs)	1 - 2 (4 ^o K)	0,6-5
Gas-Laser	$10^4 - 10^6$	0,5'-19'	1-50	$10^{-4} - 10^{-2}$	0,63-13 (0,3-0,5)

Die große Strahlungsdichte von $10^6 \text{ W/cm}^2 \text{ sr}$ verbunden mit einer Strahlungsdivergenz von nur 20" (beim Geodimeter Mod.8) sind auch die wesentlichsten Kriterien für den Einsatz eines Lasers als Zielhilfe in der Landesvermessung.

Neben diesen Eigenschaften ist allgemein die hohe zeitliche und räumliche Kohärenz als dritte Lasereigenschaft in der Praxis von Bedeutung.

Kohärent sind phasengekoppelte Wellenzüge gleicher Frequenz und Schwingungsrichtung und diese Eigenschaft ist neben der Monochromie die Voraussetzung für das Zustandekommen von Interferenzbildern und damit auch für die Verwendung als hochauflösendes Interferometer.

AUSBREITUNGSEIGENSCHAFTEN

Für die Auswahl einer geeigneten Lichtquelle als Zielhilfe ist der Grad der Abschwächung in der Atmosphäre ein ent-

scheidendes Kriterium. Die Abschwächung oder Extinktion hat mehrere Ursachen:

- a) Streuung an Luftmolekülen (Ablenkung ohne Energieumwandlung oder Wellenlängenänderung)
- b) Streuung an gröberen Partikeln (Dunst)
- c) Absorption in den atmosphärischen Gasen

Der Transmissionsfaktor q_R von a), der von Lord RAYLEIGH (MÖLLER) (3) erstmals theoretisch begründet wurde, zeigt eine Abhängigkeit der Wellenlänge in der 4. Potenz, während der Transmissionsfaktor q_D von b) nur mit der 1,3fachen Potenz abhängig ist.

Für die verschiedenen Wellenlängen des Sonnenlichts ergeben sich bei durchschnittlich geneigten Ziellinien von bis zu 5° zum Horizont nach Durchdringen der Atmosphäre etwa folgende Werte.

(μm)	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
q_R	$4 \cdot 10^{-6}$	0,024	0,221	0,483	0,817	0,904
q_D	0,037	0,083	0,137	0,197	0,279	0,349

Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, daß unter obigen Voraussetzungen violetteres Sonnenlicht ($0,4 \mu\text{m}$) nur zu 2 %, rotes Sonnenlicht ($0,7 \mu\text{m}$) aber zu 63 % die Atmosphäre zu durchdringen vermag, während die Abschwächung wegen b) sich zwischen 92 % und 76 % bewegt.

Eine Absorption (c) durch die atmosphärischen Gase (H_2O , O_3 , CO_2) tritt im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums praktisch nicht auf und ist daher vernachlässigbar.

Zum Ergebnis, daß rotes Licht die Atmosphäre in einigermaßen horizontaler Richtung besser zu durchdringen vermag als die anderen Wellenlängen des sichtbaren Spektrums, gelangt man auch durch die empirische Erfahrung. Wenn man als bekannt annehmen kann, daß die Sonne im gesamten sichtbaren Spektrum abstrahlt, so zeigt die Beobachtung der Sonne über den Tag hinweg, daß sie knapp nach dem Aufgehen eine starke gelb rötliche Färbung aufweist, zu Mittag aber eher weiß erscheint.

Da die Sonne aber über den Tag das gleiche Spektrum abstrahlt, hängt der Transmissionsfaktor offensichtlich sehr stark von der zu durchdringenden Luftmasse ab, und das Verhältnis der Transmissionsfaktoren bei senkrechter Einstrahlung von 69 % Violett- zu 96 % Rotstrahlung verschlechtert sich mit zunehmender Luftmasse exponentiell bis zu 2 % zu 63 % bei horizontaler Einstrahlung.

Nachdem sowohl der Rayleigh Transmissionsfaktor als auch der Dunsttransmissionsfaktor bei rotem Licht die besten Werte erbringt, lag es neben anderen Auswahlkriterien (große Strahlungsdichte, geringe Strahlungsdivergenz und geringe Stromaufnahme) nahe, einen roten Gaslaser (He Ne = 630 nm) als Zielhilfe anzustreben.

Nach der Auswahl der günstigsten Lichtquelle war zu untersuchen ob die Verwendung einer singulären Wellenlänge einen Einfluß auf die Richtungsmessung hat.

STRENN hat in seiner Diplomarbeit das dispersive Verhalten des Lichtes unter der Annahme einer kugelschalengeschiedeten Atmosphäre untersucht und kam zu dem Ergebnis, daß auf die Horizontalrichtungsmessung kein Einfluß (Kugelschichtung!) und auf die Vertikalwinkelmessung ein vernachlässigbarer Fehler ((8 mm/10 km) zu erwarten ist. Es können also in einer Richtungsspinne ohne weiters mit Laser beleuchtete und nicht beleuchtete Ziele in einem Guß beobachtet werden.

KONSTRUKTIONSVORSCHLÄGE

Wenn man nun die Anforderungen, die an eine Zielhilfe in der Landesvermessung gestellt werden, mit großer Reichweite, bei alpiner Feldtauglichkeit (geringes Gewicht, einfacher Transport, geringe Stromaufnahme, Wetterbeständigkeit, etc.) zusammenfaßt, so scheint der Gaslaser diese schlechthin zu erfüllen.

Bei den ersten Versuchen mit dem Lasergeodimeter AGA 8 waren

jedoch bei schlechter Sicht Schwierigkeiten aufgetreten, da infolge des Fehlens geeigneter Teilkreise das Ziel erst nach langem Suchen oder überhaupt nicht gefunden werden konnte. Deshalb wurde versucht, den zu verwendenden Laser mit einem Theodolit (eventuell sogar dem Beobachtungstheodolit) so zu verbinden, um so eine Positionierung des Lasers in Horizontal- und Vertikalrichtung auf $\pm 5 - 10^{\text{CC}}$ zu erreichen. Genau dieses Problem ist eigentlich dafür ausschlaggebend, daß es noch zu keiner praktischen Durchführung der vorgeschlagenen Konzepte gekommen ist, da die finanziell realisierbaren die Forderungen nicht 100 % erfüllen konnten, während die anderen von vornherein Theorie bleiben mußten. Alles entscheidendes Kriterium jedes Konstruktionsentwurfes war daher, ob eine dauerhafte und zuverlässige Justierung des Lasers auf $\pm 5^{\text{CC}}$ auf einen Theodolit realisierbar ist, ohne entscheidende Abstriche bei den Anforderungen an einen Beobachtungstheodolit hinnehmen zu müssen.

Vor den konstruktiven Vorschlägen soll die geplante Beobachtungstechnik noch erläutert werden.

Vorgesehen war eine Kombination Laser mit Sekundentheodolit, wobei das Fernrohr und damit der Laser in horizontaler und vertikaler Richtung in die vermutliche Lage durch Vorausberechnung zu bringen sein sollte. War nun die Justierung einwandfrei und die Bündelung des Lasers und seine Strahlungsdichte für den Zustand der Atmosphäre ausreichend, so hätte das Laserlicht von den am Zielpunkt befindlichen Glasprismen reflektiert den Beobachter erreichen müssen. War auf diese Weise keine Reflexion zu erreichen, wollte man den Öffnungswinkel des Laserstrahls durch Änderung der Fokussierung vergrößern (auch zur Intensitätssteuerung verwendbar) um so das Ziel leichter zu finden - immer unter der Voraussetzung, daß es mit unbewaffnetem Auge nicht erkennbar ist!

Für die Erarbeitung von Konstruktionsvorschlägen standen uns die Geräte Lasergeodimeter AGA 8 mit 5 mW Leistung sowie

leihweise von der Firma ROST zur Verfügung gestellte Geräte wie STOLZ Universalilaser PICCOLO mit 2 mW sowie das WILD Laserokular GLO mit 4 mW Laser und 1 mW Ausgangsleistung zur Verfügung.

Nach den guten Erfahrungen mit dem Lasergeodimeter AGA 8 war eine Laserleistung mit 5 mW anzustreben - aber wie ein fast 50 cm langes Laserrohr (incl. Hochfrequenzteil) auf einen Sekundentheodolit mit dieser Toleranz dauerhaft justieren? In Frage käme dabei nur eine Fixmontage, die extrem unhandlich ist und einen entsprechend voluminösen Transportkoffer bedingt hätte.

Eine ähnliche Lösung hat kurzfristig bestanden, wobei mit einem Spiegel- und Prismensystem das Laserlicht in das Fernrohrokular eingespiegelt wurde, jedoch war gleichzeitig eine Beobachtung durch das Fernrohr unmöglich, außerdem war die Anordnung extrem kopflastig!

Eine andere Möglichkeit bietet das von der Firma WILD angebotene Laserokular GLO oder KERN DKM 2-AL bei dem der He Ne Laser am Stativ befestigt wird und über eine Glasfaseroptik in das Fernrohrokular eingespiegelt wird, wobei das Theodolitfernrohr zur Fokussierung und Vergrößerung dient.

Diese elegante Variante hat mehrere Nachteile:

1. Die Lichtverluste bei dieser Form der Lichtübertragung liegen zwischen 60 und 80 % der Primärlichtstärke. Verursacht werden sie durch die millionenfache Reflexion in der Glasfaseroptik, durch die ungenaue Fokussierung des Lasers auf dem Glasfaserstrang beim Eintritt und Austritt und letztlich durch das nicht auf diese Wellenlänge optisch korrigierte Objektiv.
2. Aufgrund der strengen Sicherheitsvorschriften für Laserbenutzer müssen zum Schutz der Augen, gegen die okularseitig austretende Strahlung, Laserdämpfungsfilter eingebaut werden, die, aufgrund ihrer starken Lichtdämpfung, ein Erkennen der Topographie bei schlechten Lichtverhältnissen unmöglich machen. Außerdem ist im Okular stets ein roter Lichtpunkt zu erkennen, der vom objektivseitig austretenden Laserstrahl durch sein Auftreffen am Pola-

risationsfilter und durch Reflexion und Streuung an optischen Bauteilen erzeugt wird, und dadurch ein Erkennen eines vom Ziel reflektierten Laserstrahls unmöglich macht.

Mit den bisher erwähnten Varianten sind die Möglichkeiten weitestgehend erschöpft, man kann nur versuchen dieselben zu variieren. Dabei bietet sich folgende Lösung als optimal an - sie erfordert aber eine Neukonstruktion eines Sekundenbeobachtungstheodolits. Der Lichteintritt des Lasers in den Theodolit sollte über eine Fernrohrstütze (ähnlich wie die Teilkreisbeleuchtung) direkt in das Fernrohr geführt und von dort über einen kleinen Spiegel oder ein Prisma Richtung Ziel umgelenkt werden. Der Lichteintritt muß jedoch im Brennpunkt oder in der Nähe desselben erfolgen, damit bei Fernrohrstellung ∞ ein paralleler Strahlenaustritt gewährleistet ist. Diese Lösung wäre unabhängig von der Fernrohrneigung und die Lichtführung in den Fernrohrträger könnte aufwendig mit einem Lichtleiter (oder einfacher mit Hilfe von Umlenkprismen erfolgen, wobei der Laser dann parallel zur Fernrohrachse auf den Fernrohrstützen ruhen könnte).

Bei Verwendung einer Glasfaseroptik ist statt des 5 mW He Ne Lasers ein 10 mW Laser notwendig, wodurch sich die Kosten des Lasers ungefähr verdoppeln!

Wenn man vom Optimum schrittweise zu realistischen Lösungen kommen will, kann man das WILD GLO oder KERN DKM 2-AL benutzen und mit einem 10 mW Laser ausstatten und auf das Theodolit-Laserzielfernrohr ein zweites Beobachtungsfernrohr aufsetzen, das dauerhaft hinreichend genau justiert werden kann. Mit einem entsprechenden Gewichtsausgleich wäre ein Sekundentheodolit auf diese Weise, ohne Hindernisse beim Beobachten (Neigung, Durchschlagen) in Kauf nehmen zu müssen, umrüstbar.

Varianten, bei denen der Laser direkt auf das Fernrohr aufgesetzt wird, scheiden aus Gründen der Justierung und Unhandlichkeit (Verwendung von Zenitokularen) sicher aus.

Bisher wurden nur Konzepte beschrieben, die die Vereinigung

von Laserziel- und Beobachtungstheodolit bezweckt haben. Eine Trennung dieser beiden Funktionen erleichtert die Lösung beträchtlich, erfordert aber die doppelte Ausrüstung an Theodolit und Stativ. Wesentlich bei dieser Variante ist, daß der Abstand (Perpendikel) zwischen Beobachtungsgerät und Lasertheodolit zwar in Abhängigkeit der beobachteten Distanz aber doch sehr klein bleiben muß (bei 10 km max 1 m). Ausschlaggebend dafür ist die hohe Schliffgüte der AGA Prismen, die sich je nach Güteklasse zwischen 1^{CC} bis 20^{CC} bewegt und damit auf 10 km einen Streukegel von nur 35 cm erzeugt. Außerhalb dieses Sektors läßt die Intensität in Abhängigkeit der Turbulenz in der Atmosphäre sehr rasch nach, so daß eine Positionierung der beiden Geräte innerhalb dieses geringen Horizontal- und Vertikalperpendikels notwendig ist, was erstens rein technisch oft gar nicht einfach ist und zweitens bei Verwendung des Lasers für mehrere Richtungen innerhalb einer Richtungsspinne zu Behinderungen führt.

Bei den konstruktiven Lösungen soll auf die verschiedenen Geräte der Bauwirtschaft nicht vergessen werden, jedoch wurden diese vornehmlich als Fluchtungs-laser konzipiert, bestenfalls mit einer Röhrenlibelle zum Festlegen geringer Neigungen ausgestattet. Ihnen allen fehlt die Konzeption eines geodätischen Winkelinstruments mit Sekundengenauigkeit.

Mit ein Grund warum keines der erarbeiteten Konzepte bis jetzt realisiert wurde, ist die Hoffnung, daß uns die Entwicklung von Laserdioden die gerätemäßig aufwendigen und voluminösen Lösungen erspart. Bis jetzt gibt es zwar neben den gebräuchlichsten Laserdioden im Infrarotbereich (HP Totalstation) schon Dioden im sichtbaren Rot, jedoch ist aus thermischen Gründen ein kontinuierlicher Betrieb bei Leistungen an die 5 mW nicht möglich und ein Impulsbetrieb ist für unsere Anwendungszwecke ungeeignet, weswegen auch Festkörperlaser ausscheiden.

Als Reflektoren wurden die auch für die Distanzmessung

benützten Prismenreflektoren der Firma AGA benützt. Ein am Institut für Landesvermessung selbst entwickelter Reflektorhalter aus Aluminium ermöglicht die Positionierung von 19 Prismen auf engstem Raum. STRENN hat in seiner Diplomarbeit den Einfluß einer Reflektorexzentrizität, bedingt durch den Unterschied vom geometrischen Reflektormittelpunkt und Helligkeitsmittelpunkt des reflektierten Lichtes, abgeschätzt sowie für die Anzahl der notwendigen Prismen in Abhängigkeit der Sichtweite folgende empirische Faustformel gefunden;

$$P_r \geq P_{ro} \left(\frac{2R}{S}\right)^2$$

P_r ... Anzahl der Prismen
 $P_{ro} = (1) - 2$... Mindestanzahl
an notwendigen Prismen
wenn $S \geq 2R$
 R ... Länge der Ziellinie
 S ... Sichtweite

In der Praxis kann mit Hilfe obiger Beziehung auf einfache Weise die für die Beschickung einzelner Stationen notwendige Anzahl von Prismen bestimmt werden.

Bei Grenzfällen, wenn die Intensität des Lasers für die atmosphärischen Verhältnisse zu gering ist oder die Prismenanzahl nicht ausreicht, um mit dem unbewaffneten Auge das reflektierte Laserlicht zu erfassen, kann die Verwendung einer sogenannten "Pro Laser Brille" noch zum Erfolg führen. Die "Pro Laser Brille" ist ein Filter, das für alle Frequenzen des sichtbaren Spektrums mit Ausnahme der Frequenz des roten Laserlichtes (630 nm), weitgehend undurchlässig ist. Damit wird sämtliches Streulicht vom Auge des Beobachters abgehalten und damit die Empfindlichkeit des Auges für das Reflexionslicht des Lasers erhöht.

AUSBLICK

Die großen Gerätehersteller geodätischer Instrumente sind

an der Realisierung unserer Konstruktionsvorschläge sehr interessiert, jedoch kann eine Variante mit einem Laser mit 5 mW Ausgangsleistung aufgrund der außerordentlich strengen und länderweise spezifischen Laserschutzbestimmungen niemals in Serie produziert werden. Wir müssen daher versuchen durch Adaptierung bestehender Systemteile eine Lösung für dieses nicht nur bei uns anstehende Problem zu ermöglichen.

Die Hoffnungen, durch die Weiterentwicklung der Halbleiterlaser in absehbarer Zeit Laserdioden mit 5 mW Ausgangsleistung im sichtbaren Bereich zu erhalten, werden sich nach jüngsten Informationen nicht so bald erfüllen, da die Industrie ihre Entwicklungen derzeit auf Infrarotlaserdioden konzentriert.

LITERATUR

- (1) STRENN, L. "Zielhilfen für die Richtungsmessung
in der Landesvermessung"
Diplomarbeit am Institut für Landesver-
messung der TU Wien

- (2) PANZER, S. "Der Laser, seine Wirkungsweise und An-
wendungsmöglichkeiten für die elektro-
optische Streckenmessung"
Allgemeine Vermessungsnachrichten 1965

- (3) MÖLLER, F. "Einführung in die Meteorologie"
Bd. I und II
B.I. Hochschultaschenbücher

Geowiss. Mitt. 15
1979, 221 - 225

ANWENDUNG DES MONIN-OBUCHOW-MODELLS
ZUR METEOROLOGISCHEN REDUKTION ELEKTRONISCH
GEMESSENER DISTANZEN

von

R. LEPUSCHITZ

Dipl.Ing. Rudolf Lepuschitz, Universitätsassistent am
Institut für Landesvermessung der Technischen Univ. Wien
1040, Gußhausstraße 27 - 29

INHALT:

0. Verwendete Symbole
1. Einleitung
2. Meteorologische Begriffe und Definitionen
3. Wärmehaushaltsgleichung
 - 3.1. Strahlungsbilanz R
 - 3.1.1. Solare Strahlungsbilanz R_S
 - 3.1.2. Terrestrische Strahlungsbilanz R_T
 - 3.1.3. Messung der gesamten Strahlungsbilanz R
 - 3.2. Bodenwärmestrom G
 - 3.3. Turbulenter Strom fühlbarer Wärme H
und Verdunstungswärmestrom λE
 - 3.3.1. Heat Budget-Methode
 - 3.3.2. Bulk Aerodynamik-Methode
 - 3.3.3. Combination-Methode
 - 3.3.3.1. Combination-Methode nach PENMAN
 - 3.3.3.2. Combination-Methode nach MC.ILROY
 - 3.3.4. HOFMANN-Methode
4. OBUCHOW-Länge L
5. Repräsentativer Brechungsindex n_r
 - 5.1. Repräsentativer Luftdruck p_r
 - 5.2. Repräsentative Temperatur t_r
 - 5.3. Repräsentativer partieller Dampfdruck e_r
6. Genauigkeitsabschätzung der zu messenden meteorologischen Parameter

7. Erstellung des MONIN-OBUCHOW Modells

7.1. Feldmessungen

7.2. Berechnung des MONIN-OBUCHOW Modells

8. Literaturangabe

O. WICHTIGE VERWENDETE SYMBOLE

A	....	atmosphärische Gegenstrahlung
A_q	...	Austauschkoeffizient für die Feuchtigkeit
A_θ	...	Austauschkoeffizient für die Temperatur
c_p	...	spezifische Wärme der Luft bei konstantem Druck
D	....	diffuse Himmelsstrahlung
e	....	partieller Dampfdruck
e^*	...	Sättigungsdampfdruck
E	....	Wasserdampfübergang
f	....	relative Feuchte
g	....	Schwerebeschleunigung
G	....	Bodenwärmestrom
G_s	...	Globalstrahlung
H	....	fühlbarer Wärmestrom
I	....	direkte Sonnenstrahlung
k	....	Karman'sche Konstante
k	....	Refraktionskoeffizient
l	....	Wärmeleitfähigkeit des Bodens
L	....	OBUCHOW-Länge
n	....	Brechungsindex
p	....	Luftdruck
q	....	spezifische Feuchte
q^*	...	gesättigte spezifische Feuchte
r	....	Reflexionsvermögen
r	....	(Index) repräsentativ
R	....	Strahlungsbilanz
s	....	Anstieg der Sättigungskurve der spez. Feuchte im Temperaturmittel der Feuchttemperaturen
s	....	(Index) - gemessen an der Bodenoberfläche
t	....	Temperatur in $^{\circ}\text{C}$
T	....	Temperatur in K
u	....	Windgeschwindigkeit
u_*	...	Schubspannungsgeschwindigkeit
w	....	(Index) feucht
z	....	(Index) - gemessen in der Höhe z

z_0 ... Rauigkeitsparameter
 γ Psychrometerkonstante
 Δ Differenz der Meßwerte zweier Höhen
 θ potentielle Temperatur
 λ latente Verdunstungswärme
 λE ... Verdunstungswärmestrom

1. EINLEITUNG

Eines der größten Probleme und die wesentlichste Genauigkeits-schranke bei der elektronischen Distanzmessung über große Entfernungen liegt in der Bestimmung des repräsentativen Brechungsindex der Luft entlang des Meßstrahls.

Der Brechungsindex ist abhängig von den meteorologischen Parametern: Lufttemperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit.

Diese drei Größen sind jedoch eine Funktion des Ortes und der Zeit und müßten daher in jedem Punkt des Meßstrahls zur Zeit der Messung bekannt sein. Da die exakte Erfassung des integralen Brechungsindex nur durch aufwendige Verfahren, wie z.B. mittels unwirtschaftlicher Befliegungen des Meßstrahls erfolgen kann, ist man gezwungen, Modellannahmen über den Aufbau der Atmosphäre zu treffen.

Ein derartiges atmosphärisches Modell wurde von MONIN und OBUCHOW aus Untersuchungen auf dem Gebiet der Turbulenztheorie unter Anwendung von physikalischen Ähnlichkeits- und Dimensionsbetrachtungen entwickelt. ANGUS-LEPPAN und später auch BRUNNER und FRASER haben dieses Modell zur Reduktion elektronisch gemessener Distanzen in Australien verwendet.

Das MONIN-OBUCHOW-Modell (MO-Modell) kann nur unter folgenden zwei Voraussetzungen dazu herangezogen werden:

1. labile Luftschichtung
2. gleichmäßig beschaffene ebene Erdoberfläche

Sind diese Bedingungen gegeben, kann der komplizierte Aufbau der für die Streckenmessung interessanten Atmosphäre sehr gut durch eine bodennahe Schicht (mittlere Dicke etwa 30 m) und eine darüberliegende homogene adiabatische Schicht beschrieben werden (mittlere Dicke etwa 10fache Höhe der bodennahen Schicht). Die Parameter des MO-Modells können durch Messung der Lufttemperatur, der Luftfeuchte, des Luftdrucks, der Strahlungsbilanz, des Bodenwärmestroms und der Windgeschwindigkeit ermittelt werden. Daraus ist es möglich, auf den repräsentativen Brechungsindex zu schließen.

Um die Frage zu klären, ob dieses Modell auch in unseren Gegenden unter ungünstigeren topographischen Verhältnissen anwendbar ist, wurden unter der Leitung von Univ.Professor Dipl.Ing. Dr.techn. Hans SCHMID, Vorstand des Instituts für Landesvermessung an der Technischen Universität in Wien, mit der finanziellen Unterstützung des "Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung in Österreich" Forschungen am Institut für Landesvermessung durchgeführt (Forschungsprojekt Nr. 3335). Im Rahmen dieses Projekts laufen auch zwei Dissertationen. Dipl.Ing. BRUCKMÜLLER befaßt sich darin mit dem Problem der meteorologischen Datenerfassung am Boden sowie in der freien Atmosphäre und der Verfasser dieses Artikels mit der rechnerischen Auswertung der Messungen und der atmosphärischen Modellberechnung. In diesem Artikel wird in erster Linie auf die physikalischen Grundlagen und die Berechnung des MO-Modells zum Zwecke der meteorologischen Reduktion elektronisch gemessener Distanzen eingegangen. Ergebnisse dieser Forschung werden in späteren Veröffentlichungen bekanntgegeben.

