

**Einsatz von Fuzzy Methoden zur Detektion
konsistenter Punktbewegungen**

von

Michaela Haberler

**Veröffentlichung des Instituts für
Geodäsie und Geophysik
Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie**

ISSN 1811 - 8380

Herausgeber und Verleger: o.Univ.Prof.Dr.-Ing. Heribert Kahmen
Institut für Geodäsie und Geophysik
Technische Universität Wien
A-1040 Wien, Gusshausstrasse 27-29

Diese Arbeit wurde an der Fakultät für Mathematik und Geoinformation der Technischen Universität Wien zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der technischen Wissenschaften eingereicht.

Die Kosten für den Druck wurden von dem globalen Budget des Institutes getragen.

Referent: o.Univ.Prof. Dr.-Ing. Heribert Kahmen
Institut für Geodäsie und Geophysik
Technische Universität Wien

Korreferent: Univ.Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Niemeier
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
Technische Universität Braunschweig

Tag der mündlichen Prüfung: 28. Oktober 2004

Anmerkung: Diese Arbeit entstand im Zuge des von der EU geförderten Projekts OASYS (EVG1-CT-2002-00061). Aus wirtschaftlichen Gründen können die Details der Implementation der einzelnen Fuzzy Systeme nicht veröffentlicht werden. Das Kapitel 4 ist hier daher im Vergleich zur originalen Arbeit gekürzt dargestellt.

Druck: KOPIE, A-1040 Wien
Auflage 70 Stück

Zusammenfassung

Geodätische Deformationsmessungen und vor allem die statistische Deformationsanalyse sind wichtige Teilgebiete der Ingenieurgeodäsie. Die Grundlagen für die Auswertung quasistatischer Überwachungsnetze sind seit langer Zeit bekannt; ein vollständiges und softwaremäßig automatisiertes Regelwerk zur Aufdeckung von signifikanten Punktbewegungen existiert seit über 20 Jahren.

Um die bestimmten Punktbewegungen genauer interpretieren zu können, sind weiterführende Analysen notwendig. Ein Schwerpunkt dabei ist die Bestimmung von Blöcken, d.h. die Zusammenfassung von Punkten mit ähnlichem Bewegungsmuster zu einem konsistenten Teilbereich. Vor allem für die Untersuchung von Krustenbewegungen, d.h. für das Finden von Verwerfungszone oder Aufdecken von lokalen Rutschungsgebieten, ist eine solche Vorgehensweise absolut notwendig. Die Zuordnung der überwachten Punkte zu den einzelnen Blöcken geschah und geschieht auch heute noch rein visuell, d.h. der zuständige Bearbeiter erkennt aus einer graphischen Darstellung der Verschiebungsvektoren zusammengehörige Punkte aufgrund ihres Bewegungsmusters, sodaß völlig intuitiv ähnliche Vektoren, also Vektoren mit ähnlicher Länge und ähnlichem Azimut, zusammengefasst werden.

Diese Eigenschaft des intuitiven menschlichen Denkens kann man sich zunutze machen, um eine automatische Detektion konsistenter Punktbewegungen zu implementieren. Zur Nachahmung des menschlichen Denkprozesses stehen einige moderne Verfahren wie wissensbasierende Systeme, künstliche neurale Netzwerke und Fuzzy Methoden zur Verfügung. Für die aktuelle Aufgabenstellung eignen sich besonders die Fuzzy Methoden, da hier die menschliche Sprache mit all ihrer Unschärfe abgebildet werden kann, um Begriffe wie „ähnliche Länge“ oder „ähnliches Azimut“ zu modellieren. Die Entscheidungsfindung geschieht in einem regelbasierten Inferenzsystem; auch hier werden die Alltagsregeln der menschlichen Sprache fast direkt übernommen.

Zusätzlich zu diesen „visuellen“ Parametern existieren natürlich auch geodätische Indikatoren, um das Bewegungsverhalten eines Objekts anhand der Verschiebungsvektoren der Objektpunkte zu beurteilen. Hier wird die Strainanalyse verwendet, um die inneren Verzerrungen des Objekts beschreiben zu können. Die daraus abgeleitete Verzerrungsellipse liefert ebenfalls wertvolle Indikatoren im Algorithmus zur Blockdetektion. Diese und weitere Parameter werden vorgestellt.

Anhand von drei Beispielen wird das entwickelte Fuzzy System getestet; es zeigt sich, dass diese moderne Methode gut geeignet ist, um Punkte mit ähnlichem Bewegungsmuster zu finden, sowohl im lokalen Bereich bei Verwerfungszone und Rutschungsgebieten als auch im globalen Anwendungsfall der Plattentektonik.

Abstract

Geodetic deformation measurements and the statistical deformation analysis are an important field of work within engineering geodesy. The basics for the evaluation of quasi-static monitoring networks are well-known. A complete set of formulas and rules exists for about 20 years; they are implemented in several software packages to allow for an automated analysis.

To do a detailed interpretation of the calculated displacements, further investigations are necessary. A main task is the determination of blocks, this means the detection of points with a similar pattern of movement representing one consistent body. This procedure is absolutely necessary for investigations on crustal deformations, e.g. finding fault zones or detecting local sliding areas.