Soferne in den folgenden Kapiteln nicht explizit angegeben, wird das "Internationale Einheitensystem" (SI-System) zur Darstellung der Formeln verwendet.

2. METEOROLOGISCHE BEGRIFFE UND DEFINITIONEN

Erfährt ein vertikal verschobenes Luftpaket keine Wärmezufuhr oder Wärmeabfuhr, so nennt man diesen Vorgang einen adiabatischen Prozeß. Er spielt in der Meteorologie eine große Rolle. Die thermodynamische Zustandsänderung für adiabatische Prozesse lautet [10]:

$$(T/T_0) = (p/p_0)^{R_L/c_p} \quad (1)$$

R_L ist die Gaskonstante für Luft und c_p die spezifische Wärme der Luft bei konstantem Druck.

Diese Gleichung sagt aus, daß bei zunehmendem Druck die zugeführte Arbeitsenergie sich in einer Erhöhung der Temperatur

äußert. Umgekehrt nimmt bei abnehmendem Druck auch die Temperatur ab.

Setzt man $p_0 = 1000$ mb, so ist T_0 die Temperatur, die ein Luftpaket mit den Zustandsgrößen T und p annimmt, wenn es adiabatisch auf den Normaldruck von 1000 mb gebracht wird. Gemäß W. v. BEZOLD heißt diese Temperatur potentielle Temperatur θ :

$$\theta = T (1000/p)^{0,286} \quad (2)$$

Ist der vertikale Gradient der potentiellen Temperatur $\frac{d\theta}{dz} = 0$, so befindet sich die Atmosphäre in einem indifferenten Gleichgewicht (Schichtung). Vertikal verschobene Luftmassen haben dann stets die gleiche Temperatur wie die Umgebung, was etwa einer Temperaturänderung $\frac{dT}{dz} \doteq -1$ °C/100 m entspricht.

Eine Schichtung existiert bei einem vertikalen potentiellen Temperaturgradienten $\frac{d\theta}{dz} > 0$.

Dabei kommt jede Vertikalbewegung von Luftmassen zur Ruhe, weil aufsteigende Luft in eine wärmere, absteigende Luft hingegen in eine kältere Umgebung kommt und daher wieder in die Ausgangslage zurückkehrt. Bei einer Temperaturzunahme mit der Höhe ($\frac{dT}{dz} > 0$), genannt Temperaturinversion, liegt der Extremfall einer stabilen Schichtung vor.

Ist $\frac{d\theta}{dz} < 0$, so spricht man von einer labilen Schichtung.

Labiles Gleichgewicht bildet sich zumeist tagsüber durch starke Sonneneinstrahlung aus. Der Boden wird dabei so sehr erwärmt, daß sich ein überadiabatischer Temperaturgradient einstellt.

Die überhitzten Luftmassen steigen auf und andererseits sinken kühlere Luftteile ab.

Durch diese Vertikalbewegung, der sog. Konvektion, kann ein sehr effizienter Wärme- und Feuchtigkeitsaustausch erfolgen. Ein derartiger Austausch in der bodennahen Schicht der Atmosphäre ist eine notwendige Voraussetzung für die Anwendung des

MO-Modells zur Reduktion elektronisch gemessener Distanzen.

Ein weiterer wichtiger meteorologischer Parameter ist die spezifische Feuchte q .

Sie gibt das Verhältnis der Dichte des Wasserdampfes ρ_w zur Dichte der feuchten Luft ($\rho_L + \rho_w$) an:

$$q = \frac{\rho_w}{\rho_L + \rho_w} \quad (3)$$

Aus den Gleichungen für ideale Gase $\rho_L = \frac{p - e}{R_L T}$ und $\rho_w = \frac{e}{R_w T}$ ($R_L, R_w \dots$ Gaskonstanten für Luft bzw. Wasserdampf) folgt:

$$q = \frac{R_L}{R_w} \cdot \frac{e}{p + e \left(\frac{R_L}{R_w} - 1 \right)} \quad (4)$$

Durch Einsetzen der Zahlenwerte für die Konstanten und unter der Annahme, daß $e \ll p$, gilt mit genügender Genauigkeit:

$$q = 0,622 \frac{e}{p} \quad (5)$$

Gemäß BRUNNER und FRASER [4] ist die spezifische Feuchte q in der adiabatischen Schicht invariant mit der Höhe. Dies bedeutet, daß dabei das Verhältnis $\frac{e}{p} = \text{constant}$.

3. WÄRMEHAUSHALTSGLEICHUNG

Eine fundamentale Rolle bei der Bestimmung des MO-Modells spielt der vertikale turbulente Strom fühlbarer Wärme H. Dieser Wärmestrom ermöglicht bei labilen Schichtungen einen vertikalen Luftmassenaustausch und ist somit ein wichtiger Faktor zur Bestimmung der Temperatur- und Feuchtegradienten. H ist ein Glied der Wärmehaushaltsgleichung, die sich zusammensetzt aus:

Strahlungsbilanz R
Bodenwärmestrom G
Verdunstungswärmestrom λE
turbulenter Strom fühlbarer Wärme H
Advektionswärmestrom
Niederschlagswärmestrom

Die beiden letztgenannten Wärmeströme können bei geeigneter Versuchsanordnung Null werden:

Zur Vermeidung des Advektionswärmestroms darf keine wärmere oder kältere, feuchtere oder trockenere Luft aus der Umgebung heranfließen. Dies bedeutet, daß im größeren Umkreis horizontal homogene Verhältnisse herrschen müssen. Der Niederschlagswärmestrom ist bei niederschlagsfreiem Wetter notwendigerweise Null.

Somit ergibt sich folgende Wärmehaushaltsgleichung:

$$(R - G) - \lambda E - H = 0 \quad (6)$$

Sie stellt die Summe der durch die Grenzfläche zwischen der Atmosphäre und dem Erdboden dringenden Wärmeflüsse dar. Da diese Grenzfläche unendlich dünn ist, und daher selbst keine Wärme aufnehmen kann, muß die Summe Null ergeben.

3.1. STRAHLUNGSBILANZ R (net radiation) $\left[\frac{W}{m^2} \right]$

Die Strahlungsbilanz R ist tagsüber zumeist das größte und daher auch das wichtigste Glied der Wärmehaushaltsgleichung. Man unterscheidet zwischen solarer und terrestrischer Strahlung. Die solare ist annähernd mit der kurzwelligen Strahlung ($0,3 - 0,5 \mu m$) und die terrestrische mit der langwelligen Strahlung ($4 - 100 \mu m$) ident [10].

3.1.1. SOLARE STRAHLUNGSBILANZ R_S

Die solare Strahlung setzt sich zusammen aus der direkten Sonnenstrahlung I und der diffusen Himmelsstrahlung D. Eine horizontale Fläche wird bei einer Zenitdistanz z_\odot der Sonne mit $I \cdot \cos z_\odot$ durchströmt. D entsteht durch die Streuung des Lichtes an Luftmolekülen und Dunstteilchen, sowie durch diffus durch Wolken hindurchgehende Strahlung und Reflexstrahlung von beleuchteten Wolken. Aus der Summe folgt die sog. Globalstrahlung G_S :

$$G_S = I \cos z_\odot + D \quad (7)$$

Aufgrund des Reflexionsvermögens r_S der Erdoberfläche für solare Strahlung, ergibt sich die kurzwellige solare Strahlungsbilanz R_S , also jener Strahlungsfluß, der in die Erdoberfläche eindringt, aus:

$$R_S = (1 - r_S) G_S = (1 - r_S) (I \cos z_\odot + D) \quad (8)$$

3.1.2. TERRESTRISCHE STRAHLUNGSBILANZ R_T

Unter terrestrischer Strahlung versteht man jede von irdischen Objekten ausgehende thermische Strahlung. Dazu gehört nicht nur die Strahlung des Erdbodens, sondern auch die der Atmosphäre. Die Atmosphäre besitzt für gewisse Spektralbereiche eine sehr starke absorbierende Wirkung und kann daher, gemäß dem STEFAN-BOLZMANN'schen Gesetz, selbst Wärmestrahlung aussenden. Diese langwellige Strahlung wird atmosphärische Strahlung A

genannt. In gleicher Weise sendet auch der Erdboden proportional zur 4. Potenz seiner Körpertemperatur von der Erde weggerichtete Wärmestrahlung aus.

Somit ergibt sich die langwellige Strahlungsbilanz R_T unter Berücksichtigung des Reflexionsvermögens für langwellige Strahlung r_T aus:

$$R_T = (1 - r_T) (A - \epsilon T_B^4) \quad (9)$$

3.1.3. MESSUNG DER GESAMTEN STRAHLUNGSBILANZ R

Die für uns interessante gesamte Strahlungsbilanz R ergibt sich aus der Addition der solaren und der terrestrischen Strahlungsbilanz.

$$R = R_S + R_r = (1 - r_s) (I \cos z_\odot + D) + (1 - r_T) (A - \epsilon T^4) \quad (10)$$

R wird zumeist durch einen Strahlungsbilanzmesser, bestehend aus zwei entgegengerichteten Effektivpyranometern, gemessen [5]. Ein Effektivpyranometer mißt die aus einem Halbraum kommende kurz- und langwellige Strahlung mittels einer geschwärzten Empfängerplatte, die mit Thermoelementen verbunden ist. Zum Schutz gegen die Abkühlung durch stark wechselnde Winde, wird die Empfängerplatte mit einer Polyäthylenkuppel (Firmenname Lupolen) abgedeckt. Polyäthylen ist glasklar, sehr dünn herstellbar und für solare und terrestrische Strahlung von $0,3 \mu\text{m}$ bis $60 \mu\text{m}$ Wellenlänge durchlässig.

Richtet man nun ein Effektivpyranometer senkrecht nach oben, so wird die Effektivstrahlung [10]

$$R_{\text{eff}} = G + A - \epsilon T_L^4 \quad (11)$$

gemessen. ϵT_L^4 ist die Eigenstrahlung des Pyranometers. Ein nach unten gerichtetes zweites Meßgerät mißt:

$$R'_{\text{eff}} = r_s G + r_T A + (1 - r_T) \epsilon T_B^4 - \epsilon T_L^4 \quad (12)$$

Aus der Differenz dieser beiden Meßwerte fällt ϵT_L^4 heraus und es ergibt sich die gesuchte Strahlungsbilanz R

(Gleichung (10)).

Um eine Vorstellung von der Größe der Strahlungsbilanz zu vermitteln, seien als Beispiel die Messungen von G. BERZ [10] in Garching (Deutschland) angeführt.

10.6.1964	Strahlungsbilanz R [$\frac{W}{m^2}$]
12 ^h	705
24 ^h	- 56

Tabelle 1

3.2. BODENWÄRMESTROM G (ground heat) [$\frac{W}{m^2}$]

Der Bodenwärmestrom wird in erster Linie durch die im vorhergehenden Kapitel erläuterten Strahlungseinflüsse verursacht. Daneben können auch noch Einflüsse anderer Art mitwirken. Beispiele dafür sind die Bodenatmung, Kondensation von warmer und wasserdampfreicher Außenluft im kühlen Boden, Eindringen von kaltem oder warmem Regen in den Boden oder gar vulkanische Tätigkeiten in der Erde.

Der Bodenwärmestrom ergibt sich aus folgender Gleichung [5]:

$$G = - l \cdot \frac{dT}{db} \quad (13)$$

$\frac{dT}{db}$ gibt die Änderung der Bodentemperatur mit der Bodentiefe an und kann mit Bodenthermometern gemessen werden.

Die Wärmeleitfähigkeit des Bodens l [$\frac{W}{m^{\circ}C}$] (thermal conductivity) gibt die Wärmemenge an, die durch einen Würfel von 1 m Kantenlänge der betreffenden Substanz in 1 sec strömt, wenn die Temperaturdifferenz der gegenüberliegenden Flächen $1^{\circ}C$ beträgt und sonst kein Temperaturgefälle auftritt.

l ist für den natürlichen Boden aufgrund der inhomogenen Verhältnisse keine Konstante.

Da G jedoch, verglichen mit R , klein ist, genügt es für unseren Zweck, die Richtzahlen für l aus Tabelle 2 zu entnehmen (aus [5]).

Wärmeleitfähigkeit λ [$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$]

Beton	4,6
Felsgestein	1,7 - 4,2
Eis	2,1 - 2,9
Sand (naß)	0,8 - 2,5
Lehm (naß)	0,8 - 2,1
Altschnee	1,3 - 2,1
Wasser (unbewegt)	0,5 - 0,6
Moor (naß)	0,3 - 0,4
Lehmboden (trocken)	0,1 - 0,6
Sand (trocken)	0,2
Neuschnee	0,1
Holz (trocken)	0,1
Moorboden (trocken)	0,1

Tabelle 2

Als Beispiel für den Bodenwärmestrom dienen abermals die Messungen von G. BERZ in Garching [10]:

10.6.1964	Bodenwärmestrom G [$\frac{W}{m^2}$]
12 ^h	+ 105
24 ^h	- 63

Tabelle 3

3.3. TURBULENTER STROM FÜHLBARER WÄRME H [$\frac{W}{m^2}$]
 (sensibler heat flux) und
 VERDUNSTUNGSWÄRMESTROM λE [$\frac{W}{m^2}$] (latent heat flux)

Der turbulente Strom fühlbarer Wärme H gibt jene Wärmemenge an, die von den turbulenten Schwankungen der Luft pro Flächen- und Zeiteinheit transportiert wird.

H wird bestimmt durch:

$$H = - c_p A_\theta \cdot \frac{d\theta}{dz} \quad (14)$$

$c_p = 1,005$ die spezifische Wärme der Luft bei konstantem Druck, A_θ ist der für die Wärmeleitfähigkeit geltende Austauschkoefizient, der zeitlich und räumlich großen Schwankungen unterworfen ist. Gemäß MONIN und OBUCKOW [11] kann H

jedoch, wohl unter Vernachlässigung der kurzfristigen Schwankungen, unter stationären Bedingungen in der bodennahen Schicht als von der Höhe unabhängig angesehen werden. Das Vorzeichen bzw. die Richtung von H bestimmt das Gleichgewicht der Atmosphäre. Bei $H = 0$ existiert eine neutrale Schichtung, bei $H < 0$, also bei einem zum Boden hing gerichteten Wärmefluß, eine stabile und bei $H > 0$, also bei einem aufwärts gerichteten Wärmefluß, eine labile Schichtung.

H kann direkt durch die sogenannte EDDY CORRELATIONS-Methode experimentell aus den Temperaturschwankungen und der vertikalen Windgeschwindigkeitskomponente bestimmt werden. Die Meßgeräte müssen jedoch praktisch trägheitslos arbeiten, um eine genügende Genauigkeit zu erreichen. Der technische Aufwand dazu ist sehr groß.

Die zweite Möglichkeit zur Bestimmung von H ergibt sich durch die Wärmebilanzgleichung.

Dazu muß neben der Strahlungsbilanz R und dem Bodenwärmestrom G auch der latente Wärmestrom der Verdampfung oder Kondensation λE ermittelt werden.

λE setzt sich zusammen aus der latenten Verdunstungswärme λ [J/g] und dem Wasserdampfübergang E [g/m^2s], wobei E gegeben ist durch

$$E = - A_q \cdot \frac{dq}{dz} \quad (15)$$

A_q ist der für den Wasserdampftransport gültige Austauschkoefizient.

Die Verdunstungswärme λ ist eine Funktion der Temperatur t :

t [$^{\circ}C$]	0	5	10	15	20	25	30
$[\frac{J}{g}]$	2500	2490	2480	2470	2450	2440	2430

Tabelle 4

Die Sublimationswärme, also der Energieaufwand zum Verdunsten des Eises, beträgt bei Temperaturen unter Null etwa 2835 [J/g]

Die Verdunstung E wird auch oft in der Dimension [mm/h] gemessen, wobei unter der Annahme von $\lambda = 2500$ [J/g] gilt:

$$1 \left[\frac{mm}{h} \right] \hat{=} 1 \left[\frac{cal}{cm^2 \cdot mm} \right] \approx 700 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Bei einer Verdunstung von 1 mm Wasser pro Stunde existiert also etwa ein latenter Wärmefluß von $700 \text{ [W/m}^2\text{]}$.

Die Strahlungsbilanz R und der Bodenwärmestrom G können, wie aus den vorhergehenden Kapiteln zu entnehmen ist, relativ einfach mittels geeigneter Meßgeräte ermittelt werden.

Der Verdunstungswärmestrom λE über einem natürlichen Boden ist jedoch ein schwer zu bestimmendes Glied der Wärmehaushaltsgleichung. Dies kann man allein schon an der großen Zahl der Meß- und Berechnungsmethoden erkennen.

Als Beispiel für die Größenordnung des fühlbaren Wärmestroms und des Verdunstungswärmestroms mögen abermals die Messungen von G. BERZ in Garching dienen [10]:

10.6.1964 fühlbarer Wärmestrom H Verdunstungswärmestrom λE

12 ^h	180	425
24 ^h	7	0

Einige für unsere Zwecke brauchbare Methoden zur Bestimmung von H über λE sind (aus [5], [15], und [16]):

3.3.1. HEAT BUDGET-METHODE (SEVERDRUP'SCHES VERFAHREN)

Bei dieser Methode wird angenommen, daß $A_\theta = A_q$ ist, daß also sowohl die Wärme als auch die Feuchte gleicherweise transportiert werden. Versuche haben zwar ergeben, daß das Verhältnis $A_\theta : A_q$ zwischen 0,5 und 1,7 liegt, jedoch liegen die meisten und besten Messungen nahe bei 1.

Das Verhältnis $H/\lambda E$ (genannt BOWENS ratio B) ist nunmehr:

$$B = \frac{H}{\lambda E} = \frac{c_p}{\lambda} \cdot \frac{\Delta\theta}{\Delta q} \quad (16)$$

Δ bezeichnet die Differenz der Meßwerte zweier beliebiger Höhen. In der Praxis wird man eine Höhendifferenz von einigen Metern nehmen. Statt der potentiellen Temperatur θ kann auch aufgrund der geringen Abweichung die gemessene Temperatur T verwendet werden.

Gemäß SLATYER und MC ILROY kann B auch durch die potentiellen Feucht- und Trockentemperaturdifferenzen $\Delta\theta_w$ und $\Delta\theta$ ausgedrückt werden:

$$B = \left(\frac{s + \gamma}{\gamma} \frac{\Delta\theta_w}{\Delta\theta} - 1 \right)^{-1} \quad (17)$$

wobei $\gamma = \frac{c_p}{\lambda}$, die psychrometrische Konstante und s der Anstieg der Sättigungskurve der spezifischen Feuchtigkeit im Temperaturmittel der Feuchttemperatur ist. Die genauen Werte $\frac{\gamma}{s + \gamma}$ wurden in [14] tabuliert. Als Näherung gilt mit genügender Genauigkeit [3] :

$$\frac{\gamma}{s + \gamma} = 0,598 - 0,0145 t' \quad (17a)$$

Aus der etwas umgeformten Wärmehaushaltsgleichung

$$H = \frac{B}{1 + B} (R - G) \quad (18)$$

folgt durch Einsetzen von (17) der Wärmefluß H:

$$H = (R - G) \frac{\gamma}{s + \gamma} \frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_w} \quad (19)$$

Es besteht auch die Möglichkeit, anstatt der vertikalen Temperaturdifferenzen $\Delta\theta$ und $\Delta\theta_w$, zeitliche Temperaturdifferenzen in einer einzigen Höhe zu messen [16]. Die Forschungen darüber sind jedoch noch nicht abgeschlossen.

3.3.2. BULK AERODYNAMIC-METHODE

Auch bei dieser Methode wird H aus der Wärmehaushaltsgleichung berechnet, jedoch ergibt sich die Verdunstung E aus der Gleichung von DALTON:

$$E = \rho \cdot f(u_z) \cdot (q_s - q_z) \quad (20)$$

ρ ist die Luftdichte, $f(u_z)$ eine empirisch zu bestimmende, von der Windgeschwindigkeit u_z und der Bodenrauigkeit abhängige Funktion, q_s und q_z sind die an der Oberfläche bzw. in der Höhe z gemessenen spezifischen Feuchten.

GEIGER [5] verwendet die DALTON'sche Verdunstungsformel in einer etwas vereinfachten Form zur direkten Berechnung des latenten Wärmeflusses:

$$\lambda E = c(u) (e_s^* - e_z) \quad (21)$$

e_s^* ist der Sättigungsdampfdruck des Wasserdampfes für die Temperatur der verdunstenden Oberfläche.

Die empirisch bestimmte Funktion $c(u)$ ist nur eine Funktion der Windgeschwindigkeit u und hat folgende Werte:

u	$[\frac{m}{s}]$	0,1	0,5	1	2	5	10
c	$[\frac{W}{m^2 mbar}]$	3,7	8,4	12	17	26	37

Tabelle 5

Auch HARBECK und PENMAN [15] geben Formeln für die Verdunstung an, die zu ähnlichen Ergebnissen führen:

Formel von HARBECK:

$$\lambda E = C u_z (e_s - e_z) \quad (22)$$

$$C = 3,78 \quad \text{bei } z = 2 \text{ m}$$

$$C = 3,24 \quad \text{bei } z = 4 \text{ m}$$

Formel von PENMAN:

$$\lambda E = 7,4 (0,5 + 0,54 u_z) (e_s - e_z) \quad (23)$$

$$\text{für } z \approx 2 \text{ m}$$

Die Konstanten der Formeln von HARBECK und PENMAN haben in erster Linie Gültigkeit für die Berechnung des latenten Wärmeflusses über einer Wasserfläche.

3.3.3. COMBINATION-METHODE

3.3.3.1. COMBINATION - METHODE NACH PENMAN

Die COMBINATION-METHODE vereinigt die BULK-AERODYNAMIC-Methode und die HEAT BUDGET-Methode.

Der aktuelle Verdunstungswärmestrom λE wird dabei aus folgen-

der Formel berechnet:

$$\lambda E = \frac{s}{s + \gamma} (R - G) + \frac{\gamma}{s + \gamma} (\lambda E_z - \lambda E_s) \quad (24)$$

E_z für die Höhe z , bzw. E_s für die Bodenoberfläche ergibt sich aus Formel (20), wobei darin $(q_s - q_z)$ durch das Sättigungsdefizit $(q_z^* - q_z)$ in der Höhe z bzw. $(q_s^* - q_s)$ am Boden ersetzt wird.

Bei Verwendung der Formeln (22) oder (23) wird die Differenz Sättigungsdampfdruck minus partieller Dampfdruck in der Höhe z und am Boden eingesetzt.

3.3.3.2. COMBINATIONS-METHODE NACH MC ILROY

MC ILROY variiert die PENMAN-Gleichung indem er das Sättigungsdefizit durch die Temperaturdifferenz $D = \theta - \theta_w$ ersetzt. (θ_w ist die potentielle Feuchttemperatur.) Dies geschieht durch Einsetzen der psychrometrischen Gleichung.

Die Gleichung für den fühlbaren Wärmefluß H lautet nunmehr:

$$H = \frac{\gamma}{\gamma + s} (R - G) - c_p \rho f(u_z) (D_z - D_s) \quad (25)$$

3.3.4. METHODE VON HOFMANN

Auch HOFMANN zerlegt den Verdunstungswärmestrom λE in einen Strahlungsanteil und einen Ventilations-Feuchte-Anteil.

$$\lambda E = \lambda w_s (R - G) + \frac{\lambda w_v}{e^*} \alpha_L (e^* - e) \quad (26)$$

w_s und w_v sind Koeffizienten, die allein von der Lufttemperatur abhängig sind. Tabellierte Werte sind in [5] zu finden. e^* ist der Sättigungsdampfdruck der Luft und α_L die Wärmeübergangszahl für Boden - Luft.

Laut MAIER [9], lautet die Näherungsformel von (26) folgend:

$$\lambda E = (0,46 + 0,0115 t) (R - G) + (61,7 + 3,16 t) u^{0,65} \frac{e^* - e}{e^*}$$

$$u = \text{Windgeschwindigkeit in } z = 2 \text{ m} \quad (27)$$

Der Vorteil dieser Methode liegt darin, daß die Messungen nur in einer einzigen Höhe vorgenommen werden müssen.

4. OBUCHOW-LÄNGE L [m]

Die OBUCHOW-Länge L ist eine wichtige charakteristische physikalische Größe der bodennahen Schicht, da sie deren Höhe, also jenen Bereich, in dem $H = \text{constant}$ ist, angibt.

L wurde erstmals von OBUCHOW aufgrund von Ähnlichkeits- und Dimensionsbetrachtungen berechnet.

$$L = - \frac{u_*^3 \cdot c_p \cdot \varrho \cdot \theta}{k \cdot g \cdot H} \quad (28)$$

u_* ist die Schubspannungsgeschwindigkeit, k die KARMAN'sche Konstante und g die Erdbeschleunigung. Das Vorzeichen von L wurde derart definiert, daß L bei stabiler Schichtung, also bei nach unten gerichteten turbulentem Wärmestrom ($H < 0$) positiv ist.

Bei instabilen Schichtungen ergeben sich negative Vorzeichen und bei neutralen Verhältnissen wird L theoretisch unendlich groß.

Ein besonders kritischer Parameter bei der Ermittlung von L ist die Schubspannungsgeschwindigkeit u_* , da sie mit der dritten Potenz in die Gleichung eingeht. Auch u_* kann innerhalb der bodennahen Schicht als von der Höhe unabhängig angesehen werden [11]. u_* ist also eine Referenzgeschwindigkeit, die eine Funktion der Luftdichte ϱ und der Schubspannung τ ist.

u_* läßt sich aus Windprofilen berechnen, wobei sich ein gemischt linear-logarithmisches Profil für die bodennahe Schicht ($|\frac{z}{L}| < 1$) gut bewährt hat:

$$u_z = \frac{u_*}{k} \cdot \left(\ln \frac{z}{z_0} + \beta \left(\frac{z - z_0}{L} \right) \right) \quad (29)$$

Für die Konstante β haben MONIN und OBUCHOW [11] die allgemeingültige Zahl $\beta = 0,6$ errechnet. Dieser Wert ist jedoch sicherlich etwas zu gering, da DEACON $\beta = 4$, PANOFISKY,

BLACKADAR und MC VEIHL $\beta = 4,5$ und TAYLOR sogar $\beta = 6$ ermittelten.

Der empirische Rauheitsparameter z_0 hat die Dimension einer Länge und ist eine Funktion der Oberflächenbeschaffenheit des Bodens, muß aber nicht notwendigerweise mit der Bewuchshöhe korreliert sein.

z_0 kann aus Fig. 1 entnommen werden [15] :

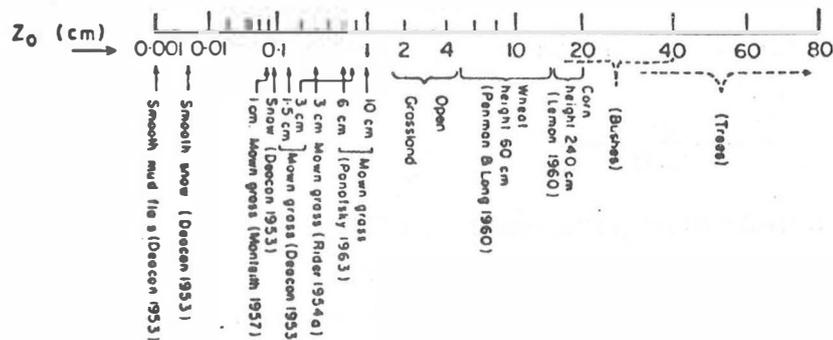


Fig. 1 Rauheitsparameter z_0

Eine Vorstellung der Größenordnung von $|L|$ in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit u und dem Bodenrauheitsparameter z_0 vermittelt Fig. 2 aus [15] :

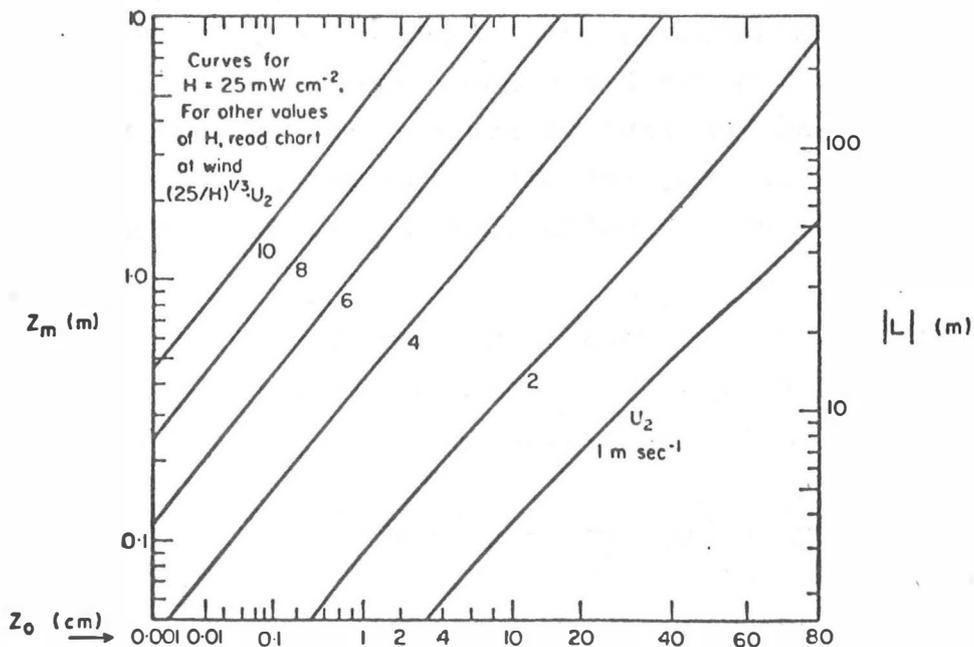


Fig. 2 $|L|$ in Abhängigkeit von z_0 und u_{2m} bei labilen Verhältnissen.

5. REPRÄSENTATIVER BRECHUNGSINDEX n_r

Die altbekannten empirischen Formeln für den Brechungsindex lauten [7]:

für Licht:

$$(n_L - 1) = 98,7 \cdot 10^{-5} \frac{(n_{gr} - 1)}{(1 + \alpha t)} p - \frac{4,1 \cdot 10^{-8}}{(1 + \alpha t)} e \quad (30)$$

(Formel von KOHLRAUSCH)

$$\text{mit } (n_{gr} - 1) \cdot 10^6 = 287,6 + 3 \cdot \frac{1,62}{\lambda^2} + 5 \cdot \frac{0,14}{\lambda^4} \quad (31)$$

(Formel von EDLEN bzw. BARREL und SEARS)

für Mikrowellen:

$$(n_M - 1) = \left(\frac{77,64}{T} (p - e) + \frac{64,68}{T} \left(1 + \frac{5748}{T} \right) e \right) \cdot 10^{-6} \quad (32)$$

(Formel von ESSEN und FROOME)

Zur Berechnung des repräsentativen Brechungsindex n_r ist es notwendig, in jedem Punkt des Meßstrahls, die Werte der meteorologischen Größen Lufttemperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit zu bestimmen. Da die strenge Berechnung von n_r in der Praxis scheitert, kann man versuchen, die meteorologischen Daten für die repräsentative Höhe h_r des Meßstrahls zu ermitteln und daraus eine Schätzung für n_r zu berechnen [9]. Die repräsentative Höhe h_r ist im allgemeinen nicht ident mit der Höhe der Mitte des Meßstrahls und auch keineswegs gleich dem Mittelwert, gerechnet aus den Endpunktshöhen h_A und h_B , sondern gibt jene Meereshöhe an, in der der Meßstrahl im Mittel verläuft.

Laut [8] ist h_r :

$$h_r = \frac{h_A + h_B}{2} - \frac{1 - k}{12 R} s^2 \quad (33)$$

k ist der Refraktionskoeffizient, R der Erdradius und s die Entfernung zwischen A und B .

Der korrekte Wert für den Refraktionskoeffizienten k ist

leider nur sehr schwierig zu ermitteln.

Eine Möglichkeit zur Bestimmung von k für das sichtbare Licht wäre die Messung von gegenseitigen Zenitdistanzen. Voraussetzung dafür ist allerdings eine gleichmäßig gekrümmte Lichtbahn. BRUNNER [2] gibt eine Methode zur Bestimmung von k aus Wärmeflußmessungen und Temperaturprofilen an. Durchschnittswerte für k (Licht: $k_L = 0,13$, Mikrowellen: $k_M = 0,25$) stellen zumeist nur eine grobe Näherung dar.

Für das MO-Modell wäre es erstrebenswert, h_r auf etwa ± 10 m zu ermitteln, da in der adiabatischen Zwischenschicht (= Region III, Kapitel 5.2) eine Höhenänderung von ± 10 m eine Temperaturänderung von $\mp 0,1$ °C bewirkt.

5.1. REPRÄSENTATIVER LUFTDRUCK p_r [mb]

Der Luftdruck ist jener meteorologischer Parameter, dessen Abnahme mit der Höhe am genauesten berechnet werden kann. Laut MAIER [9] ist es für die heutigen Genauigkeitsanforderungen in der Streckenmessung notwendig, die vollständige barometrische Höhenformel nach [6] zur Berechnung von p_r zu verwenden.

$$p_r = p_A \exp - \left[0,12514 \cdot 10^{-3} (1 - \beta \cos 2\varphi) \cdot \frac{1}{1 + \alpha t} \cdot \frac{1}{1 + 0,377 \cdot \frac{e}{p}} \cdot (1 - 0,3135 \cdot 10^{-6} \frac{h_r + h_A}{2}) \cdot (h_r - h_A) \right] \quad (37)$$

p_A und h_A sind der Druck bzw. die Meereshöhe im Standpunkt A, β , α und φ Größen, die in [6] nachzulesen sind.

Da das MO-Modell streng genommen nur in der Ebene Gültigkeit besitzt, die Höhendifferenz zwischen den beiden Streckenendpunkten also zumeist gering sein wird, genügt es, die vereinfachte Formel

$$p_r = p_A \exp - \left[1,2471 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{h_r - h_A}{1 + 0,003665 t} \right] \quad (35)$$

zu verwenden.

Für die repräsentative Höhe h_r kann von den Standpunkten A und B aus der Luftdruck p_{rA} und p_{rB} durch Gleichung (35) extrapoliert werden. Differenzen zwischen p_{rA} und p_{rB} lassen auf einen Horizontalgradienten schließen. p_r muß daher durch Mittelung interpoliert werden.

$$p_r = \frac{1}{2} (p_{rA} + p_{rB}) \quad (36)$$

Der Horizontalgradient beträgt maximal 1 mb pro 10 000 m.

5.2. REPRÄSENTATIVE TEMPERATUR t_r bzw. T_r [$^{\circ}\text{C}$] bzw. [K]

Nach WEBB [15] kann bei labilen Verhältnissen die bodennahe Atmosphäre in drei Schichten unterteilt werden. Die Höhen dieser Schichten variieren in Abhängigkeit von der OBUCHOW-Länge L .

Die Funktion des Temperaturgradienten wird in Figur 3 dargestellt:

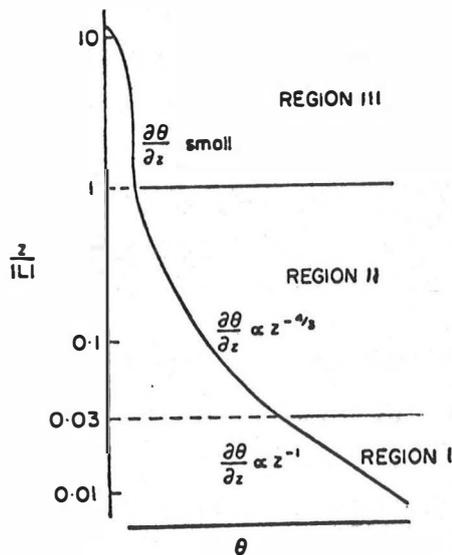


Fig. 3:
Profil der potentiellen Temperatur bei labilen Verhältnissen.

Die Dreiteilung der bodennahen Schicht wird durch die unterschiedlichen vertikalen Luftbewegungen, genannt Konvektionen, begründet.

Die Konvektion besorgt den Wärmetransport.

In der Region I herrscht die "erzwungene Konvektion" vor. Luftmassen werden bei der horizontalen Bewegung über einer rauhen Bodenoberfläche dynamisch vermischt.

$\frac{\partial \theta}{\partial z}$ verhält sich proportional zu z^{-1} [13] .

Die Obergrenze der Region I wird mit $z = 0,03 |L|$ angenommen. Aus diesem Grund hat diese Schicht für die Geodäsie geringere Bedeutung.

Die Registrierung der Daten erfolgt hauptsächlich in der Region II. Hier herrscht "freie Konvektion" vor, d.h., daß der vertikale Wärmetransport durch Dichtedifferenzen und den dadurch entstehenden Auftrieb in der Luft erfolgt.

Der wichtigste Faktor bei der Bestimmung des Gradienten in der Region II ist der fühlbare Wärmefluß H .

Der vertikale Temperaturgradient lautet gemäß [13] :

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = - \left(\frac{H^2 \theta}{(c_p \rho)^2 g} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot z^{-\frac{4}{3}} \quad (37)$$

$\frac{d\theta}{dz}$ verhält sich also proportional zu $z^{-\frac{4}{3}}$

Die Grenzen dieser Schicht sind $0,03 |L| < z < |L|$.

Region II ist also ident mit der bodennahen Schicht.

In der Region III gibt es eine "quasi-freie Konvektion", so genannt, weil sie von dem Vorhandensein eines Wärmetransports aus der Region II abhängig ist.

Der Gradient $\frac{\partial \theta}{\partial z}$ in dieser Region ist beinahe Null.

Aus Versuchen wurde ermittelt, daß Region III bis in eine Höhe von $10 |L|$ reicht.

Somit ergibt sich folgende Berechnung der repräsentativen Temperatur θ_r aus den in den Standpunkten A und B in der Höhe z gemessenen meteorologischen Daten:

Die Temperaturen müssen zunächst aus der Region II in die Region III, also mindestens bis in die Höhe $|L_A|$ über den Meßpunkt A extrapoliert werden [4] .

$$\theta_{LA} = \theta_A + \int_{z_A}^{|L_A|} \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \cdot dz \quad (38)$$

Durch das Einsetzen von (37) und die Integration ergibt sich die potentielle Temperatur θ_{LA} der Region III über dem Meßpunkt A aus:

$$\theta_{LA} = \theta_A + 3 \cdot \left(\frac{H^2 \theta}{(c_p \rho)^2 g} \right)^{\frac{1}{3}} \left(|L_A|^{-\frac{1}{3}} - z_A^{-\frac{1}{3}} \right) \quad (39)$$

Da Region III eine adiabatische Schicht ist, folgt die repräsentative potentielle Temperatur θ_r durch Ausschaltung des horizontalen Temperaturgradienten aus

$$\theta_r = \frac{1}{2} (\theta_{LA} + \theta_{LB}) \quad (40)$$

und die repräsentative Temperatur T_r aus

$$T_r = \theta_r \cdot \left(\frac{1000}{p_r} \right)^{-0,286} \quad (41)$$

5.3. REPRÄSENTATIVER PARTIELLER DAMPFDRUCK e_r [mb]

Laut BRUNNER und FRASER [4] ist der Gradient der relativen Feuchte $\frac{df}{dz}$ bei instabilen atmosphärischen Verhältnissen beinahe Null.

Dadurch kann q_{LA} , die spezifische Feuchte in der Höhe der OBUCHOW-Länge über dem Standpunkt A, mit Hilfe der in A gemessenen relativen Feuchte f_A und $q^*_{(LA)}$, der gesättigten spezifischen Feuchte der Trockentemperatur in der Höhe der OBUCHOW-Länge, berechnet werden.

$$q_{LA} = f_A \cdot q^*_{(LA)} \quad (42)$$

Ab der Höhe von $|L|$ bis $10 |L|$, also in der adiabatischen Region III, sollte gemäß [3] q konstant sein.

Daher ergibt sich die repräsentative spezifische Feuchte q_r aus dem Mittel der über den beiden Endpunkten A und B extrapolierten spezifischen Feuchten q_{LA} und q_{LB} aus:

$$q_r = \frac{1}{2} (q_{LA} + q_{LB}) \quad (43)$$

Durch die Mittelung wird der linear angenommene Horizontalgradient eliminiert.

Der repräsentative partielle Dampfdruck e_r ergibt sich aus:

$$e_r = 1,61 \cdot q_r \cdot p_r \quad (44)$$

Ob diese, sehr einfache Modellannahme zur Berechnung des repräsentativen partiellen Dampfdrucks für die Reduktion von langen Mikrowellenseiten genügt (siehe Formel (47)), erscheint sehr fraglich. Auskunft darüber können erst umfangreiche Feldmessungen geben.

6. GENAUIGKEITSABSCHÄTZUNG DER ZU MESSENDEN METEOROLOGISCHEN PARAMETER

Bekanntlich ist die relative Streckengenauigkeit proportional zur relativen Genauigkeit des Brechungsindex. Wird der Brechungsindex näherungsweise $n = 1$ gesetzt, folgt:

$$\Delta s = - s \cdot \Delta n \quad (45)$$

Für Licht bzw. Mikrowellen ergibt sich durch die partielle Ableitung von Formel (30) bzw. (32) eine Abschätzung für mittlere meteorologische Verhältnisse [7] :

Licht als Trägerwelle:

$$\Delta s \approx (\mp 1,0 \Delta t \pm 0,3 \Delta p \mp 0,04 \Delta e) \cdot 10^{-6} \cdot s \quad (46)$$

Mikrowelle als Trägerwelle:

$$\Delta s \approx (\mp 1,4 \Delta t \pm 0,3 \Delta p \pm 4,7 \Delta e) \cdot 10^{-6} \cdot s \quad (47)$$

Wie aus Formel (46) bzw. (47) erkennbar ist, wäre es erstrebenswert, bei der Messung von langen Distanzen die repräsentative Temperatur auf etwa $0,1^\circ\text{C}$ berechnen zu können. Sicherlich ist diese Forderung sehr hoch gegriffen, sie dient jedoch zur groben Abschätzung der erforderlichen Meßgenauigkeit für den fühlbaren Wärmefluß H und der Windgeschwindigkeit u . H und u werden, wie aus den vorangehenden Kapiteln ersichtlich, zur Berechnung des Temperaturprofils benötigt.

Unter der Annahme von mittleren meteorologischen Werten für labile Verhältnisse, ergibt sich die Schätzung der Änderung von θ_L in der Höhe der OBUCHOW-Länge mit der Windgeschwindigkeits- und der Wärmeflußänderung:

$$\Delta \theta_L = - 0,15 \cdot \Delta u - 3,3 \cdot 10^{-3} \Delta H \quad (48)$$

Sollte die repräsentative Temperatur auf $\pm 0,1$ °C ermittelt werden, muß die Windgeschwindigkeit auf etwa $\bar{+} 0,5$ m/s und der fühlbare Wärmefluß auf $\bar{+} 30$ W/m² gemessen werden.

Zur Bestimmung der repräsentativen Werte des Luft- bzw. Dampfdrucks müssen außer den üblichen Feldmessungen keine weiteren Messungen vorgenommen werden.

7. ERSTELLUNG DES MONIN-OBUCHOW MODELLS

7.1. FELDMESSUNGEN

Zur Berechnung des atmosphärischen Modells werden folgende meteorologische Daten an ausgesuchten Bodenpunkten benötigt:

- Trocken- und Feuchttemperatur der Luft,
(bzw. Trockentemperatur und relative Feuchte),
- Luftdruck,
- lang- und kurzwellige Strahlungsbilanz,
- Bodentemperatur
- Windgeschwindigkeit

Die vom Institut für Landesvermessung zur Ermittlung dieser Werte eingesetzten Meßgeräte sind:

- Elektrisches Psychrometer (Firma Schenk, Typ 8016)
- Elektrisches Hygrometer (Firma Vaisala, Typ HM 11, Leihgabe
des Instituts f. Höhere Geodäsie)
- Aneroid (Firma Tommen, Typ 3 B4)
- Strahlungsbilanzmesser (Firma Schenk, Typ 8111)
- Elektrisches Bodenthermometer (Widerstandsthermometer)
- Schalenkreuzanemometer (Firma Schenk, Typ 8010)

Mit Ausnahme des Luftdrucks, der sich nur sehr langsam ändert, liegen sämtliche meteorologische Parameter in Form von elektrischen Meßwerten vor. Die Registrierung erfolgt auf einem Fallbügel-Punktschreiber, der zur gleichzeitigen Aufzeichnung von 6 Meßwerten geeignet ist.

Mit den zur Verfügung stehenden Geräten kann an zwei Punkten die Meteorologie gemessen und registriert werden.

Um Aussagen über die Gültigkeit des MO-Modells machen zu können, ist es unerlässlich, eine Kontrolle durchzuführen. Ein geeignetes Mittel dazu ist die Erfassung der meteorologischen Parameter in der Atmosphäre mit Hilfe eines Fesselballons.

An diesen Fesselballon wird eine Sonde mit den Meßfühlern für Temperatur, Feuchte und Druck angehängt. Die Meßdaten werden per Funk an ein Registriergerät gesendet.

Diese Meßanordnung ermöglicht es, den Temperatur- und Feuchtegradienten direkt zu messen und so die mit Hilfe des atmosphärischen Modells berechneten Gradienten wirksam zu überprüfen.

Obwohl das MO-Modell letztendlich zur exakten meteorologischen Reduktion elektronisch gemessener Distanzen dienen sollte, bietet auch die Distanzmessung Möglichkeiten, die Modellannahme zu überprüfen.

Dies geschieht wohl am besten durch den Vergleich der wahren Strecken mit den gemessenen und durch das MO-Modell reduzierten Distanzen.

Eine Schätzung des wahren Wertes kann aus gegebenen Landeskoordinaten, durch Dispersionsmessungen mit Licht- und Mikrowellen, aus 24stündigen Dauermessungen mit elektrooptischen Entfernungsmessgeräten oder anderen Methoden ermittelt werden.

Vom Institut für Landesvermessung wurden zur Distanzmessung zwei Geräte verwendet:

- elektrooptischer Entfernungsmesser Geodimeter 8
(Firma AGA)
- Mikrowellenentfernungsmesser DI 60 (Firma Wild)

7.2. BERECHNUNG DES MONIN-OBUCHOW MODELLS

Zur automatischen Berechnung des Modells müssen die auf einem Papierstreifen in Form von Meßkurven registrierten Daten digitalisiert werden. Dazu wird der Digitizer der Präzisions-

zeichenanlage Coragraph DC-2 der Firma CONTRAVES eingesetzt. Die digitalisierten Meßwerte werden auf ein Magnetband übertragen, um die weitere Auswertung auf der Großrechenanlage CDC-Cyber 74 vornehmen zu können.

Im Großrechner werden die Daten zuerst von groben Fehlern bereinigt, die Abszissen der Beobachtungszeit zugeordnet und Ordinaten in die gewünschten Dimensionen transformiert.

Zur Berechnung des MO-Modells dürfen keineswegs die für einen Zeitpunkt geltenden Werte verwendet werden, da die kurzzeitigen Schwankungen als stochastisch angesehen werden können. Es ist daher notwendig, den Erwartungswert dieser stochastischen Prozesse zu berechnen, die kurzzeitigen Schwankungen also durch einen Tiefpaßfilter zu eliminieren.

Dazu gibt es zahlreiche mathematische Methoden, wie z.B. eine Fourier-Analyse, Approximation durch Polynome oder eine glättende kubische Splinefunktion. Letztere Methode wird zur Berechnung herangezogen, da sie nur kurze Rechenzeiten erfordert und auch eine befriedigende mathematische Lösung darstellt.

Ein Beispiel für die Glättung der Trockentemperatur zeigt Fig. 4:

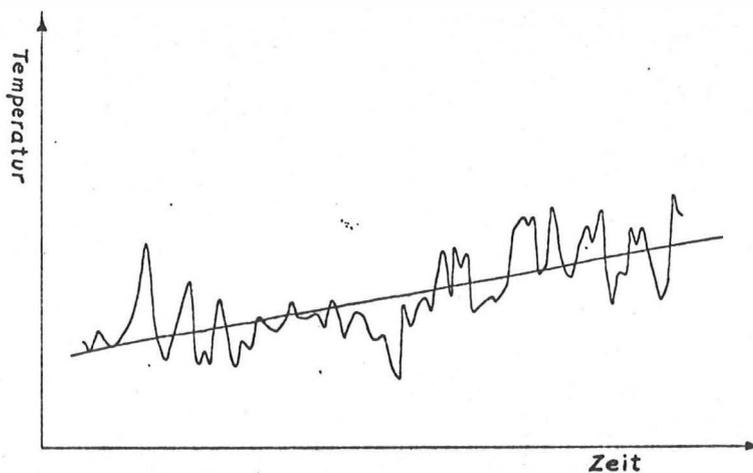


Fig. 4: Geglättete kubische Splineinterpolation

Die Berechnung des MO-Modells und die Reduktion der elektronisch gemessenen Seiten erfolgt gemäß dem, in den vorangehenden Kapiteln gebrachten Formelapparat ebenfalls auf dem Großrechner.

Erste Testmessungen wurden bereits im Herbst 1978 im Raume Wiener Neustadt auf der rund 27 km langen Strecke KT-Kaltenberg, Pfeiler Wandeck vorgenommen.

Die dabei erhaltenen Daten erlauben jedoch noch keine gesicherte Aussage über die Anwendbarkeit des MO-Modells zur Reduktion elektronisch gemessener Distanzen in unseren Gebieten. Ein Bericht über die Forschungsergebnisse wird zu einem späteren Zeitpunkt veröffentlicht werden.

8. SCHRIFTTUM:

- [1] BRETTERBAUER, K. (1969): Beiträge zur Distanzmessung mit Mikrowellen.
Österr.Zeitschrift f.Vermessungswesen
57, S.3 - 13
- [2] BRUNNER, F.K. (1977): Experimental Determination of the Coefficients of Refraction from Heat Flux Measurements.
Proc. Symp. Wageningen 1977
- [3] BRUNNER, F.K./FRASER, C.S. (1977):
Application of the Atmospheric Turbulent Transfer Model (TTM) for the Reduction of Microwave EDM.
Uniserv G 27, S. 3 - 26,
Univ. NSW, Sydney
- [4] BRUNNER, F.K./FRASER, C.S. (1977):
An Atmospheric Turbulent Transfer Model for Edm Reduction.
Proc.Symp. EDM-Ref., Wageningen 1977
- [5] GEIGER, R. (1961): Das Klima der bodennahen Luftschicht.
4. Auflage, Braunschweig.
- [6] JORDAN/EGGERT/KNEISSL (1956): Handbuch der Vermessungskunde, Bd. III: Höhenmessung, Tachymetrie. Stuttgart
- [7] JORDAN/EGGERT/KNEISSL (1966): Handbuch der Vermessungskunde, Bd. VI: Die Entfernungsmessung mit elektromagnetischen Wellen und ihre geodätische Anwendung.
Stuttgart

- [8] KUNTZ, E. (1969): Meteorologische Reduktion elektronisch gemessener Strecken aus Standbeobachtungen.
Allgem.Vermessungsnachrichten 76,
S. 286 - 292
- [9] MAIER, U. (1977): Genauigkeitsuntersuchungen zur elektrooptischen Messung langer Strecken.
Dissertation an der Universität Karlsruhe.
- [10] MÖLLER, F. (1973): Einführung in die Meteorologie.
B.I. Hochschultaschenbücher,
Band 276 und 288,
Mannheim.
- [11] MONIN A.S./OBUCHOW A.M. (1958): Fundamentale Gesetzmäßigkeiten der turbulenten Vermischung in der bodennahen Schicht der Atmosphäre.
Sammelband zur statistischen Theorie der Turbulenz,
hrsg. H. Goering, Berlin, S. 199 - 226
- [12] PETERS K. (1976): Entfernungsmessung mit Wellen.
Vorlesungsmanuskript,
Inst.f.Landesvermessung, TU-Wien
- [13] PRIESTLEY, C.H.B. (1959): Turbulent Transfer in the Lower Atmosphere.
Univ. Chicago Press
- [14] SLATYER, R.O./MC ILROY, I.C. (1961): Practical Microclimatology. UNESCO, C.S.I.R.O.
Australia

- [15] WEBB, E.K. (1965): Aerial Microclimate.
Meteorological Monographs, 6 (28),
S. 27 - 58
- [16] WEBB, E.K. (1975): Evaporation from Catchments.
Proc.Third Nat.Symp. on Hydrology,
"Prediction in Catchment Hydrology",
Canberra, S. 203 - 236.

Geowiss. Mitt. 15

1979, 257 - 307

KRUSTENBEWEGUNGSMESSUNG IM KARAWANKENPROFIL
UND AN DER TORSCHARTE

Von

K. PETERS

Univ.Doz.Dr.Kornelius Peters, Universitätsassistent am
Institut für Landesvermessung der Technischen Univ. Wien
1040, Gußhausstraße 27-29

Zusammenfassung

Nach einer kurzen Erwähnung der Problematik und der vermessungstechnischen Beobachtungsmethoden der Erdkrustenbewegungen, der Ansätze zum Nachweis von Bewegungen und der analytischen Darstellung des Trends, einschließlich eines einfachen Beispiels der Planung der Beobachtungsfolge bei linearem Bewegungsmodell, sowie des Begriffes des Strain-Tensors wird über zwei einschlägige Projekte des Institutes für Landesvermessung der TU Wien berichtet. Beide behandeln geologische Störungszonen in Kärnten.

An der Torscharte werden die dreidimensionalen Bewegungsvektoren zweier etwa 1100 m entfernter Pfeiler durch Wiederholungsmessungen mit Theodolit und konventionellem Kurzstreckendistanzer erfaßt. Die Bewegung wird an der Grenze Hohe Tauern (Hafnergruppe)/Nockgebiet (Stubeck) vermutet.

Im Karawankenprofil wird ein Netz mit Seitenlängen von 7 bis 15 km wiederholt beobachtet. Das ursprünglich nur zur Beobachtung der "periadriatischen Naht" gedachte Netz wurde über die Savelinie hinweg nach Jugoslawien erweitert; dieser Teil wird von slowenischen Fachleuten bearbeitet. Die Distanzen werden mit Lasergeodimeter beobachtet.

In beiden Fällen wurden in einem Beobachtungszeitraum von zwei Jahren noch keine signifikanten Bewegungen festgestellt.

1. Einführung

Die Bewegungsmessungen, früher ausschließlich Aufgabe der Ingenieurgeodäsie und des Markscheidewesens, umfassen ein immer größeres Interessengebiet der Landesvermessung, ja auch der Erdmessung. Abgesehen von meßtechnischen Beobachtungsverfahren, welche in von äußeren Einflüssen abgeschirmten Räumen unter Tage, möglichst mit automatischer Aufzeichnung, möglich sind, wie Tiltmeter, Schlauchwaagen, Gezeitenpendel usw., können Bewegungen der Erdkruste nur an der Erdoberfläche wahrgenommen werden. Die dort ggf. nachgewiesenen Bewegungen können nun sein: Erdkrustenbewegungen (im engeren Sinn) zufolge endogener tektonischer Kräfte; Bodenbewegungen hauptsächlich zufolge Schwerkraft, Verwitterung, menschlicher Eingriffe usw. im obersten Teil der Erdkruste.

Die Trennung der beiden Einflüsse ist eines der größten Probleme der Bewegungsmessungen, sowohl hinsichtlich Anlage als auch Auswertung. Dabei wirken sich Krustenbewegungen auch in gesteigerten Bodenbewegungen aus.

Das Interesse an Erdkrustenbewegungen reicht von der Erdgeschichte (in astronomischem und geologischem Sinn) über die erhofften Möglichkeiten einer Erdbebenvorhersage bis zur Standortwahl von Ingenieurbauten und Rohstoffgewinnung.

Wir wollen von den großzyklischen Krustenbewegungen, welche in geologischer Zeit ablaufen und durch geologisch-morphologische, paläographische und geophysikalische Methoden erforscht werden, absehen und uns auf die rezenten Krustenbewegungen beschränken. Diese ergeben sich vor allem an geologischen Störungslinien. Nur im Zusammenwirken aller Erdwissenschaften können die Krustenbewegungsmessungen sinnvoll werden:

Die geologische Synoptik liefert die interessanten Bereiche sowie dann die lokal günstigen Standorte für die Bezugspunkte, welche vor Bodenbewegungen geschützt sein müssen. Die Geophysik sollte, im Verein mit der Geologie, das vermutete Ausmaß und die Hauptrichtung der Bewegung angeben, um einen optimalen Netzaufbau zu gewährleisten. Der Geodät liefert die Meßresultate mit den zugehörigen statistischen Angaben über Vertrauensbereiche, unterstützt von geophysikalischen Messungen über Schwere, Magnetfeld, Spannungen usw. Die Geophysik erweitert oder revidiert ihre Modelle aufgrund der Messungen in Wechselwirkung mit den geologischen Vorstellungen (Beispiel: THURM et al. 1977).

Die Ursachen für rezente Krustenbewegungen sind mannigfaltig (SWOBODA 1967). Einen sehr instruktiven Einblick in das Konzept der Plattentektonik gibt WELSCH (1978).

Die mit Krustenbewegungen befaßten wissenschaftlichen Einrichtungen sind natürlich auch breit gestreut. Innerhalb der IUGG (Assoziation für Geodäsie, IAG) besteht eine sehr aktive interdisziplinäre Studiengruppe "CRCM" (Commission on Recent Crustal Movements).

1.1 Methoden der Beobachtung

Es sollen nur die nicht periodischen Bewegungen hinsichtlich ihrer Erscheinungen an der Erdoberfläche betrachtet werden.

Die Beobachtungsgenauigkeit und Methodik richtet sich im allgemeinen nach der vermuteten Größe und Richtung der Bewegung. Da meist nicht einmal qualitativ bekannt ist, ob Bewegungen stattfinden, sogar bei morphologischen Hinweisen, ist die größtmögliche Genauigkeit erforderlich, umso mehr, als man im Gegensatz zu günstigeren Gegebenheiten der Meßtechnik das Prinzip der Differenzmessung wegen der langen Zeitintervalle nicht anwenden kann. Für die Vertikalbewegungen wird allgemein das Präzisionsnivellement (mit höchster Genauigkeit bei gleichzeitig größtmöglicher Kilo-

meterleistung) verwendet.

Auch bei gleichzeitiger Horizontal- und Vertikalbewegungsmessung sucht man das Nivellement von der Lagemessung abzuspalten und über gesonderte arbeitstechnisch günstige Punkte (in Tälern, an Straßen, durch Eisenbahn- und Kraftwerkstunnel) zu legen. Nur bei kleinräumigen Netzen mit gleichzeitig sehr ungünstiger Topographie wird die trigonometrische Höhenmessung, meist mit Schrägdistanzen, verwendet; bei sehr großräumigen Netzen ist die Höhe in die Lage gleichfalls integriert (Doppler, Laser-Ranging zu oder von Satelliten, VLBI).

Unerklärliche Widersprüche zwischen verschiedenen Epochen routinemäßiger Nivellements in der Landesvermessung fanden ihre Erklärung in der Annahme vertikaler Krustenbewegungen und führten dann zum gezielten Einsatz dieser Methode für diesen speziellen Zweck, zu Rationalisierungen (motorisiertes Niv.) und Verfeinerungen. Hier ist aber sowohl das Fehlergesetz wie auch die anschauliche und noch relativ leicht in Elementarlinien zerlegbare Messungsanordnung einer Deutung zugänglich.

Bei der Wiederholung von Triangulationen der Landesvermessung gibt es hier nur in Sonderfällen schlüssige Aussagen, wie z.B. bei der hervorragend vermarkten NAGEL/HELMERT'schen Triangulation im Südostteil der DDR (THURM et al. 1977).

Der Vergleich japanischer Triangulationen I.Ordnung verschiedener Epochen (HARADA, SHIMURA 1979) bringt zwar Bewegungsvektoren bis weit über 10^{-5} der Seitenlängen, welche die Verfasser an "Taifuns und Hurrikane der Erdkruste" (in ihrer blumigen Sprache), mich aber an die Vektoren bei der Zweitausgleichung des österreichischen Dreiecksnetzes erinnern (LITSCHAUER 1973) und von Epoche zu Epoche keine irgendwie sinnvolle Fortsetzung finden. Die weitaus meisten Lagemessungen sind also Sondernetze und können wiederum meist derzeit erst als Nullmessungen angesehen werden, da Laserdistanzer hierbei die wichtigste Rolle spielen.

1979 sind die VLBI Technologien in der Praxis erst der konventionellen Technik ebenbürtig, wie ein Vergleich über 42 km in Kalifornien zeigte ($\pm 2 \cdot 10^{-6}$ innere Genauigkeit, $1,5 \cdot 10^{-6}$ Übereinstimmung mit Lasergeodimeter, d.s. ca. 6 cm).

Satellite Laser Ranging mit Impulslaser an der St. Andreas-Falte brachte ein zwiespältiges Resultat: einerseits wird die erste Längenverschiebung ($\Delta \lambda$) in Ost-West für eine Station als "nicht real" bezeichnet, die aus den geographischen Koordinaten abgeleitete Streckenänderung von (9 ± 3) cm pro Jahr für 895 km, d.s. auf 2 Jahre ca. $2 \cdot 10^{-7}$, wegen der gleichlautenden Folgeänderung als hochsignifikant gewertet (SMITH et al. 1979).

In kleinen Bereichen sind die Technologien geläufig: entweder möglichst gut konditionierte Trilaterationsnetze mit Lasergeodimeter, wie z.B. in Tasmanien zur Überprüfung des Einflusses großer Einstauungen, ca. 100 x 50 km Gesamterstreckung (LINTON 1974) oder das bekannte Rheingraben-Netz (KUNTZ et al. 1975) von etwa 40 x 50 km, wobei stolze Genauigkeiten von $6 \cdot 10^{-7}$ bzw. $3 \cdot 10^{-7}$ bei Strecken bis zu 40 km angegeben werden, oder von einem Standpunkt aus über den Horizont gleichmäßig verteilte radiale Strecken (Garm im Tianschan, UdSSR; Zweifarben-Laser-Messungen von HUGGETT & SLATER), in noch kleineren Bereichen, wenn die Störung bekannt und linienhaft ist, Richtungs- und Streckennetze kombiniert (WELSCH 1978 in den Anden, GERKE 1967 Island, CAPUTO et al. 1974 Straße von Messina) oder sogar nur reine Richtungsnetze, wie bei klassischen Deformationsmessungen, mit ggf. Sondernetzen (HRADILEK 1977 in der Hohen Tatra). Eine interessante Technologie wird von MASON et al. 1979 beschrieben: über eine vermutete Störungszone wurde ein Netz von Diagonalenquadraten aus ca. 500 Mekometerstrecken von ca. 800 m Länge gelegt und aus den Streckenänderungen auf Bewegungen geschlossen (Vermarkung einbetonierte Rohre, Genauigkeit $3 \cdot 10^{-6}$ d.s. ca. $7 \cdot 10^{-6}$ als 95% Signifikanzgrenze für Streckenänderung).

Die Zeitabstände waren meist 2 Jahre, was teils bei großen einfach überbrückten Strecken oder hohen Absolutgenauigkeiten bereits signifikante Bewegungen zeigte, meist aber, vor allem bei den uns geläufigen Netzformen, nur als Verstärkung der Nullmessung dienen mußte, wenn nicht wegen des hohen Aufwandes nur eine Nullmessung zustandekam.

1.2 Methoden der Auswertung

Die Auswertung umfaßt zwei Problembereiche: die Feststellung der Signifikanz von Bewegungen sowie die Modellierung der Bewegungen (Trendberechnung); diese führt eher auf die Planung der Beobachtungszeitabstände ("Design der 4. Koordinaten"), jene zur konventionellen Netzkonzeption hinsichtlich stochastischem und physikalischem Modell (Grundgenauigkeit, Netzform). Die beiden Hauptgruppen lassen sich aber nicht streng trennen und haben auch im Organisationsplan keine ausgeprägte Priorität: aus dem voraussichtlichen Bewegungsverhalten ist die Netzgenauigkeit abzuleiten; aus den mehr oder weniger sicher nachgewiesenen Bewegungen, ihrer räumlichen und betragsmäßigen Verteilung kann ein mehr oder weniger einfacher Trendansatz gewonnen werden.

1.2.1 Signifikanz der Bewegungen

Bewegungen können gemutmaßt werden aus Änderungen von Koordinaten und aus Änderungen von Netzelementen (Beobachtungen, Koordinatenfunktionen; im weiteren Sinne auch Koordinatendifferenzen). Eine Mischform ist die Untersuchung des Residuums bzw. des mittleren Gewichtseinheitsfehlers.

Die Signifikanz wird untersucht mit Vertrauensintervallen unter Annahme von ausschließlich Fehlern erster Art (mit a priori und a posteriori Varianzen); unter Berücksichtigung von Fehlern zweiter Art unter Vorgabe einer Alternativhypothese (von Geologen vorzugebende "erwartete" Bewegung) oder deren Berechnung nach der Zuverlässigkeitstheorie.

Leider ist in der Literatur hier keine Systematik zu bemer-

ken. Je strenger ein Verfahren, desto weniger anschaulich ist es meist und desto schwerer zugänglich sind seine EDV Programme, desto eher wird man es nur auf ein umfangreiches Netz anwenden.

Bei Nullhypothesen (Fehler 1.Art) werden häufig 95% Sicherheitswahrscheinlichkeit ($\alpha = 5\%$) angewendet, wie in der Industrie üblich; bei Alternativhypothesen und in den vorliegenden EDV Programmen nach Zuverlässigkeit hiezu aber meist $\alpha = 1\%$, $\beta = 80\%$ (Macht des Tests) anstelle von 5% bzw. 95% (bei der normierten Normalverteilung sind die zugehörigen Minimalverschiebungen 4,6 bzw. 3,9; bei empirischen Varianzen sind die Vertrauensgrenzen bei den erstgenannten Wahrscheinlichkeiten im Verhältnis zu den zweitgenannten noch größer). Allerdings ist hier das Risiko meist etwas anders verteilt wie bei Deformationsmessungen an Bauwerken (GROSSMANN 1969), wo Fehler 2.Art besonders folgenschwer sind. Bei "wertfreien" Messungen (also nicht zur Erdbebenvorhersage usw.) wird man α und β kleiner als sonst annehmen.

1.2.1.1 Bei Betrachtung der Koordinatenänderungen zeigt sich die Definition der "Festpunkte" als wichtigstes Problem.

Im einfachsten Fall können vom Geologen Bereiche angegeben werden, wo keine Bewegungen zu erwarten sind; dort werden jene Punkte angelegt, die später als "Festpunkte" für die als "Neupunkte" behandelten Punkte im Bewegungsgebiet dienen. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen, ggf. auch wegen Verwuchs, Verbauung usw. werden die Festpunkte untereinander bei den Folgemessungen meist nicht mehr beobachtet. Die Kondition der Neupunkteinschaltung ist meist nicht so gut wie in der Landesvermessung, da diese von einer Seite aus bestimmt werden. (Abb. 1a).

Bei ausgedehnteren Netzen werden manchmal aus geometrischen Gründen Punkte beiderseits des Bewegungsgebietes als "fest" angenommen. (Abb. 1b).

Abb. 1a

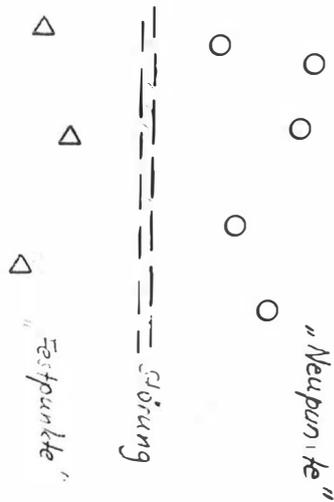
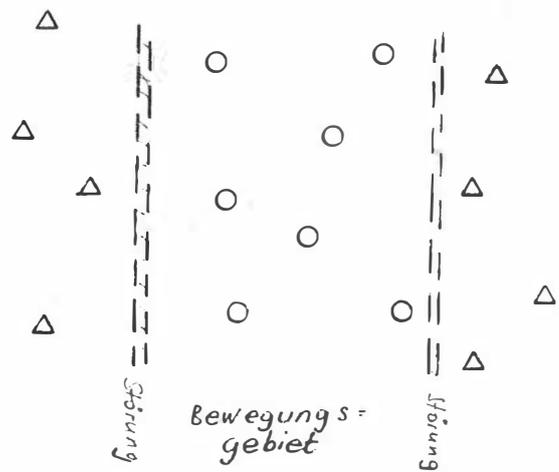


Abb. 1b



Im letztgenannten Fall vor allem, aber auch sonst ergeben sich durch Festpunktbewegungen Zwänge, welche sich in gesteigerten Widersprüchen und Verfälschungen der "Neupunkt-bewegungen" äußern. Trotzdem wird dieses Verfahren wegen der klaren Fragestellung und der Anschaulichkeit zu empfehlen sein. Wiederholungsmessungen werden entweder konventionell von den Festpunkten aus "hierarchisch" berechnet (häufigster Fall) oder nach dem "ACKERMANN-Verfahren" in die Festpunktfelder einzupassen sein, wenn die Datenstruktur es erlaubt.

Beispiele für Signifikanztests auf Bewegungen aus Koordinatenänderungen:

Eindimensional: Nullhypothese: "Keine Veränderung in x";
Vertrauensintervall für die Differenz der als unkorreliert angenommenen x Koordinaten zu beiden Epochen; ebenso für y (sehr anschaulich in REISSMANN Kap.8.4). Nullhypothese: Die Strecke zwischen den Koordinaten eines Punktes aus zwei Epochen ist Null (Test der Länge des Verschiebungsvektors). Dies wird von GERKE (1967) beschrieben. Man mag nun einwenden, daß die Länge des Verschiebungsvektors nie kleiner als Null sein kann, daher die Studentverteilung hier unkorrekt angewendet werde. Das System ist aber m.E. richtig, da man sich ein lokales Koordinatensystem in

Richtung des errechneten Verschiebungsvektors vorstellen kann und dieses Verfahren dann dem nach REISSMANN (s.o.) entspricht.

Zweidimensional: Konstruktion der Vertrauensellipse für die Erstmessung und die Zweitmessung, Überprüfung auf gemeinsame Bereiche (erfaßt gleichzeitig auch Fehler 2.Art).

Aus der "Zuverlässigkeitsrechnung": BAUMANN schlug 1972 bzw. 1974 vor, als signifikante Deformation (Koordinatenänderung) jenen Schwellenwert zu nehmen, welcher gerade durch einen noch erkennbaren groben Fehler in der hier wirksamsten Beobachtung bewirkt würde.

Sind die Festpunkte nicht per definitionem festgelegt, sondern soll erst aus der Wiederholungsmessung auf feste und verschobene Punkte geschlossen werden, liegen verschiedene Näherungsverfahren sowie das strenge aber aufwendige PELZER-Verfahren vor (natürlich können auch bei "definiertem" Festpunktsystem sich "Neupunkte" ruhig verhalten, ev. sogar auch Festpunkte bewegen).

Der Grundgedanke des PELZER-Verfahrens folgt dem Nachweis, daß die empirische Varianz beider Messungsepochen, konventionell getrennt berechnet und dann zusammengeführt, immer dann gleich ist der aus den Klaffungsvektoren der jeweils singulär ausgeglichenen Epochen gewichtet geschätzten Varianz, wenn kein Punkt von Epoche zu Epoche verschoben wurde. Dies ist auch anschaulich und läßt einen globalen F-Test auf unveränderte Gegebenheiten zu. Wird die Nullhypothese abgelehnt, müssen durch fortschreitende Matrizenoperationen und neuerliche globale F-Tests zuerst die definierten Festpunkte, dann innerhalb dieser Gruppe die unveränderten Punkte herausgeschält werden. Die Schwierigkeit dabei liegt in der Berechnung der korrekten Gewichtsmatrix für die Koordinatenklaffungen und in der Simulation der weiteren Helmerttransformationen bei der Einengung der verschobenen Punkte (NIEMEIER 1976).

Näherungsverfahren: Ist die a posteriori- (empirische) Varianz signifikant größer als die a priori-Varianz, wenn grobe Meß- und Gewichtfehler bereits eliminiert sind, ist eine Festpunktverschiebung zu vermuten.

Methode der variablen Festpunkte (LAZZARINI, BAUMANN 1972, Seite 58): Das Netz wird frei durchgerechnet mit jeweils einem (Höhen) oder zwei (Lage) willkürlich als fest angenommenen Netzpunkt. Aus den mehr oder weniger von Ausgleich zu Ausgleich bzw. von Neupunkt zu Neupunkt aufgetretenen Verschiebungen können veränderte Punkte identifiziert werden. Ist besonders bei Nivellementnetzen angenehm und kann graphisch noch weiter vereinfacht werden, wenn ein Punkt als fest angenommen werden kann und sodann ein Isobasenplan (Linien gleicher Höhenänderung) zur Punktidentifikation dient.

1.2.1.2 Die Schwierigkeiten mit Koordinaten kann man durch Testen der Netzelemente umgehen (Höhenunterschiede, Strecken, ggf. Winkel). Dabei können sowohl Beobachtungen zweier Messungsepochen oder die Funktionen von Koordinaten untereinander als auch miteinander verglichen werden. Wie oben gebührt a priori-Varianzen bei geringen Freiheitsgraden der Vorzug vor empirischen.

Diese Methode ist auch besonders vorteilhaft bei der singulären Netzausgleichung, da die Elemente hier nicht durch Festpunktzwänge verzerrt werden, andererseits dort aber die Koordinaten selbst durch die implizierte Helmerttransformation nicht das Bewegungsverhalten wiedergeben.

Beim Rangdefizit ist zu beachten, daß heute in fast allen Netzen Strecken enthalten sind, daher keine Maßstabsunbekannte ermittelt werden darf! Es mag zwar verführerisch erscheinen, eventuelle Maßstabsfehler oder Inhomogenitäten (z.B. durch Brechungsindex, Frequenzverschiebung) auf diese Art bequem und mit "gutem Grund" zu verdrücken, aber dadurch werden vor allem flächenhafte Deformationen verzerrt und gedämpft.

In kleinen Netzen können beim singulären Ausgleich bewegte Punkte fix, unbewegte gestört erscheinen (KRAUS 1976).

Die Untersuchung der Elemente anstelle von Koordinaten liegt im Einklang mit der Erkenntnis, daß man keine Absolut- sondern nur Relativbewegungen messen und nachweisen kann.

Schwieriger ist dann die endgültige Darstellung der neuen Situation, nach der Folgemessung. Entweder werden die Koordinaten aus der Folgemessung der Vorepoche nur hinsichtlich der geänderten Elemente variiert oder sie werden konventionell neu berechnet, aber Änderungen als solche nur in den signifikanten Bereichen (vektoriell) eingetragen.

Generell kann man sagen, daß die strengen Verfahren nicht nur wegen ihrer schwierigen Zugänglichkeit selten angewendet werden, sondern weil der Bedarf nicht so groß wie in der Ingenieurgeodäsie besteht. Bewegungen an oder unter der Signifikanzschwelle sollten auf keinen Fall für geodynamische Schlüsse verwendet werden, und diese Schwelle liegt nun einmal beim 4-fachen mittleren Beobachtungsfehler bzw. dessen Auswirkung auf die Koordinate.

1.2.2 Trendberechnungen

Die bewegten Punkte beschreiben einen Zufallsprozess mit dem Parameter "Zeit". Hierin sind enthalten die Meßfehler bei jeder Epoche, welche sich als hochfrequenter Anteil zeigen; mittelperiodische "Störglieder" (lokale Änderungen der Vermarkungen, Bodenbewegungen usw.) sowie langperiodische "echte" Krustenbewegungen. Wenn allerdings die Bewegungen, z.B. Entspannungen entlang Störungen, ruckartig vor sich gehen, wie sich häufig in der Praxis gezeigt hat, lassen sich diese Modelle nicht rechnerisch verwirklichen.

Der klassische Ansatz für eine Trendberechnung wäre somit das Kollokationsverfahren; hierfür sind aber die Informationen zu gering und die Zeitabstände zwischen den Beobachtungen zu groß.

Die nächste Vereinfachungsstufe wäre die "Filterung": durch ein rechnerisches oder graphisches "Tiefpaßfilter" werden die hochfrequenten Anteile (Meßrauschen, Störuschen) weggebracht. In der Praxis kennen wir an Tiefpaßfiltern z.B. das gleitende Mittel, die Ausgleichsgerade, die empirische Freihand-Anpassungskurve (im eindimensionalen Bereich, also für eine Koordinate oder Richtung). Ohne Filterung liegt dann z.B. eine Schar von Setzungsdiagrammen oder eine großmaßstäbliche Folge von Bewegungsvektoren (in einer kleinmaßstäblichen Kartierung) vor. Wegen ihrer einfachen Form ist die Ausgleichsgerade besonders verbreitet, da im Trendansatz nur eine relevante Unbekannte vorkommt: der Geradenanstieg (jährliche Änderungsrate); dabei wird eine gleichmäßige Bewegung angenommen, welche immer in die gleiche Richtung wirkt (in jedem Sinn).

1.2.2.1 Es folgt ein Beispiel über die Anwendung der Fehler- und Zuverlässigkeitsrechnung bei der Beurteilung der Messungszeitpunkte unter Annahme eines linearen Trends. Die Beobachtungen werden gleich genau und unkorreliert angenommen, es werden vorerst keine Vertrauensintervalle betrachtet. Die entsprechenden Formeln lauten ($\sigma_0 = 1$, $P_{ll} = E$ gesetzt):

$Q_{xx} = (A^T A)^{-1}$	Kov.Matrix der Unbekannten;
$Q_{vv} = E - A Q_{xx} A^T$	Kov.Matrix der Verbesserungen; die Hauptdiagonale ist der Redundanzanteil bzw. Redundanzbeitrag der entsprechenden Beobachtung; die Spur soll damit gleich sein der Gesamtredundanz.
$\nabla l_i = \frac{1}{Q_{v_i v_i}}$	grober Fehler in einer Beobachtung, welcher gerade noch aufgedeckt werden kann (vereinfachte Beziehung).
$\nabla x = Q_{xx} A^T \nabla l$	Auswirkung von ∇l auf die Unbekannten. Uns interessiert hier nur die "zweite" Unbekannte, daher von $Q_{xx} A^T$ nur die

zweite Zeile, davon die größten Glieder; von $\nabla 1$ auch wieder nur die größten Glieder.

Nehmen wir an, es wird beobachtet in den Jahren

0,1	0,10	0, 5, 10	0, 2, 4, 6, 8, 10
-----	------	----------	-------------------

Dann lauten die entsprechenden Matrizen und Resultate wie folgt:

Zeile	Spalte Nr.	1	2	3	4	
1	A^T	$\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 10 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 5 & 10 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 4 & 6 & 8 & 10 \end{vmatrix}$	
2	Q_{xx}	$\begin{vmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 2 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1 & -0,1 \\ -0,1 & 0,02 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0,83 & -0,1 \\ -0,1 & 0,02 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0,524 & -0,071 \\ -0,071 & 0,014 \end{vmatrix}$	
3	$(\text{Diag. } Q_{VV})^T$	0 0	0 0	0,17 0,67 0,17	0,48 0,70 0,82 0,82 0,70 0,48	
4	$\text{Sp}Q_{VV}$	0	0	1,01	4,00	
5	m_{x_2}	1,4	0,14	0,14	0,12	$[\sigma_0 \cdot a^{-1}]$
6	$\nabla 1_{\max}$	-	-	2,43	1,44	$[\sigma_0]$
7	$\nabla x_{2\max}$	-	-	0,24	0,10	$[\sigma_0 \cdot a^{-1}]$

Tab. 1

Die Genauigkeit der jährlichen Bewegung (Zeile 5) ist proportional dem gesamten Beobachtungszeitraum (Sp. 1, 2); Verdichtung schafft kaum Genauigkeitsgewinn (Sp. 2 bis 4). Bei nur 2 Beobachtungen gibt es natürlich keine überschüssigen (Zeile 4, Sp. 1, 2). Bei 3 Beobachtungen ist die mittlere besonders redundant (Zeile 3, Sp. 3); bei weiterer Verdichtung werden die Beobachtungen immer gleichwertiger (Zeile 3, Sp. 4) - aus Zeile 3 ist die "innere Zuverlässigkeit" zu

sehen. Aus Zeile 7 sieht man die "äußere Zuverlässigkeit" - diese steigt sehr stark mit der Verdichtung der Messungen, wobei sich, wie auch aus Zeile 3 und 6 zu sehen ist, ein Fehler in der Nullmessung umso stärker auswirkt, je geringer die Anzahl der Beobachtungen ist. (Die Zuverlässigkeitsrechnung wurde von REICHENEDER 1941, BAARDA 1968 begründet, von CONZETT 1970 im deutschen Sprachraum wiederentdeckt und außer durch VAN MIERLO besonders anschaulich von BAUMANN (1972) und FÖRSTNER (1979) beschrieben).

Um auf das Vertrauensintervall der jährlichen Änderung zu kommen, muß Zeile 5 mit der a priori Beobachtungsgenauigkeit σ_0 und dem Fraktile der normierten Normalverteilung erweitert werden.

Bei der Beobachtungsanordnung Sp. 4, $\sigma_0 = \pm 2$ cm, $S = 95\%$, $u = 1,96$ ist das Vertrauensintervall z.B. $2 \times 0,12 \times 1,96 = 0,47$ cm pro Jahr, d.h. nach 10 Jahren wären erst absolut 5 cm Verschiebung signifikant festzustellen; nach Sp. 1 und denselben anderen Daten ergibt sich absolut ca. 5,5 cm (nach einem Jahr feststellbar), hier aber auch 5,5 cm je Jahr.

Wäre die vermutete Bewegung 1 mm je Jahr, würde im erstgenannten Fall ein Beobachtungszeitraum von ca. 50 Jahren bei Beobachtung etwa alle 10 Jahre, oder aber eine Erhöhung der Grundgenauigkeit auf $\sigma_0 = \pm 4$ mm erforderlich.

Anders ist der Fall aus dem Blickwinkel der "äußeren Zuverlässigkeit". Hier wäre Spalte 7 mit σ_0 und $\sqrt{\lambda_0}$ (dem "Nicht-zentralitätsparameter", bei σ_0 a priori sowie $\alpha_0 = 1\%$ und $\beta_0 = 80\% \Rightarrow 4,13$) zu erweitern.

Bei der Beobachtungsanordnung Spalte 3, $\sigma_0 = \pm 2$ cm wäre die minimal feststellbare Änderung $2 \times 0,24 \times 4,13 = 2$ cm pro Jahr. Wäre die vermutete Bewegung 1 mm pro Jahr, müßte man in den Jahren 0, 100 und 200 beobachten bei sonst gleichbleibenden Verhältnissen, um zu einem signifikanten Resultat zu kommen. Hier wäre (wenn man z.B. nur 3 Messungen machen will) σ_0 für Nullmessung und letzte Messung auf $2 \text{ cm} \times \sqrt{\frac{0,17}{0,67}}$ zu senken,

um die Zuverlässigkeiten der Messungen anzugleichen, das wäre also ± 1 cm für diese Beobachtungen (bei Jahr 0 und 100) und ± 2 cm bei Jahr 50.

Wie sich in der Erfahrung gezeigt hat, sind stetige Bewegungen, besonders über längere Zeitabschnitte, in der Natur sehr selten aufgetreten, so daß eine Modellierung des Trends hauptsächlich rechnerische Annehmlichkeiten bietet.

1.2.2.2 Geschlossene Darstellungen:

Die Vertikalbewegungen werden durch Linien gleicher Änderung (Isobasen), oft auch Linien gleicher jährlicher Bewegung dargestellt. In dieselbe kleinmaßstäbliche Grundrißkarte trägt man auch die Linien gleicher mittlerer Fehler ein. Da die Isobasenkarten aus räumlich und zeitlich inhomogenen Nivellements, meist nur aus der Differenz zweier Epochen, ermittelt werden, haben sie eher qualitativen als quantitativen Wert. In nivellementfreien Gebieten wird gemäß der Topographie inter- und extrapoliert ("je höher das Relief, desto größer die Hebung").

Um die Lageänderungen zu objektivieren und gleichzeitig für den Geophysiker schmackhafter zu machen, hat sich in letzter Zeit die Berechnung des "Strain-Tensors" verbreitet (THURM et al. 1977). Während der "Strain-Tensor" die Verzerrungen (Lageänderungen pro Streckeneinheit) beschreibt, bedeutet der "Stress-Tensor" den aus dem HOOKE'schen Gesetz daraus abzuleitenden Spannungstensor.

Im Bewegungsgebiet werden Verschiebungsfunktionen angenommen, welche jeweils Ortsfunktionen (abhängig von den Lagekoordinaten des betrachteten Punktes) sind, und zwar der Einfachheit halber eine in Nord-Süd-Richtung wirkende: $U(x, y)$, sowie eine in Ost-West-Richtung: $V(x, y)$. Der Verzerrungstensor ist nunmehr:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial U}{\partial x} & \frac{\partial V}{\partial x} \\ \frac{\partial U}{\partial y} & \frac{\partial V}{\partial y} \end{pmatrix}$$

Seine Komponenten sind dimensionslos, damit wird auf relative Bewegungen übergegangen. Sie werden meist in mm je km (also Einheiten 10^{-6}) angegeben und können entweder Absolutwerte sein oder auch noch pro Jahr reduziert werden ($10^{-6} \cdot a^{-1}$).

Nun wird der Strain-Tensor in einen symmetrischen und einen antimetrischen Teil zerlegt:

$$T_s = \begin{pmatrix} \frac{\partial U}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) & \frac{\partial V}{\partial y} \end{pmatrix} \quad T_a = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial x} \right) & 0 \end{pmatrix}$$

Die Spur von T_s nennt man "Dilatation" Δ ; die Summe seiner anderen Glieder "Scherstrain" (shear) γ .

Vorzeichen der Komponenten $\epsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x}$, $\epsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y}$ und von Δ :
+ ... Extension; - ... Kompression.

Das Glied von T_a nennt man "Rotation" ω ; ist $\frac{\partial V}{\partial x} > \frac{\partial U}{\partial y}$ ist $\omega > 0$ und beschreibt eine Rechtsdrehung (im Uhrzeigersinn).

Vergleichbar der Fehlerellipse gibt es Hauptstrainrichtungen $\Theta_1 = \frac{1}{2} \arctg \frac{\gamma}{\epsilon_x - \epsilon_y}$; $\Theta_2 = \Theta_1 + 90^\circ$ sowie den Hauptstrain

$$\epsilon_1 = \epsilon_x \cos^2 \Theta_1 + \gamma \sin \Theta_1 \cos \Theta_1 + \epsilon_y \sin^2 \Theta_1$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_x \cos^2 \Theta_2 + \gamma \sin \Theta_2 \cos \Theta_2 - \epsilon_y \sin^2 \Theta_2$$

Die Strainkomponenten können offensichtlich aus Koordinatenbewegungen oder auch aus Veränderungen von Netzelementen (durch deren Projektion auf die Koordinatenachsen) errechnet werden und sind damit ein universelles Darstellungsmittel, das dabei physikalisch brauchbar ist.

Beispiel: Zwischen 2 Punkten hat eine Relativbewegung stattgefunden (Maßstab 1:1); die gegenseitige Lage der Punkte sei 1:1 000 000 dargestellt.

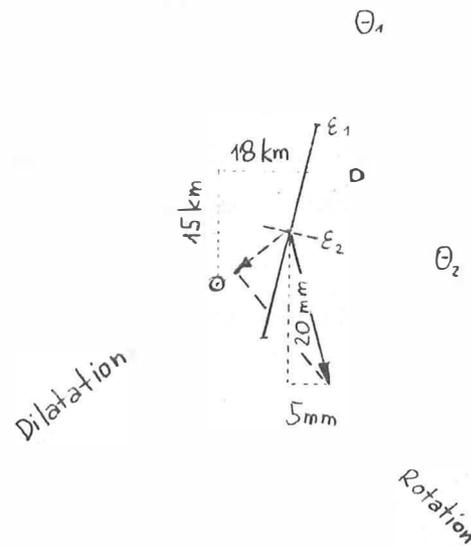


Abb. 2

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{20}{15} = 1,33 & \frac{\partial v}{\partial x} &= -\frac{5}{15} = -0,33 \\ \frac{\partial u}{\partial y} &= \frac{20}{18} = 1,11 & \epsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{5}{18} = -0,28 \\ \Delta &= 1,33 - 0,28 = 1,05 \cdot 10^{-6} \\ \gamma &= 1,11 - 0,33 = 0,78 \cdot 10^{-6} \text{ (nicht anschaulich)} \\ \omega &= \frac{1}{2} (-0,33 - 1,11) = -0,72 \cdot 10^{-6} \\ \Theta_1 &= 14^\circ & \epsilon_1 &= 1,41 \cdot 10^{-6} & \epsilon_2 &= -0,36 \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

In der DDR wurden die aus Triangulierungsvergleich erhaltenen Nord-Süd- bzw. Ost-West-Bewegungen getrennt als Iso-
linien kartiert und die Komponenten des Straintensors je-
weils mit einem über Rastermarken gelegten transparenten
Rasterfeld graphisch abgelesen (aus Differenzbildung der
Schichtlinien). Bei größeren Datenmengen könnte die gesamte
Strainanalyse aus einem digitalen Modell heraus erfolgen.

Auch bei den Vertikalbewegungen ist man teilweise zu einem
Relativmaß übergegangen: zum "tilt" (Kippung) ausgedrückt im
Bogenmaß (Setzungs- bzw. Hebungsdifferenz je Abstand, also
auch in mm je km oder 10^{-6} rad).

Die bisher nachgewiesenen Vertikalbewegungen liegen bei 1 mm a^{-1}
 a^{-1} in mäßig bewegten, bis zu 10 mm a^{-1} in stark bewegten
Gebieten; die Horizontalbewegungen werden beim drei- bis
fünffachen vermutet, die Dilatationen liegen dort zwischen

$0,2 \cdot 10^{-6} \cdot a^{-1}$ bis $1 \cdot 10^{-6} \cdot a^{-1}$, immer aus langfristigen Beobachtungen bestimmt, ungeachtet ruckartiger Vorgänge bzw. Beziehungen direkt beiderseits von Störungen.

2. Messungen des Institutes für Landesvermessung der TU Wien

Entsprechend seinem Aufgabenbereich in Lehre und Forschung wurde das Institut für Landesvermessung unter der Leitung von Univ.Prof.Dr.H.SCHMID zu geodätischen Krustenbewegungsmessungen eingeladen. (In den von RINNER 1974 aufgezeigten 6 geodynamisch interessanten Profilen ist unser Institut seit 1973/74 an zweien tätig; in den weiteren sind mir derzeit persönlich zumindest keine Lageuntersuchungen bekannt, siehe SCHMID 1976).

Diese Arbeiten laufen natürlich nicht selbständig und als Selbstzweck, sondern im Rahmen von geodynamisch-geophysikalischen Projekten. Interessanterweise liegt der Anteil der Vermessungs- an den Gesamtkosten hier wie in der Ingenieur-geodäsie bei 1% (dort Vermessungs- zu Gesamtbaukosten).

Unser Status ist dort aber wesentlich besser, als er es am Bau noch vor kurzem war. Die Kollegen der Erdwissenschaften vertrauen unserem technischen Können wie auch unserem Idealismus schrankenlos: es besteht einerseits so großes Interesse an verbreiteten Meßresultaten, daß wir von verschiedenen Seiten gebeten wurden "Messen Sie, messen Sie was Sie können", andererseits wird offensichtlich angenommen, daß wir ohne die geodynamische Zielsetzung eben wo anders, wertfrei aber mit demselben Aufwand vor uns hinmessen würden, so daß die Hinweise auf geodynamische Problemgebiete eigentlich eine Dienstleistung an uns seien und nicht unsere Messungen eine solche an die Erdwissenschaft.

Die Zusammenarbeit mit den Vertretern der Erdwissenschaften (im engeren Sinn - die Geodäsie strenger Richtung ist ja nach ihrem Selbstverständnis selbst eine) war für uns in vieler Hinsicht lehrreich und fruchtbar: vordergründig durch eine Sinngebung für unsere Arbeit (s.o.!), dann den steten Hin-

weis auf die nötige Berücksichtigung geologisch-geographisch-bodenmechanischer Gesichtspunkte in unserem Aufgabengebiet "Festpunktfeld", wobei wir oft an frühere Gedankenlosigkeit in dieser Richtung erinnert wurden.

Interessant war auch die verbreitete Information der Geologen hinsichtlich der neuen meßtechnischen Methoden, woraus ein unbeirrbarer Optimismus resultierte: Die Ergebnisse erfolgreicher und phantasiebegabter Geodäten, mitgeteilt auf geodynamischen Fachkongressen und in Jubelpublikationen ("cm Genauigkeit zum Mond", "Distanzergenauigkeit $3 \cdot 10^{-7}$ ", "Erdkrustenbewegungsmessungen global auf $3 \cdot 10^{-8}$ ", "Mekometer auf 0,1 mm", "Krustenbewegungen heute nur mehr extraterrestrisch") steigerten die Erwartungen in baldige Ergebnisse unsererseits. Das Umsetzen der Angaben der mittleren Nivellementfehler aus Isobasenkarten von ± 1 mm (... a^{-1} bei 80 Jahren Beobachtungsabstand) auf die trigonometrische Höhenmessung war ebenso ernüchternd wie die Tatsache, daß wir ohne Satelliten auskommen mußten. Zu unserer Ehrenrettung flackerte der Laser im AGA 8 als Fortschrittsfackel.

Nachdem sich die Vermessungstechnik also als überraschend unexakte Kunst erwiesen hatte, stellte sich für uns wieder heraus, daß in der Natur Störung an Störung liegt und daher ein maximaler Punktabstand von 1000 m, bei jährlicher Beobachtung, zweckdienlich wäre. Ein Denken in Kategorien wie "Neupunkt", "Festpunkt" erwies sich als völlig unhaltbar. Jede zusätzliche Messung in der Netzgeometrie, jeder zusätzlicher Punkt bringt keine Steigerung der Netzstärke, sondern eine zusätzliche Information über das Bewegungsverhalten, also Verlust an geometrischer, Gewinn an geologischer Information.

Daher mußte auch die "innere Zuverlässigkeit" der Netze auf geometrischer Grundlage zurückgestellt werden zugunsten Zuverlässigkeit in der Zeitreihe: "Gering redundante bzw. zuverlässige Messungen, häufig ausgeführt" anstelle von "Hoch redundant und durchgreifend aus dem Netz kontrollierte Messungen, selten ausgeführt".

2.1 Das Projekt "Torscharte"

1973 wies Prof.Dr.EXNER (Geologisches Institut d.Univ.Wien) a.o.Prof.Dr.MITTER im Rahmen des "Internationalen Geodynamik-Projektes" (IGP) auf die Problematik im Bereich der Torscharte hin: dort treffen auf engstem Raum die Hohen Tauern (Hafnergruppe, Reitereck/Sternspitze) und Nockgebiet (Stubeck) aufeinander, wobei auf engem Raum signifikante Bewegungen zu erwarten wären (EXNER 1973).

GEOLOGISCHES PROFIL DURCH DIE TORSCHARTE MIT KENNZEICHNUNG DER ZERRÜTTUNGSZONE

Maßstab ~ 1:25 000

Entworfen von CH. EXNER, 1973

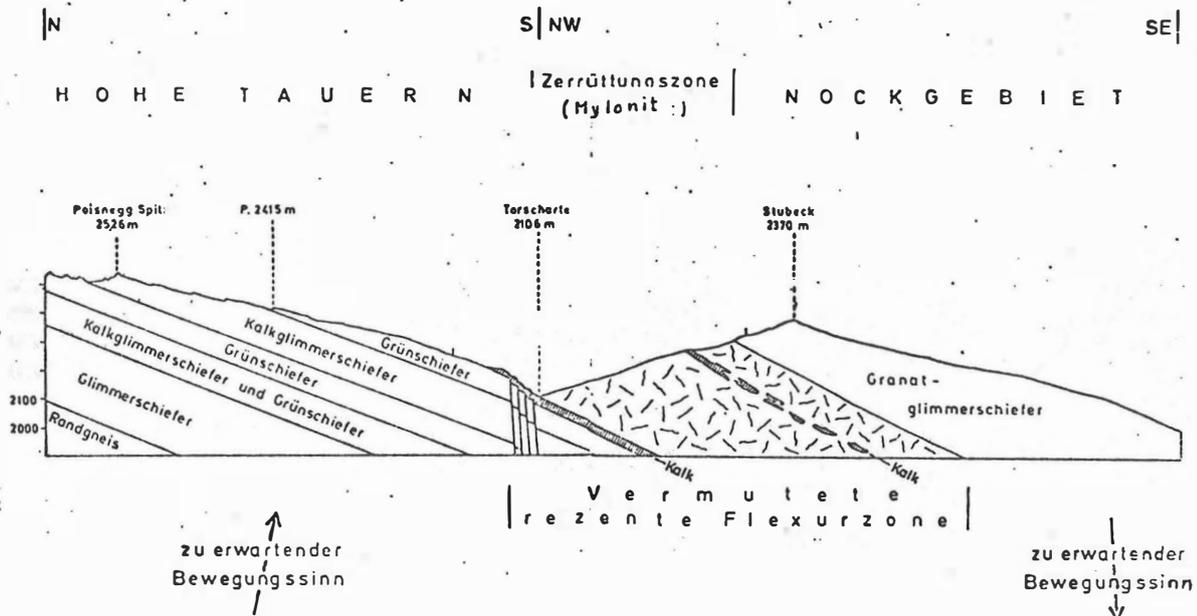


Abb. 3



Abb. 4

Ausschnitt aus ÖK
1: 500 000



Abb. 5

Ausschnitt aus
ÖK 1: 50 000

Bl. 156, 182

Von den Herren EXNER und MITTER wurden dann auch in der Natur die geologisch repräsentativen Pfeilerstandorte festgelegt (1973). Die dreidimensionalen Bewegungsmessungen wurden 1974 beim IGP als selbständiges Projekt eingereicht und 1976 an Prof. SCHMID vergeben.

Eine Naturbegehung hatte 1974 gezeigt, daß für erste Aussagen zwei Pfeiler ausreichen würden - der nördliche ca. 100 m über der Torscharte Richtung Reitereck, der südliche knapp unter dem Gipfel des Stubecks (Abb. 3). Die 1973 erkundeten Standorte erwiesen sich als repräsentativ und es wurde die Baufirma Niedermühlbichler in Seeboden mit der Errichtung der Pfeiler beauftragt, welche schon große Erfahrungen bei Vermarkungen für Feinmessungen an der Tauernautobahn besaß. Angesichts möglicher lokaler Bodenbewegungen, besonders in der Zerrüttungszone des Stubecks, war die Anlage eines kleinräumigen Netzes zu 4 bis 6 Pfeilern oder von je 2 Hilfspfeilern in der nächsten Umgebung der 2 Hauptpfeiler erwogen worden. Aus Kostengründen, weil sich hierfür kaum günstige Standorte anboten (steiles Gelände) und auch wegen des günstigen Befundes beim Fundamentaushub wurden diese Maßnahmen aber zurückgestellt. Trotz der Hilfestellung durch einen Hubschrauber des Bundesheeres waren die Vermarkungskosten sehr hoch: Baukosten ca. 64.500.-, Hubschrauber 11.800.-, also je Pfeiler ca. 38.000.- (1976/77).

Ursprünglich war geplant, die Strecke zwischen den beiden Pfeilern mit dem Tellurometer MA 100 zu messen und die met. Endpunktwerte durch einen Sondenaufstieg aus der Torscharte zu unterstützen. Letzteres hätte sicherlich je Messung einen Hubschraubereinsatz und zusätzlich Kosten von ca. 40.000.- erfordert und war auch theoretisch nicht nötig, da bei der Kürze der Strecke auch Endpunktwerte der Grundgenauigkeit des MA 100 ($3 \cdot 10^{-6}$ auf 1 km) entsprochen hätten.

Später entschlossen wir uns auch, im Interesse eines einfacheren Arbeitsablaufes den etwas ungenaueren Wild DI 3 S dem wesentlich schwereren MA 100 vorzuziehen, da je Messung mehr

als 600 Höhenmeter Anstieg erforderlich waren.

1977 (Oktober), 1978 (Juni) und 1979 (Oktober) wurde je eine Nullmessung ausgeführt, wobei im ersten Jahr wegen Nebels nur einseitig Strecke und Zenitdistanz, 1978 nur lokal beidseitig Strecke und Zenitdistanzen gemessen werden konnten; 1979 wurde neben einer kompletten lokalen Messung auch das Pfeilerpaar vom Stubeck aus ins Landessystem gebracht (nach Lage und Höhe) und auf den Pfeilern Orientierungsrichtungen beobachtet.

Die lokale Witterung hatte sich als sehr ungünstig erwiesen, die beiden ersten Termine waren bei antizyklonaler Südwestlage, heiterem Wetter sowohl im Lungau als auch in Kärntner Tallagen von Hochnebel und sogar Graupelschauern behindert.

Die Richtungen und Zenitdistanzen wurden mit Wild T2 in 4 kompletten Sätzen, letztere gleichzeitig-gegenseitig, beobachtet. Die met. Endpunktwerte wurden mit Schleuderthermometer und Altimeter, später mit Standbarometer (Druckdose) unterstützt, beobachtet. Dabei waren am sonnigen, sehr stark windigen Junitermin 1979 Unterschiede zwischen beiden Pfeilern bis zu 7° (!) beobachtet worden.

Die Standardabweichung einer einzelnen Streckenmessung (ca. 1094 m mit Dreierprisma) aus jeweils 8 Ablesungen war ± 3 mm, einer Richtung $\pm 3^{\text{CC}}$, einer Zenitdistanz (einseitig) $\pm 5^{\text{CC}}$ (1979), sonst $\pm 9^{\text{CC}}$.

Die Partien bestanden aus 2-3 Universitätsassistenten sowie 3-4 Hörern.

Der Refraktionskoeffizient aus gegenseitigen Zenitdistanzen berechnet betrug bei den Nebellagen 1977 bzw. 1978 +0,16 bzw. +0,11, 1979 im Oktober um 14^h -0,31; um 15^h30 -0,07 bei starker Strahlung (Standpunkte ca. 1m über kahlem Boden).

Ein Vergleich der Altimeterwerte mit den Luftdruckmessungen am Sonnblick einerseits und Klagenfurt andererseits zeigte keine Übereinstimmung, da Druckgebilden in der Höhe nicht immer das vergleichbare am Boden entsprach. (Über die Reduk-

tion der Altimeterwerte mit Hilfe der Höhenskala siehe 2.2.5).

Die bisherigen Resultate waren uneinheitlich. Die meteorologisch reduzierten Schrägdistanzen zeigten keine signifikante Änderung:

1977	1094, 256
1978	244
1979	246

Unter Annahme von $\sigma_0 = \pm 5$ mm also keine Bewegung.

Die gemittelten Zenitdistanzen zeigten einen deutlichen, aber noch nicht hochsignifikanten Gang:

1977	105 ^g 63 78 \pm 10 ^{cc}
1978	63 67 \pm 7 ^{cc}
1979	63 59 \pm 4 ^{cc}

Die Standardabweichungen sind die gefühlsmäßig korrigierten, empirisch gewonnenen Werte. Die Änderung 1977/79 hat demnach $\sigma_{\Delta} = \pm 11$ ^{cc}, was auf $S = 95\%$ Vertrauensniveau etwa 23^{cc} signifikant werden ließe.

Wäre die Änderung reell, entspräche dies einem um 33 mm verringerten Höhenunterschied, also einer Setzung von Stubeck relativ zu Reitereck. Dies ist nur eine Ziffernspielerei, wobei aber die Übereinstimmung mit der vorhergesagten Tendenz (EXNER 1973) bemerkenswert ist!

Eine Rekonstruktion länger-fristiger Daten aus Vergleichsmessungen zu Bundesamtoperaten ist wegen der großen Entfernung Stubeck/Reitereck höchstens hinsichtlich Dilatation möglich und scheint nicht sinnvoll.

Das IGP Projekt ist 1979 ausgelaufen. Derzeit besteht kein Bedarf an einer Folgemessung, da eine größere Zeitbasis erwünscht ist. Wir werden ein entsprechendes Folgeprojekt ab 1982 ins Auge fassen. Bis jetzt hat uns jedenfalls die Österreichische Akademie der Wissenschaften - Kommission für das IGP (Prof.Dr.F.STEINHAUSER) dankenswerterweise unter-

stützt, wobei wir wegen des immer steigenden wissenschaftlichen Interesses am Problembereich Geodynamik auf ein ähnlich gerichtetes Folgeprogramm hoffen.

2.2 Das Karawankenprojekt

2.2.1 Vorbereitung, Erkundung, Vermarktung

Im Juni 1973 wurde das Institut für LV von Dr.G.RIEHL, Institut für Geologie der TU Wien, zur Mitarbeit am Karawankenprojekt "Geologisch-geophysikalische und vermessungstechnische Untersuchungen zur Frage N/S Alpengrenze und ihr Zusammenhang mit jungen Massenbewegungen", einem Teilprojekt des geowissenschaftlichen Projektes "Tiefbau der Ostalpen", eingeladen. Dieses Großprojekt lief als "Schwerpunktprogramm N 25" der Rektorenkonferenz bis 1978 und wurde vom Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung finanziert. Projektkoordinator war Prof.Dr.W.FLÜGEL, Institut für Geologie und Paläontologie der Universität Graz.

Als Initiator und Vertreter der geologischen Fragestellung war RIEHL damals Betreuer des gesamten Teilprojektes, seit 1974 lief es als Gemeinschaftsprojekt der Institute für Geophysik der Universität Wien, Geologie (TU Wien) und Landesvermessung (TU Wien). Die vermessungstechnische Projektleitung oblag Prof.Dr.H.SCHMID (Fondsprojekt Nr.1793 bzw.2778/5), die geologische Dr.G.RIEHL, die geophysikalische Prof.Dr.R.GUTDEUTSCH.

Die Fragestellung lautete nach Erfassung von dreidimensionalen Bewegungsvektoren zwischen der geologisch stabilen Sattnitz einerseits, der Karawankennordkette und dem Karawankenhauptkamm andererseits. Zwischen der Karawankennordkette und der die "Südalpen" im engeren Sinn vertretenden Hauptkette liegt in diesem Bereich die auch morphologisch leicht zu lokalisierende Störungszone "Periadriatische Naht", in anderen Publikationen auch "Alpinodinarische Störungsline" (z.B. RINNER 1974) oder "Gailtallinie" bezeichnet.

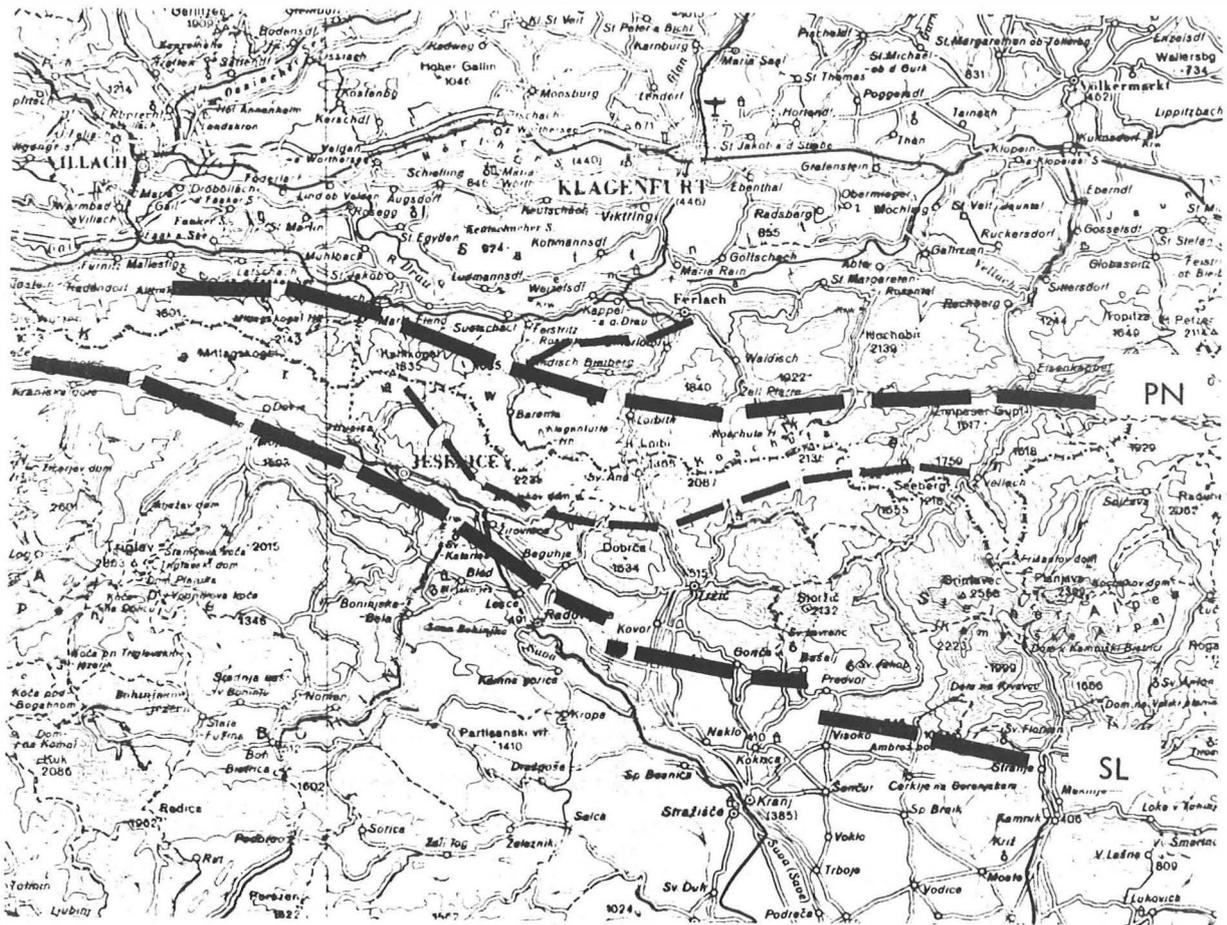


Abb. 6

Periadriatische Naht (PN) und Savelinie (SL) in einem Ausschnitt der ÖK
1: 500 000 (nach G. RIEHL)

Das ursprünglich erörterte Messungsprogramm mit drei parallelen, miteinander verknüpften Profilen und einer Punktdichte von etwa zehn Punkten je Profil mußte wegen des utopischen Aufwandes abgelehnt werden. Sodann wurde ein einziges Profil Sattnitz - Fuß Bärentalkonglomerat - Nordkette - Südkette (vier Punkte) erwogen. Dessen Deutung wäre vor allem dadurch sehr einfach gewesen, daß ursprünglich nur Nord-Südbewegungen (Dilatationen) vermutet wurden.

Bei der ersten Begehung in der Natur zeigte sich bereits, daß einerseits auch im Bereich der vom Singerberg abgeleiteten Massen ein Meßpunkt zweckmäßig wäre, andererseits eine

gesicherte Aussage zur Herausfilterung von großräumigen bzw. lokalen Einflüssen nur durch mindestens zwei Meßpunkte je Kette möglich schien.

Während in der Sattnitz der als stabiler Zentralpunkt anzunehmende Plöschenberg sowie der genau südlich gelegene Singerberg unbestritten waren, wurde als zweiter Nordkettenpunkt das Ferlacher Horn, ein morphologisch, topographisch und geologisch markanter Gipfel herangezogen. Leider war dieser Berg sowohl arbeitstechnisch (langer Anstieg nach gefährlicher Zufahrt), als auch geometrisch ebenso wie geologisch sehr eigenwillig: wegen der starken Exposition der isolierten Gipfelschuppe mußten zwei lokale Versicherungspfeiler errichtet und mitbeobachtet werden, eventuelle Bewegungen können auch bei homogenem Verhalten des Lokalnetzes nicht als charakteristisch für die Karawankennordkette erachtet werden. Bei der Südkette war die Erkundung noch wesentlich schwieriger.

Während die befahrbaren Punkte einfach und preisgünstig (unter Mitwirkung eines Straßenbautrupps der Kärntner Landesregierung) und das Ferlacher Horn sehr mühsam durch Dr. RIEHL und 5 weitere Helfer, unter Mitwirkung eines Bundesheerhubschraubers, in einem Monat vermarktet wurden, war vorerst an eine Pfeilervermarkung der Hauptkettenpunkte nicht zu denken, da sie durch Materialflüge wegen Grenznähe und Exposition nicht zu erreichen schienen.

Daher sollten als Vermarkungen Festpunkte der Österreichischen Landesvermessung verwendet und im Zuge einer Folgemessung, nach entsprechend aufwendiger Organisation, auf im Laufe der Zeit zu errichtende Pfeiler zentriert werden können. Die Punkte sollten Sicht nach Nord und Süd besitzen, um das Netz ggf. nach Slowenien hin ausdehnen zu können. In der Westhälfte wurde der KT "Bevsica" 49-211 gewählt. In der Osthälfte wäre der KT 34-211, östlich nahe dem alten Loiblpaß, geometrisch und arbeitstechnisch günstig gewesen, da er mit einem Distanzer hätte bestückt werden können, dafür lag

er auf einer extrem labilen Schuppe und mußte daher aufgegeben werden. Schließlich wurden auf einer statisch günstigen Kammverzweigung, zwar nur 300 Höhenmeter über dem Paß, aber sehr exponiert zu erreichen, eine Anzahl von Monobloc-Schlagmarken gesetzt ("Scheriauualm").

Insgesamt waren Erkundung und Vermarkung reich an widersprüchlichen Forderungen, sehr mühsam und äußerst kostspielig. Bereits hier wurde das Schlagwort vom "Kärntenwetter" geboren, worunter Nebel, Hochnebel, Nieseln bei Schönwetter-Druckverteilungen zu verstehen waren.

Manche Visuren wurden nur aus der topographischen Karte erkundet, obwohl die Endpunkte mehrfach begangen worden waren. Die Liegenschaftseigentümer der zukünftigen Pfeilerstandorte mußten natürlich um schriftliche Einwilligung ersucht werden, wobei der über 80-jährige Besitzer der Gipfelwiese am Plöschenberg für den durch Meßpartien - und vor allem neugierige Fremde - entstandenen Flurschaden regelmäßig abgefunden werden mußte. Wie später noch berichtet, bauten unsere jugoslawischen Kollegen östlich der "Bevsica" (korrekt Belscica, d.i. "weißer Berg"; die angegebene Schreibweise stammt aus der Punktkarte) am "Mali vrh" am Grenzkamm einen Pfeiler, wobei damit eine private Baufirma beauftragt werden mußte, da sogar hier in einem sozialistischen Staat Militäreinsatz zu teuer und umständlich gekommen wäre. Das Material wurde dort händisch bzw. mit Maultieren zu Berg gebracht.

Auf der Scheriauualm wurde, nach der Nullmessung auf den Schlagmarken, von der Baufirma Niedermühlbichler (Seeboden) ein fundierter Pfeiler mit Versicherungen errichtet. Die Kosten hiefür waren unter anderem deswegen besonders hoch (in Summe 1976/77 öS 115.000.-), da der endlich bereitgestellte Bundesheerhubschrauber wegen aufgekommenen Windes nicht über der Baugrube "rütteln" und den Beton ablassen konnte. Dadurch waren alle Kosten eines Silotransportes zum Loiblpaß a fonds perdu. Die Schwierigkeiten wegen Grenznähe, Wetter usw. sind nicht aufzuzählen. Dabei muß ich die Kollegen aus

der Triangulierungsabteilung des BAfEuV beneiden, welche offenbar einen besseren Draht zur Lufteinsatzzentrale als wir besaßen.

2.2.2 Überlegungen zur Netzqualität

Das Netz wurde als kombiniertes Richtungs- und Streckennetz ausgelegt, so daß durch Messen von gleichzeitigen gegenseitigen Zenitdistanzen neben den Lage- auch die Höhenverschiebungen erfaßt werden können. Zur Messung der Richtungen und Zenitdistanzen (Höhenwinkel) wurden Präzisionstheodolite Wild T 3 bzw. Zeiss Th II, der Strecken ein Lasergeodimeter AGA 8 vorgesehen, letzteres wegen der universellen Reichweite und relativen Unempfindlichkeit gegen Unsicherheit der meteorologischen Reduktionsgrößen.

Alle Randbedingungen zusammen ergaben das vorliegende Netz fast zwingend ohne gleichwertige Alternativen, wobei folgende Nachteile in Kauf genommen werden mußten (Abb. 7).

1. Als Bezugspunkt gilt der Plöschenberg, als einzige Orientierungsrichtung der Ulrichsberg. Für die Stabilität dieser Punkte werden als Grobkontrolle Richtungs- und Streckenmessungen nach dem Pyramidenkogel vorgenommen. Die geologisch erwünschte Einbeziehung des Schrottkogels nördlich der Rauscheleseefurche war wegen dichter Bewaldung sowie widrigem Relief nördlich des Plöschenbergs unmöglich. Das Netz ist dadurch allerdings zwangfrei aufgebaut; außerdem sind eventuelle signifikante Koordinatenänderungen leicht zu deuten.

Wie später zu sehen, sind die Genauigkeiten der Koordinatenänderungen nicht isotrop, d.h. eine Aussage in Nord/Süd-Richtung ist schärfer zu präzisieren als in Ost/West-Richtung. Ein fehlertheoretisch günstigerer Ansatz als reines Streckennetz hätte noch ein bis zwei weitere Pfeiler auf der Sattnitz erfordert, solche ließen sich aber wegen der Randbedingungen damals nicht erstellen.

2. Die Netzseiten sind länger als in der Landesvermessung für trigonometrische Höhenmessung vorgesehen, so daß sich

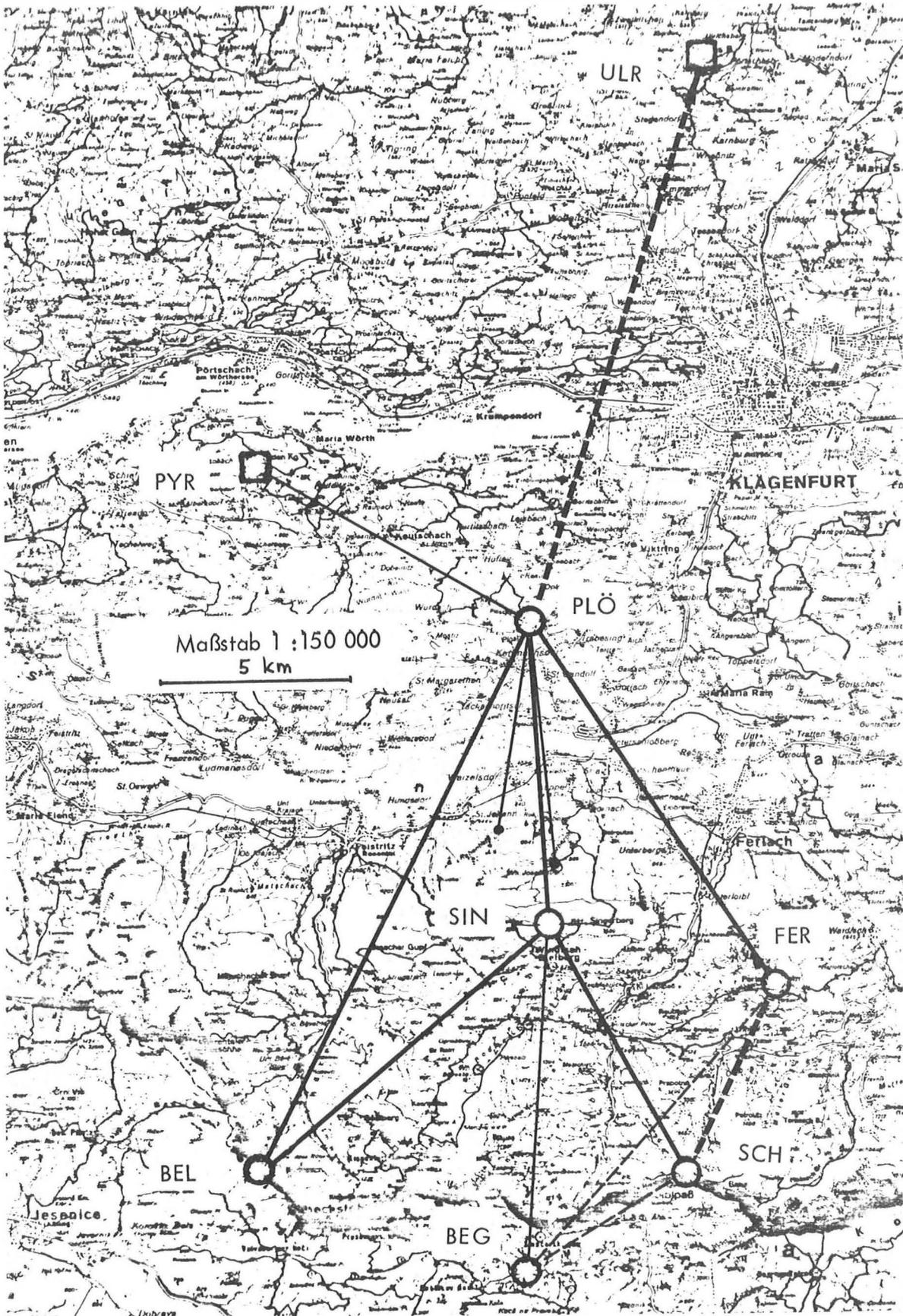


Abb. 7 : Österreichischer Netzteil

- Stand- und Zielpunkt
- Zielpunkt
- Richtungs-, -Zenitdistanz- und Streckenmessung
- Richtungsmessung ggf. mit Zenitdistanzen
- Grundnetz stark, Ergänzungs- und Anschlußmessungen dünn ausgezogen

die Höhen nur mit einer der Fragestellung nicht entsprechenden Genauigkeit bestimmen lassen. Einem gesonderten trigonometrischen Nivellement zwischen den Pfeilern mit Schrägdistanzen von etwa 2-4 km Länge steht die ungünstige Topographie entgegen.

Das von den Geologen geforderte Liniennivellement, welches natürlich fehlertheoretisch die einzig vertretbare Art der Höhenbestimmung gewesen wäre, wäre nur dann innerhalb der Kapazität eines Hochschulinstitutes gelegen, wenn es sich auf die in der Natur ersichtliche Störungszone im Bäental beschränkt hätte. Dann wären noch etwa 2 km Liniennivellement bei 200 m Höhenunterschied angefallen. Sonst hätten periodische Nivellements von insgesamt 50 km und an die 2000 Höhenmeter (ins Bäental und zum Loiblpaß) gelegt werden müssen.

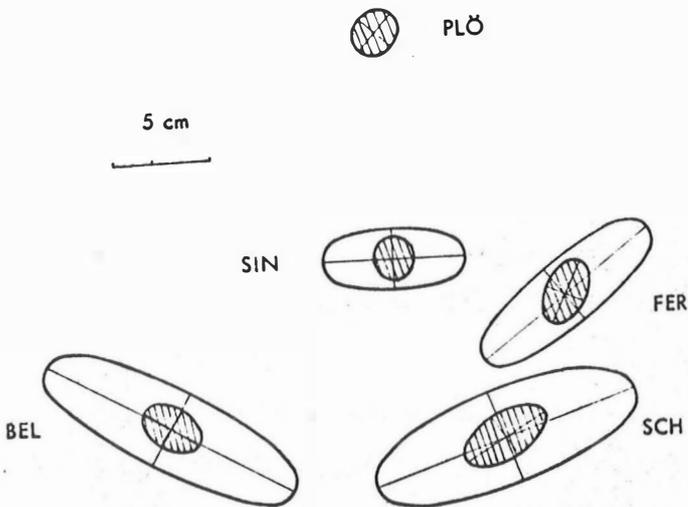
Hinsichtlich der Lage waren nur sehr geringe Redundanzen gegeben: in der Westhälfte 1 Strecke und 2 Winkel, in der Osthälfte überhaupt nur 2 Winkel. Die reichlichen Redundanzen in der Höhe konnten deren Genauigkeit nicht entscheidend verbessern. Damit ist klar, daß hier von den zwei Wegen zur Genauigkeitssteigerung bei Bewegungsmessungen, nämlich ein hochredundantes Netz in großen oder ein Minimalnetz in geringen Zeitabständen zu beobachten, der zweite vorlag, welcher auch den praktischen Möglichkeiten eher entgegenkam.

Wie leicht aus dem Netzbild, ohne Berechnung der Redundanzbeiträge, ersichtlich, sind auch die Zuverlässigkeitskenn-
daten einer einzelnen Messung nicht zufriedenstellend. Daher gilt, in Übereinstimmung mit Abs. 1.2.2.2, auch hier das zuvor Gesagte.

Die Ausgleichung des Netzes erfolgte mittels des äußerst flexiblen Programmes "NETZ 3D" von A.ELMIGER in der Fassung von J.FÜRST auf der Cyber der TU Wien.

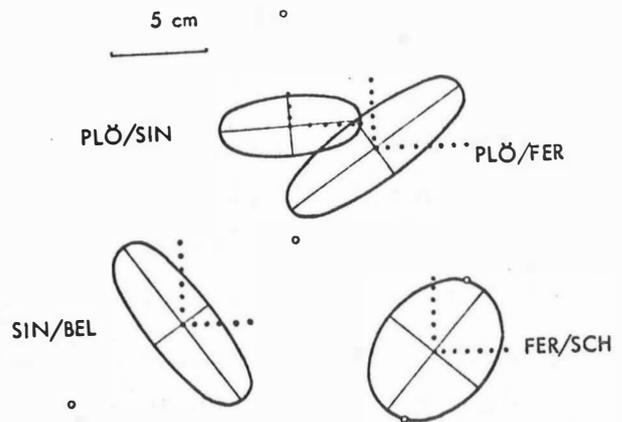
Vor Beginn der Nullmessung wurden Genauigkeitshochrechnungen mit Hilfe der bekannten Formmatrix und den a priori-Standardabweichungen von ± 2 cm für eine Strecke (außer ± 3 cm PLÖ/BEL),

$\pm 3^{\text{cc}}$ für eine gemittelte Richtung, $\pm 5^{\text{cc}}$ für eine gemittelte Zenitdistanz vorgenommen, und zwar mit der konventionellen Annahme gemäß 1.2., dann als singuläres Netz mit Rangabfall 4 bzw. 3, nur um einen Vergleich zu den in den einschlägigen Veröffentlichungen angegebenen Fehlerdaten zu erhalten. Mit großen Halbachsen der Fehlerellipsen zwischen 12 und 26 mm liegen diese meist innerhalb des legendären Einschillingstückes (Abb. 8 a). Weiters wurden die relativen Fehlerellipsen benachbarter Punkte vorausberechnet (Abb. 8 b); die beim konventionellen Koordinatenausgleich ersichtliche Benachteiligung der Südkettenpunkte ist hier merklich kleiner. Die mittleren Höhenfehler allerdings liegen zwischen ± 10 cm (SIN) und ± 17 cm (BEL).



Fehlerellipsen aufgrund der im Text erwähnten Genauigkeitsvoranschläge als singuläres Netz, Rangabfall 3 (schraffiert) und als konventionelles, zwangsfreies Netz

Abb. 8 a



Relative Fehlerellipsen und mittlere Fehler der Koordinatenunterschiede benachbarter Punkte a priori, stochastisches Modell wie zuvor

Abb. 8 b

Da außer der Scheriaualm alle Punkte unmittelbar neben Festpunkten des BAfEuV lagen, waren die vorläufigen Koordinaten einfach zu erlangen. (Eine Trendrückberechnung ist aber nicht möglich, da die Triangulierungspunkte verschiedenen Operaten entstammen).

Anhand von Tab.1 ist ersichtlich, daß eine Höhenänderung von 5 mm/Jahr mit dem Beobachtungsrhythmus Sp.4, $\sigma_0 = \pm 10$ cm, $S = 95\%$, $u = 1,96$ nach ca. 50 Jahren (0, 10, 20, 30, 40, 50) und eine Lageänderung in N-S Richtung derselben Größe, bei $\sigma_0 = \pm 4$ cm, nach 20 Jahren signifikant nachweisbar ist. Bei günstigeren Fehlern in der Bewegungsrichtung verringern sich die Beobachtungsintervalle entsprechend.

Bei der Beobachtungsplanung wurde häufig dem "Parallaxen-Prinzip" vertraut.

So bestand die Hoffnung, ausschließlich während herbstlicher Hochdrucklagen beobachten zu können und dadurch bei den einzelnen Terminen die Distanzen über die gleichartigen atmosphärischen Verhältnisse so zu korrelieren, daß ihre Änderungen von Zeit zu Zeit ohne Brechungsindexfehler anfallen sollten. Dies hat sich dann in der Praxis als undurchführbar erwiesen.

Lokale Lotabweichungsdifferenzen von Punkt zu Punkt gehen in den Netzausgleich wie zufällige Fehler ein. Die empirische Varianz (m_0 aus dem Ausgleich) wird dadurch zu pessimistisch geschätzt. Zwischen verschiedenen Messungsepochen besteht eine Korrelation dergestalt, daß die Differenzen der Netzelemente und Koordinaten frei von Lotabweichungseinflüssen sind, soferne sich nur diese nicht mit der Zeit ändern. Die Konfidenzbereiche der Änderungen aufgrund von empirischen Varianzen sind dadurch allerdings zu weit.

Es ist daher ratsam, nur aufgrund von a priori Varianzen Fehlerberechnungen und Vertrauensbereiche anzugeben, umso eher, als bei den geringen Redundanzen der Netzelemente (Lage), Auswirkung sehr unsicherer Gewichtsrelationen zwischen den Lage- und Höhenmessungen im 3 D Programm und ver-

steckten Korrelationen zwischen den Streckenmessungen die mittleren Fehler aus dem Ausgleich heraus nicht verlässlich erhalten werden können.

2.2.3 Nullmessungen

Die Richtungen und die Zenitdistanzen wurden in je 8 vollständigen Sätzen mittels T3, DKM2A oder T2 gemessen, letztere gleichzeitig-gegenseitig.

Die Strecken wurden von den befahrbaren Punkten Plöschenberg und Singerberg mittels Lasergeodimeter AGA8 (im Eigentum des Fonds) zwei- bis dreifach gemessen.

Die meteorologischen Werte wurden außer auf den Endpunkten auch noch je nach Möglichkeit auf einer Fesselballonsonde der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, welche in Weizelsdorf im Drautal stationiert war, beobachtet.

Nach Probemessungen im Juni 1975 wurde das Grundnetz erstmals im Oktober 1975 durchgemessen.

Nach dem Friauler Starkbeben vom Mai 1976 sollte das Gebiet auf signifikante Verschiebungen untersucht werden. Daher wurden im Juni 1976 wichtige Netzelemente, im Oktober 1976 das gesamte Netz beobachtet, einschließlich der polaren Anhänger nördlich des Singerberges, der Zentrierung von KT Bevsica auf Pfeiler Belscica und der Versicherungen am Ferlacher Horn (letztere beide mit T2 und DI 3S).

Da die Änderungen der Netzelemente innerhalb der statistischen Vertrauensbereiche ($S = 95\%$) lagen, konnte keine signifikante Bewegung nachgewiesen werden.

Die Messungen wurden von Angehörigen des Institutes für Landesvermessung ausgeführt, jene im Oktober teilweise im Rahmen der lehrplanmäßigen Feldübungen. Trotz Aufenthaltes von jeweils 2 Wochen im Einsatzgebiet gab es nur wenig günstige Beobachtungstermine, so daß in diesen 2-3 günstigen Tagen alle Messungen unter großem Organisations- und Personaleinsatz sowie 3 Leih-VW-Bussen durchgepeitscht werden mußten.

Häufig vergingen ganze Tage auf meßbereit besetzten Stationen im Nebel und Dunst, ohne daß produktiv gemessen werden konnte. Mikrowellendistanzmessungen waren schon durch den Bedarf des aktiven Reflektors (auf Hochgipfeln) und der Grenznähe (Funkerlaubnis), sodann wegen des Dampfdruckeinflusses (bei häufig sehr inhomogenen Feuchteverhältnissen und Unmöglichkeit, diese aus der Fesselsonde besser zu schätzen) als Bestimmungsmessungen ausgeschieden, wurden aber doch parallel zu den AGA 8 Messungen mittels DI 60 ausgeführt.

Aus dem Netzkonzept ergab sich die unbedingte Notwendigkeit von Richtungsmessungen, wenngleich diese etwa nur 10% - 20% des Streckengewichtes erreichten. Die Höhenwinkel waren in der vorliegenden Meßanordnung, welche großen Aufwand mit sich brachte, nötig, da zu diesem Zeitpunkt noch an Berechnung von trigonometrisch ermittelten Höhenänderungen gedacht war. Bei den Theodolitbeobachtungen in Richtung "dunstige Tiefe" oder "Gegenlicht" erwies sich der AGA 8 Laser sowohl direkt wie auch via Reflektor als gute Zielhilfe. Auf Heliotropieren oder Nachtbeobachtungen wurde aus organisatorischen Gründen (z.B. Grenznähe, Hochlagen) verzichtet.

Probleme gab es auch durch den Grenzübertritt am Bärensattel und Benützung der slowenischen Karawankenmagistrale am Weg zur Belscica, mit Sprechfunkgeräten und anderen "militärischen" Gepäckstücken belastet.

Der Grenzbehangsteig vom Loiblpaß zur Scheriaualm mußte von Hörern durch Holzstufen versichert werden, da er sonst beim Begehen mit dem schweren Instrumentarium zu glitschig und exponiert gewesen wäre.

2.2.4 Zusammenarbeit mit jugoslawischen Dienststellen

1974 wurde mit dem Geodetski savod SRS entsprechend einer Anregung von G.RIEHL, das Netz bis südlich der Savelinie auszudehnen, besprochen, das Profil Plöschenberg-Singerberg-Belscica südlich über Sveti Katerina nach Hom hinweg zu ver-

längern. Nach dem Friauler Katastrophenbeben, welches auch in Slowenien starke Schäden verursacht hatte, wurde das Karawankenprojekt von allen jugoslawischen Fachdienststellen stark forciert und im Herbst 1976 in Katerina, Hom, auf den Hochgipfeln Belscica und Begunjscica Pfeiler errichtet sowie im Juni 1977 die Nullmessungen durchgeführt (Abb. 9). Für die Verbindungsmessungen über die Staatsgrenze hinweg wirkte hierbei ein Meßtrupp des Institutes für Landesvermessung der TU Wien mit.

Richtungen und Zenitdistanzen wurden nach demselben Schema wie bei uns gemessen; die Distanzen wurden zweimal mittels Geodimeters AGA 710 beobachtet, und zwar von den befahrbaren Punkten Katerina, Hom und Radovljica (südlicher Endpunkt der slowenischen Invarbasis) aus. Die Messungen und Auswertungen wurden durch die Geodetska uprava SRS organisiert und beauftragt (GOLOREJ), durch den Geodetski zavod SRS Ljubljana (JENKO) und erreichten ein technisch sehr hohes Niveau.

Obwohl Katerina (KAT) und Radovljica (JBT) beiderseits der Save liegen, gehören sie geologisch zu einer Einheit (südlich der Savelinie?) und der jugoslawische Netzanteil ist vor allem dann wesentlich besser konditioniert als der österreichische, wenn man HOM als homogen mit den vorgenannten Punkten annehmen kann. Die beiden Hochgipfel sind bezüglich einer Basis KAT/JBT allein aus Strecken heraus besser bestimmt als unsere aus kombinierten Messungen. Die Eichung der Distanzer kann leicht von der mittels Invardrähten und Mekometer periodisch wiederholt gemessenen Radovljicer Basis her auf das Netz übertragen werden.

Die Anschlußrichtung nach Sv.Sodoci (JOST) entspricht in der Visurlänge, nicht aber in der Bedeutung für die Netzorientierung unserer Richtung Plöschenberg/Ulrichsberg.

Gerade an der Nahtstelle beider Netze zeigt sich ein wenig versteiftes Gelenk. Darum und wegen der streifenartigen Gestalt des vereinigten Netzes ist ein gemeinsamer, zwangsfreier, aber nicht singulärer Ausgleich sinnlos. Ein singu-

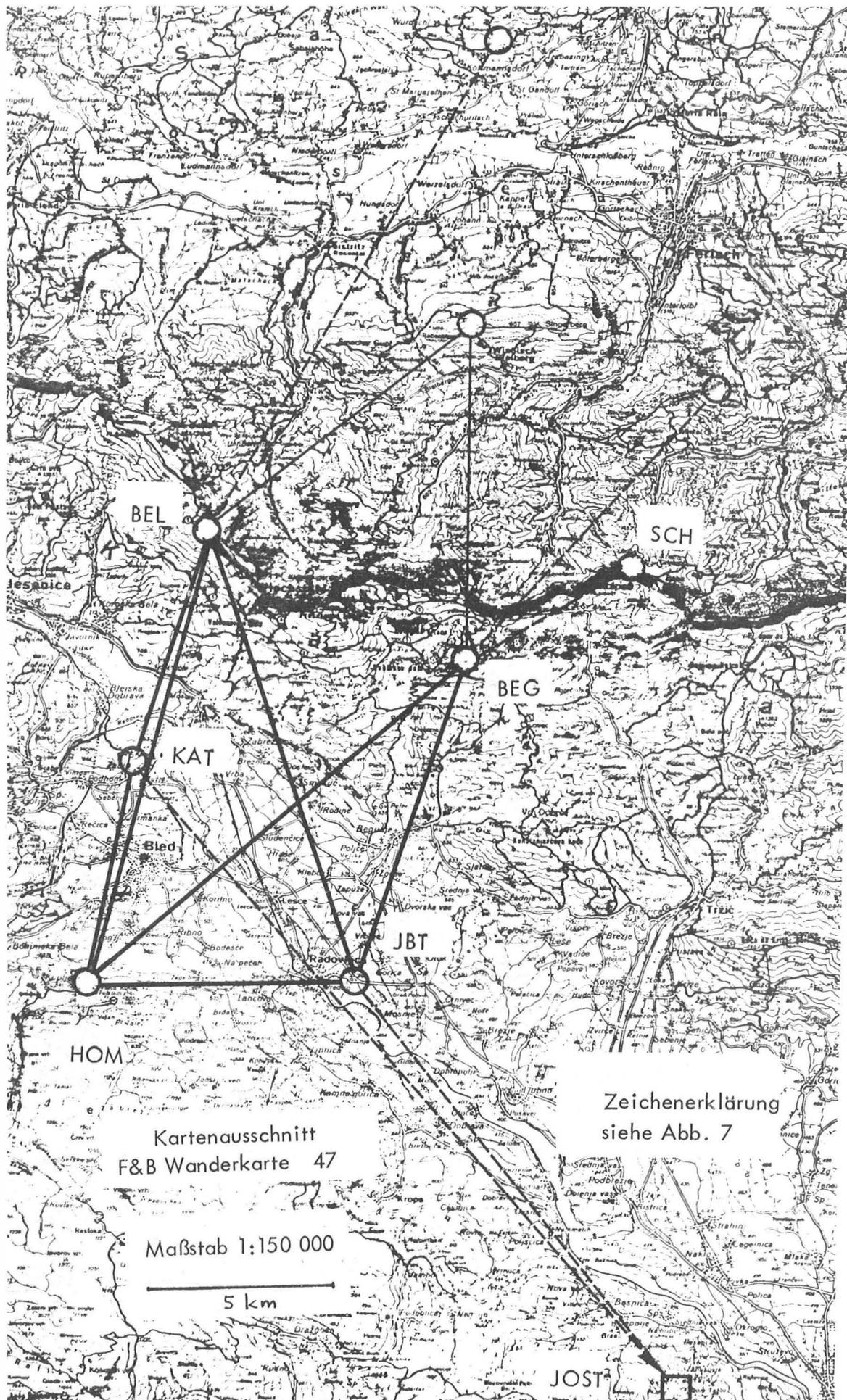


Abb. 9 : Jugoslawischer Netzteil

lärer Ausgleich ist ebensowenig erfolgversprechend, unter anderem da unsere Orientierung dabei untergehen würde.

Zur Deformationsbeurteilung scheint ein regional getrennter, jeweils zwangsfreier Ausgleich am wirkungsvollsten, wobei am Übergriff die jeweiligen Richtungswinkel (Rotation), Strecken (Dilatation) und Koordinaten (Scherung) der Hochgipfel BEL und BEG von Epoche zu Epoche verglichen werden können.

2.2.5 Meteorologische Messungen und Parallelmessungen

Die meteorologischen Daten an den Streckenendpunkten wurden mit Psychrometern und Thommen-Altimetern, teilweise auch mit Schleuderthermometern bestimmt. Die Altimeter wurden täglich untereinander und mit den in der Wetterkarte für Klagenfurt angegebenen Bodendruckwerten verglichen.

Wegen der großen Höhe ließ sich bei vielen Punkten nicht der Luftdruck am Ort ablesen, da die Druckskala nicht so weit reichte. Es wurde dann die Höhenskala nicht auf Null, sondern auf einen runden Wert " H_{Alt} " eingestellt, auf der Druckskala " P_{Alt} " abgelesen und der gesuchte Luftdruck " P_{ist} " in der Höhe " H_{ist} " mit folgenden Formeln ermittelt, welche leicht für Taschenrechner zu programmieren sind (Dimensionen mb bzw. m):

$$(1) P_{ist} = P_{Alt} - 1013,25 (1 - 2,26 \cdot 10^{-5} H_{ist})^{5,256} - 1013,25 (1 - 2,26 \cdot 10^{-5} (H_{ist} - H_{Alt}))^{5,256}$$

genähert:

$$P_{ist} \doteq P_{Alt} - 0,12037 H_{Alt} + 5,8 \cdot 10^{-6} H_{Alt} (2H_{ist} - H_{Alt})$$

$$(2) P_{ist} = 1013,25 (1 - 2,26 \cdot 10^{-5} H_{Norm})^{5,256}$$

$$H_{Norm} = H_{Alt} + (44308 - 11874,5 \cdot P_{Alt}^{0,19026})$$

(jene Höhe, die am Altimeter eingestellt werden müßte, um 1013,25 mb auf der Druckskala abzulesen).

Beide Formeln wurden aus Beziehungen der Gebrauchsanleitung für den "THOMMEN-Altimeter 2000" abgeleitet.

Die schon erwähnten Fesselsondenaufstiege sollten untersuchen, ob im vorliegenden Relief bei den gegebenen Meßmitteln und -bedingungen und den Streckenlängen von 6 bis 15 km überhaupt auf die aufwendigen Sondaufstiege zu verzichten wäre und die Messungen unter Berücksichtigung auf Gerätegenauigkeit nur aus Endpunktwerten zu reduzieren wären (SCHMID 1977).

In den in Abb.10 dargestellten Profilen wurden die Messungen gemäß Tab.2 ausgeführt. Da das Meßprogramm nur auf das Lasergeodimeter zugeschnitten war, wurde unter Berücksichtigung auf die o.a. unsichere Feuchteerfassung bei der Radio-sonde und den geringen Dampfdruckeinfluß auf elektrooptische Messungen auf eine Feuchteregistrierung überhaupt verzichtet.

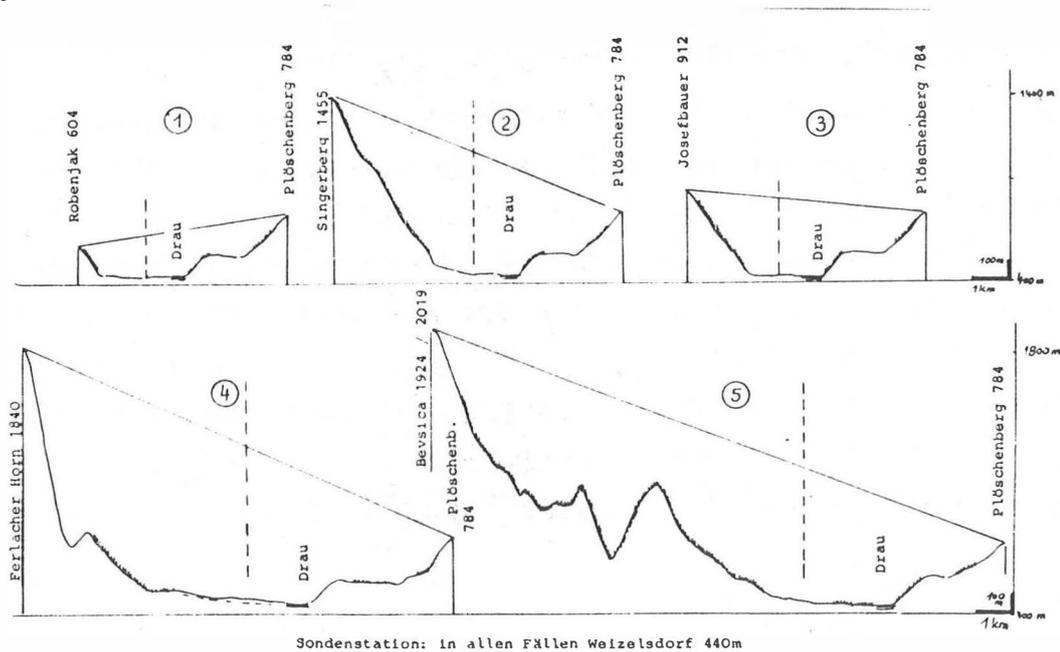


Abb. 10 Längsschnitt durch die Strecken Kärnten (Längen 1:200 000, Höhen 1:40 000).

Die Wetterlagen vom 2. Oktober 1975 bzw. 6. Oktober 1976 waren in ihrer Entstehungsgeschichte grundverschieden: am erstgenannten Tag Schönwetter vor einer Störung, am zweitgenannten baute sich nach einer langen Schlechtwetterperiode ein mächtiges Hoch auf. Strahlung erwärmte die bodennahen

Schichten, die freie Atmosphäre war noch sehr kalt. Dies war der einzige Termin, an welchem die Sonde eine signifikante Verbesserung brachte (Vorzeichen und Betrag stimmen mit den Erfahrungen überein, z.B. JEK VI Seite 238). Trotz anscheinend guter Durchlüftung und fast wolkenlosem Himmel gab es an diesem Tag starke Inhomogenitäten in der Atmosphäre (Abb.11 a).

Tabelle 2

1 f.Nr.	Datum, Uhrzeit	Profil Nr.	Witterung	Wetterlage	Temperatur °C			Streckenänderung wegen Temperaturdifferenz (cm)
					Mittel der Endpunktwerte	Sonde in mittl. Höhe der Endpunkte	Differenz	
1	1.Okt. 1975 16h 20	2		SW	15,6	15,1	+0,5	-0,4
2	17 00	2		SW	14,8	15,3	-0,5	+0,4
3	2.Okt. 1975 9 20	3		h	15,8	14,2	+1,6	-1,0
4	10 10	1		h	16,1	15,2	+0,9	-0,5
5	10 35	1		h	16,8	15,2	+1,6	-0,9
6	13 40	5		h	14,3	14,2	+0,1	-0,2
7	14 10	4		h	14,6	13,4	+1,2	-1,3
8	14 40	4		h	14,3	13,4	+0,9	-1,0
9	30.Sept.1976 16 40	2		HF	12,6	12,1	+0,5	-0,4
10	18 10	2		HF	11,8	12,0	-0,2	+0,2
11	6.Okt. 1976 11 40	5		H	10,7	8,2	+2,5	-3,8
12	12 40	5		H	10,8	8,5	+2,3	-3,5

Ein noch extremeres Beispiel bietet Abb.11 b, als bei zyklonaler Südwestströmung, bedecktem Himmel und böigem Süd Sturm bis in die Niederung eine ausgesprochene Temperaturumkehr auftrat.

Die bei ruhigem Wetter auftretenden Inversionen waren im Testnetz Kärnten ohne Bedeutung, da beide Streckenendpunkte über der Inversionsobergrenze lagen.

Abb. 11 a

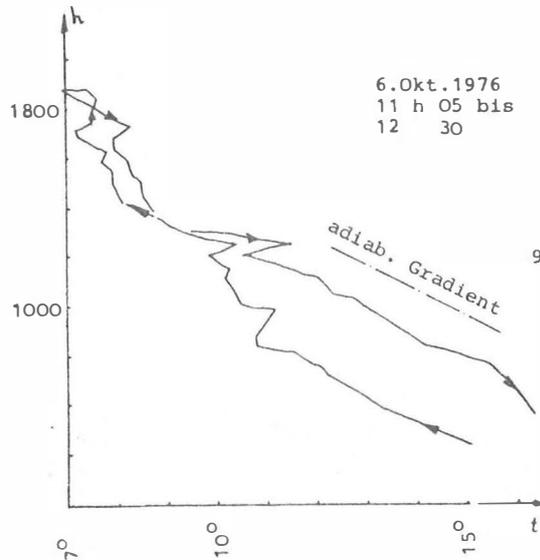
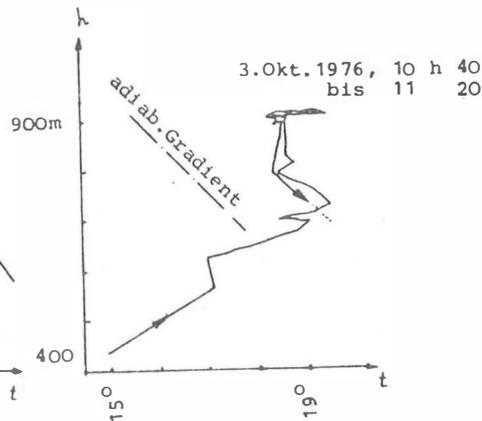


Abb. 11 b



Beispiele für vertikale Temperaturverteilung über dem Drautal aus Sondenaufstiegen im Testnetz Kärnten

Es wurde eine von der Sondenabteilung der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik hergestellte Fesselballonsonde verwendet. Die Sonde wog 3 kp, der zugehörige Ballon 4 kp. Der Ballon hatte aufgeblasen einen Inhalt von 12 m³. Die maximale Steighöhe war 1200 m über Grund. Die Organisation der Aufstiege war sehr mühsam, da jeweils ein luftfahrtbehördliches Genehmigungsverfahren mit entsprechenden Sicherheitsauflagen voranging: Nachtflugverbot, Verständigung vor jedem Aufstieg, Kennzeichnung der Fesselleine alle 50 m mit Luftballons usw. Auch die Beschaffung und Lagerung der Wasserstoffflaschen war aufwendig.

Die Höhe der Sonde über Grund wurde durch einen Flughöhenmesser mit elektronischer Abtastung ± 10 m genau erfaßt (eine direkte Messung am Seil war durch Abdrift und starke Ausdehnung des Seils unmöglich). Sowohl die Temperatur als auch die relative Feuchte wurden durch Widerstandsmessung erfaßt; ein Fühler nahm abwechselnd den Widerstand des Thermistors, den Referenzwiderstand und den feuchtigkeitsbedingten Wider-

stand einer Karbongelatineschicht auf. Die Widerstände wurden durch einen Modulator in Frequenzen umgewandelt, diese durch den Sender der Sonde zur Station gefunkt. Die jeweils empfangene Tonhöhe wurde gleichgerichtet, in einem digitalen Analogwandler integriert und mit einem x/t Schreiber aufgezeichnet.

Aufgrund der bekannten Eichdaten wurden die Kurvenwerte des o.a. Gleichstromschreibers händisch digitalisiert und die Temperatur- bzw. Feuchtwerte in Abhängigkeit von der Höhe ü.G. mittels Taschenrechner berechnet und sodann elektronisch geplottet. Eine automatische Verarbeitung mit Datenfluß von der Sonde bis zum Plotter ist derzeit noch nicht möglich, da die optimale Verarbeitung der Relationen Widerstand/Frequenz /meteorologischer Wert wegen Nichtlinearität und Verzerrungen von der persönlichen Erfahrung des Auswerters abhängt.

Für die Temperatur wird eine Standardabweichung von $\pm 0^{\circ}1$ C, für die relative Feuchte von $\pm 10\%$ angegeben. Letztere erscheint sehr unbefriedigend und soll durch Verwendung eines Aluminiumoxydelementes verbessert werden.

Insgesamt erwies sich die Verwendung der Fesselsonde als sehr interessant, aber wegen des großen Aufwandes (1 VW Bus blockiert, heikle Standortwahl, Personalaufwand größer als ein Meßtrupp, Schwerfälligkeit, Windabhängigkeit, Stehzeiten) in Relation zum Genauigkeitsgewinn als unwirtschaftlich. Bei Verwendung eines eigenen, problemorientierten Instrumentariums könnte sich die Situation etwas zugunsten der Sonden verschieben, wobei die Belastung durch die Gasflaschen, Energie, Winde, Lagerung usw. erhalten bleibt!

Die Parallelmessungen AGA 8/DI 60, welche gleichzeitig im Rahmen des Fondsprojektes 2480 zwischen Singerberg/Plöschenberg bzw. Plöschenberg/Belscica abgehalten wurden, zeitigten in Summe für 5 Messungen eine mittlere "RINNER'sche Ortskonstante" $\frac{AGA - DI60}{AGA}$ von $+ 3.10^{-6} \pm 2,4.10^{-6}$, wobei Werte von $+ 6,8.10^{-6}$ bis $+ 0,2.10^{-6}$, alle auf der kürzeren Strecke, vorkamen. Dieser Wert deckt sich mit den Erfahrungen anderer

Autoren, welche umfangreichere Meßreihen inszenieren konnten (z.B. RINNER 1976). Ein Weiterführen der Distanzmessungen mit Mikrowellen- anstelle von Lasergeräten schien schon der inneren Genauigkeit zufolge nicht sinnvoll.

2.2.6 Auswertung

Vor der elektronischen Berechnung wurden die Beobachtungsdaten hinsichtlich ihrer "Präzision" mit den Genauigkeitsvoranschlägen verglichen.

Für die Richtungen ergab sich als Standardabweichung einer gemittelten Richtung $\pm 2^{\text{CC}}6$, aus "Doppelmessungen" (Periodenvergleich) $\pm 3^{\text{CC}}1$ ohne die signifikant größer streuenden PLÖ-BEL, SIN-BEL, SIN-SCHER und $\pm 7^{\text{CC}}7$ für alle "Doppelmessungen". Die genannten großen Richtungsabweichungen zwischen 1975 und 1976 waren aber gegensinnig und ließen keinen Trend, sondern nur "Szintillationen" erkennen. Es waren dies die Richtungen mit besonders schlechter Zielansprache, interessanterweise gerade jene mit Laserzielhilfe.

Die gemittelten Zenitdistanzen hatten aus den Satzmitteln heraus eine Standardabweichung von sogar nur $\pm 2^{\text{CC}}3$, aus "Doppelmessungen" (Periodenvergleich) aber von $\pm 7^{\text{CC}}2$ und aus periodenweisen Differenzen der Differenz der Hin- und Rückmessung, welche von Lotabweichung und Erdkrümmung, aber auch Trend, bereinigt sind, sogar $\pm 8^{\text{CC}}0$.

Die aus Gegenzenitdistanzbeobachtungen nach der Formel:

$$k = 1 - \frac{\Delta \text{zen}^c}{s_{\text{km}}} \cdot \frac{R_{\text{km}}}{s^c} = 1 - \frac{\Delta \text{zen}^c}{s_{\text{km}}}$$
$$\Delta \text{zen} = (|\alpha_i| - |\alpha_j|)_{t_1} - (|\alpha_i| - |\alpha_j|)_{t_2}$$

$\alpha_{i,j}$... Höhenwinkel aus gegenseitigen Beobachtungen zu Zeitpunkten t_1, t_2

berechneten lokalen Refraktionskoeffizienten lagen in der "Hochregion" zwischen 0,12 und 0,17, hingegen zwischen den Hangpunkten und Plöschenberg zwischen 0,24 und 0,27, wobei sich von Termin zu Termin noch Verschiebungen bis 0,03 (in

der Tiefregion) zeigten.

Die Strecken hatten eine Standardabweichung aus den 3 Meßfrequenzen heraus von ± 10 mm, was aber natürlich wesentlich zu optimistisch ist, und aus Epochenvergleich von ± 22 mm.

Aus diesen Überlegungen zeigte sich ohne Notwendigkeit tief-schürfender Untersuchungen, daß ~~gibt~~

- o die Netzelemente während der "Nullmessungsperiode" konsistent waren
- o die a priori Varianzen für Festlagerung der Gewichtsrelationen weiterverwendet werden konnten, wenngleich vielleicht die Richtungsmessungen gegenüber den Strecken mit dieser Annahme zu optimistisch behandelt scheinen.

Der Netzausgleich wurde vermittelnd in verschiedenen Varianten nach dem Programm NETZ 3 D von AESCHLIMANN-ELMIGER ausgeführt, wobei die Epochen 1975 und 1976 teils getrennt, teils vereinigt (mit gesonderten Punktnummern für beide Epochen), mit gesonderter Eingabe aller mehrfach gemessenen Elemente ausgeglichen wurden.

Dabei wurde sowohl dreidimensional als auch nur die Lage, sowohl zwangsfrei mit Hauptpunkt Plöschenberg und Orientierung nach Ulrichsberg, als auch singular mit Rangdefizit 3 ausgeglichen.

Wie zu erwarten, ergab sich für keine Variante eine signifikante Koordinatenverschiebung. Die Epoche "1976" war signifikant genauer beobachtet als "1975", wie sich aus dem empirischen Gewichtseinheitsfehler ergab. Bei der Gesamtausgleichung ergab sich zwischen 3D- und Lageausgleich keine signifikante Änderung der empirischen Varianz, daher kann die Gewichtsannahme für die Höhenwinkel als verträglich mit jener der Lagemessungen angenommen werden.

Allerdings ist der empirische Gewichtseinheitsfehler a posteriori insgesamt mit ca. $\pm 4^{\text{CC}}$ signifikant größer als jener a priori von $\pm 3^{\text{CC}}$.

Wegen der geringen Anzahl übergreifender Messungen wurde auf

eine gemeinsame Ausgleichung mit den jugoslawischen Daten verzichtet.

Vergleicht man die Koordinaten der Paßpunkte Belscica und Begunjsica aus dem österreichischen Ausgleich (in M 31, Lagerung in Plöschenberg, Orientierung nach Ulrichsberg) mit den jugoslawischen Werten (gleichfalls Gauß-Krüger Koordinaten, Lagerung in Radovljica, Orientierung nach Sv. Jost) und reduziert von der Rechenfläche in den Messungshorizont, divergieren die Strecken um 3 cm auf 7,5 km ($4 \cdot 10^{-6}$) und die Orientierungswinkel (auf 3 unabhängige Arten gerechnet) um 0^{CC} bis 7^{CC} ; dies sind unter Berücksichtigung der Kondition ausgezeichnete Werte.

Eine Änderung dieser später angeführten Transformationselemente ist ein Indikator für Bewegungen beider Netzteile.

2.2.7 Ausblick

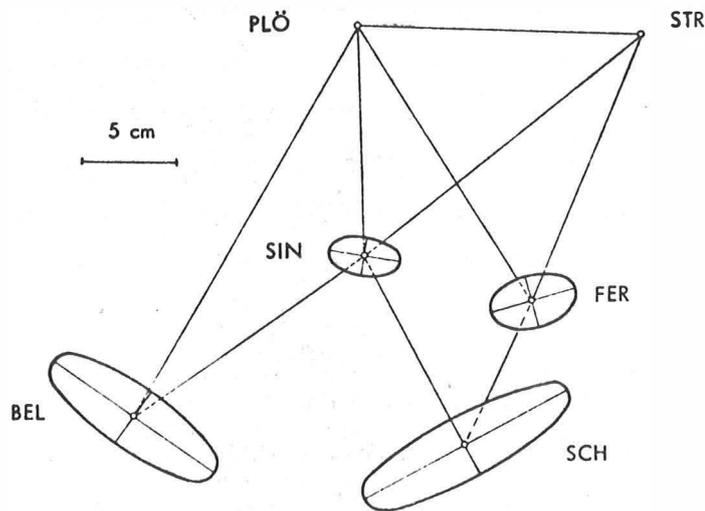
Am 15.1.1979 fand unter Vorsitz des Kärntner Landesgeologen Dr.HERZOG in Klagenfurt eine Aussprache über "Beobachtung von Gebirgsbewegungen in Kärnten" statt. Dort wurde von Hofrat Dr.SENFTL (Leiter der Wissenschaftlichen Abteilung des BAfEuV) über vergleichende Präzisionsnivellements Villach-Tarvis berichtet, welche ebenfalls keinen signifikanten Einfluß des Friauler Starkbebens von 1976 erkennen ließen. Weiters zeigte sich die Möglichkeit, durch periodische Nivellements durch den Karawankentunnel (Rosenbach-Jesenice) der ÖBB, ggf. über Sonden, welche mit dem Gestein Kontakt herstellen, das Höhenänderungsverhalten beiderseits der periadriatischen Naht zwar nicht in unserem Gebiet direkt, dafür aber mit vergleichsweise geringem Aufwand bei großer Genauigkeit zu verfolgen.

Im Rahmen dieser Sitzung wurde unter Zustimmung zahlreicher Erdwissenschaftler folgende neue Strategie erarbeitet:

Unser Karawankennetz soll auf lange Sicht nur mehr auf Aussagen über Lageänderungen ausgelegt sein, hiefür ist aber eine bessere Konditionierung anzustreben. Die Höhenmessungen

sind von der trigonometrischen Messung in der Gipfelflur, unter Verzicht auf dreidimensionale Bestimmung jedes Punktes, in die wirtschaftlich vorteilhaften Tallagen als Tunnelnivellements zu verlegen, wofür die Abt. K 2 des Bundesamtes federführend sein wird.

Zur Verbesserung der Lagekondition wurde ein zweiter Sattnitzpfeiler im Bereich von Strantschitschach, ca. 9 km östlich des Plöschenberges, erkundet, welcher zumindest für die Nordkettenpunkte eine fühlbare Verbesserung mit sich bringen wird: wie aus Abb. 12 in Vergleich zu Abb. 8 a zu ersehen, werden unter Annahme einer stabilen Basis Plöschenberg-Strantschitschach die großen Halbachsen der Fehlerellipsen nunmehr bei den Nordkettenpunkten mit ca. 40% bzw. 50%, bei der Südkette mit 70% bzw. 90% der bisherigen Werte zu erwarten sein.



A-priori Fehlerellipsen für das um den 2. Sattnitzpfeiler STR erweiterte Netz ; Genauigkeitsannahmen wie zu Abb. 8

Abb. 12

Der Pfeiler wird im Zuge eines neuen Fondsprojektes 3858 errichtet werden. Die geplanten Verbindungsmessungen des neuen Pfeilers zum Plöschenberg werden leider eine schlüssige Aussage, ob die Annahme eines gleichartigen Verhaltens beider

Sattnitzpunkte und damit das neue geometrische Konzept gerechtfertigt ist, zumindest hinsichtlich der N-S Richtung nicht liefern können, ebensowenig, wie es hiezu tektonische Voraussagen gibt (deshalb wurde ein solcher Pfeiler nicht von Anfang an ins Auge gefaßt).

Während die Situation des Scheriaupfeilers ev. später mit masseärmeren Distanzern und Energiequellen verbessert werden kann (Distanz FER-SCH), bleibt die Belscica im derzeitigen Netz benachteiligt. Die Zuteilung des o.a. Fondsprojektes wird die für Herbst 1980 geplante Folgemessung ermöglichen.

Abschließend möchte ich noch der angenehmen Pflicht nachkommen, meine Kollegen zu erwähnen, welche unter Leitung von Herrn Univ.Prof. SCHMID unsere Kärntner Projekte in Gang gebracht haben:

Herr Dipl.Ing.E.KORSCHINECK sorgte für Kontinuität, da er mit mir zusammen von Anfang an "dabei" war und wir gemeinsam am Projekt lernten, was Landesvermessung wirklich ist. Die Herren Dipl.Ing.'e W.FRANTZ und H.GAENGER unterstützten uns bei den ersten Nullmessungen, Herr Dipl.Ing.R.BRÜCKMÜLLER führte die besonders anspruchsvollen Verbindungsmessungen mit Jugoslawien aus, Studienassistent R.KLÖSCH leitete den "alpinen Wegebau" auf die Scheriaualm. Die numerischen Berechnungen wurden zuerst von Herrn J.FÜRST, sodann von Herrn Dipl.Ing.R.LEPUSCHITZ betreut.

Die Arbeiten selbst, mit weit überproportionalem Organisations- und Verwaltungsaufwand, ohne spektakuläre Ergebnisse und auch ohne das Flair der "Forschung", waren durch die sehr breit gestreuten Kontakte zu Nachbarwissenschaften, die notwendige Vertiefung in sonst nicht aktuelle Fragen der EDM und Theorie der geodätischen Netze und auch die Tätigkeit mit aufmerksamen, idealistischen Hörern in alpiner Landschaft zu einem Zweck, der nicht im Alltag und nicht im Heute verhaftet ist, dennoch ein nachhaltiges Erlebnis.

Literatur:

- ACKERMANN, F.: Ergebnisse einer Programmentwicklung zur Blockausgleichung großräumiger Polaraufnahmen. Sammlung Wichmann, Heft 19, S. 57-81, Karlsruhe 1973.
- BAUMANN, E.: Die Anwendung statistischer Methoden bei der Untersuchung geodätischer Netze. DGK Reihe C, Nr. 175, München 1972.
- EXNER, Ch.: Geologische Hinweise auf rezente Erdkrustenbewegungen an der Torscharte (Lieser-Maltatal, Kärnten). Geologisches Institut der Univ.Wien, 1973.
- FÖRSTNER, W.: Das Programm TRINA zur Ausgleichung und Gütebeurteilung geodätischer Lagenetze. ZfV 1979, S. 61-72.
- GERKE, K.: Ein Beitrag zur Bestimmung rezenter Erdkrustenbewegungen. Festschrift Großmann, Stuttgart 1967.
- GROSSMANN, W.: Grundzüge der Ausgleichsrechnung. 3.Aufl., Springer 1969.
- HARADA, T., SHIMURA, M.: Horizontal Deformation of the Crust in Western Japan revealed from first-order Triangulation carried out three times. Tectonophysics 52, S. 469-478, Elsevier 1979.
- HRADILEK: Bestimmung von Erdkrustenbewegungen durch räumliche Triangulation. ZfV 2/77, S. 57-63.
- KRAUS, K.: Verschiedene Transformationen und Indikatoren zur Lokalisierung grober Datenfehler. AVN 1976, S. 23-34.
- KUNTZ, LICHTER, MÄLZER: Ein geodätischer Beitrag zur Geodynamik des Oberrheingrabens. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik III/IV/75, S. 179-184.
- LINTON: Geodetic Surveys to monitor the Effect of Large Water Storages on the Earth's Crust in South-West Tasmania. FIG Washington 1974, Vortrag 503.6.
- LITSCHAUER, J.: Die zweite Ausgleichung des österr.Dreiecksnetzes 1.Ordnung. BAFeuV, Wien 1973.

- MASON, R.G., BRANDER, BILL: Mekometer Measurements in the Imperial Valley, California. Tectonophysics 52, S. 497-503. Elsevier 1979.
- NIEMEIER, W.: Grundprinzip und Rechenformeln einer strengen Analyse geodätischer Deformationsmessungen. VII. Internationaler Kurs für Ingenieurmessungen hoher Präzision, Bd. II, S. 465-482, TH Darmstadt 1976.
- REISSMANN, G.: Die Ausgleichsrechnung. VEB Verlag für Bauwesen, 4. Aufl. 1976.
- RINNER, K.: Der geodätische Beitrag zu geodynamischen Projekten. ZfV 1974, S. 325-335.
- RINNER, K.: Bericht über Laser- und Mikrowellenmessungen im Testnetz Steiermark. Mitt.geod.Inst. TH Graz Nr.22, 1976.
- SCHMID, H.: Karawankenprojekt. Internationale geodätische Woche Obergurgl, Univ.Innsbruck, Inst.f.Vermessungswesen und Phot. Nr.2, 1976, S. 41-54.
- SCHMID, H.: Radiosondenaufstiege zur Berechnung des mittleren Brechungsindex der Atmosphäre bei der elektronischen Distanzmessung. Veröff.des Geod.Inst.der Rh WTH Aachen, Nr.23, 1977, S. 381-388.
- SCHMID, H., PETERS, K.: Bericht über vermessungstechnische Untersuchungen zur Frage der N/S Alpengrenze im Zusammenhang mit rezenten Krustenbewegungen (Periadriatische Naht/Karawankenprofil). Mitt.d.Öst.Geologischen Gesellschaft 71/72 f.Jg. 78/79, Themenband "Geologischer Tiefbau der Ostalpen", im Druck (1980).
- SMITH, R.S.U. et al.: The measurement of Fault Motion by Satellite Laser Ranging. Tectonophysics 5, S. 59-67, Elsevier 1979.
- SWOBODA, K.: Geodätische Erforschung der Erdkrusten- und Bodenbewegungen. DGK, Reihe B, Heft 119, München 1967.
- THURM, H., BANKWITZ, HARNISCH: Rezente horizontale Deformationen der Erdkruste im Südostteil der DDR. Petermanns

Geographische Mitteilungen, S. 281-304, Heft 4/1977.

WELSCH, W.: Überwachung mikrotektonischer Bewegungen mit Hilfe lokaler geodätischer Netze, gezeigt an einem Beispiel in den peruanischen Anden. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 1978. Inst.f.Vermessungswesen und Photogrammetrie, Univ.Innsbruck, Nr.3, 1978.