The assignment of the monitored points to the several blocks up to now has been performed in a purely visual way, which means that the investigator distinguishes matching points - out of a graphical representation of their displacement vectors - based on their pattern of movement. So, similar vectors are combined to one block in a purely intuitive way, assessing the similarity of the length and the direction of the vectors.

This property of intuitive human thinking can be used to implement an automated detection of consistent point movement. To copy the human thinking process, some modern techniques like knowledge based systems, artificial neural networks and fuzzy systems are available. For the actual problem fuzzy systems are well suited, because the human language with its inherent fuzziness can be mapped to model terms like "similar length" or "similar azimuth". The decision finding is done in a rule-based inference system; here again, the rules of everyday life can directly be used.

Additionally to this "visual" parameters of course some geodetic indicators exist to assess the movement of an object based on the displacement vectors of the monitored points. Here, the strain analysis is used to describe the inner distortions of an object. The derived strain ellipse delivers valuable indicators for the block detection algorithm. These and other parameters used are presented.

Based on three examples, the developed fuzzy system is tested; it turns out that this modern method is suitable for finding points with consistent pattern of movement, both on a local scale (fault zones, sliding areas) as well as for global applications like plate tectonics.

Inhaltsverzeichnis

1	MOTIVATION	1
1.1	GESCHICHTLICHER ÜBERBLICK	1
1.2	NEUE METHODEN IN DER DEFORMATIONSANALYSE.....	3
1.3	ÜBERBLICK ZUR VORLIEGENDEN ARBEIT	5
2	DEFORMATIONSMESSUNGEN UND –ANALYSE	9
2.1	GRUNDLAGEN DER GEODÄTISCHEN DEFORMATIONSANALYSE	9
2.1.1	<i>Objektmodell</i>	9
2.1.2	<i>Basismodell und Einzelausgleichungen</i>	11
2.1.3	<i>Einbeziehung der Kongruenzhypothese</i>	13
2.1.4	<i>Globaler Kongruenztest</i>	14
2.1.5	<i>Lokalisierung der Bewegungen</i>	14
2.1.6	<i>Zusammenfassung</i>	15
2.2	TRANSFORMATIONEN UND STRAINANALYSE	16
2.2.1	<i>Ähnlichkeits- und Affintransformation</i>	17
2.2.2	<i>Strainanalyse</i>	20
3	EINFÜHRUNG IN FUZZY METHODEN	28
3.1	KONZEPTE DER UNSCHARFEN MENGEN	29
3.1.1	<i>Zugehörigkeitsfunktionen (membership functions):</i>	29
3.1.2	<i>Operationen auf unscharfen Mengen:</i>	32
3.1.3	<i>Fuzzy Logik und unscharfes Schließen:</i>	34
3.2	FUZZY CONTROL (UNSCHARFE REGELUNG).....	36
3.2.1	<i>Linguistische Variable</i>	38
3.2.2	<i>Schritt 1: Fuzzifizierung</i>	39
3.2.3	<i>Schritt 2: Regelbasis</i>	39
3.2.4	<i>Schritt 3: Inferenz und Aggregation</i>	40
3.2.5	<i>Schritt 4: Defuzzifizierung</i>	42
3.2.6	<i>Typen von Fuzzy Reglern</i>	44
4	GRUNDLAGEN DES ALGORITHMUS	46
4.1	ÜBERSICHT ÜBER DEN PROGRAMMABLAUF	46
4.1.1	<i>Nachbarschaft</i>	46
4.1.2	<i>Schema des Programmablaufs</i>	48
4.2	FUZZY SYSTEM „AUSWAHL4“	49
4.2.1	<i>Outputvariable 'GüteBlock'</i>	50
4.2.2	<i>Standardabweichung der Gewichtseinheit nach dem Ausgleich</i>	51
4.2.3	<i>Halbachsen e_1 und e_2 der Verzerrungsellipse</i>	52
4.2.4	<i>Interquartilsabstand der Residuen nach dem Ausgleich</i>	53
4.2.5	<i>Ähnlichkeit der Verschiebungsvektoren in Azimut</i>	56
4.2.6	<i>Verhältnis der Beträge der Verschiebungsvektoren</i>	58
4.2.7	<i>Demonstration einer Auswertung durch das Fuzzy System</i>	58
4.3	FUZZY SYSTEM „AUSWAHL-ITERATION“	60
4.3.1	<i>Outputvariable 'GüteBlock'</i>	61
4.3.2	<i>Eingangsvariable 'Ähnlichkeit in Azimut'</i>	62

4.3.3	<i>Beträge der Verschiebungsvektoren</i>	63
4.4	FUZZY SYSTEM „BEWERTUNG“	63
4.4.1	<i>Ausgangsvariable 'Bewertung'</i>	64
4.4.2	<i>Eingangsvariable 'Verhältnis-s0'</i>	65
4.4.3	<i>Eingangsvariablen 'Verhältnis-e1' und 'Verhältnis-e2'</i>	67
4.4.4	<i>Eingangsvariable 'Verhältnis-igr'</i>	68
4.4.5	<i>Eingangsvariable 'Verhältnis-F'</i>	68
4.4.6	<i>Ähnlichkeit der Richtungen</i>	68
4.4.7	<i>Ähnlichkeit der Beträge</i>	69
4.5	FUZZY SYSTEM „ABBRUCH“	69
4.5.1	<i>Outputvariable 'Abbruch'</i>	70
4.5.2	<i>Eingangsvariable 'Bewertung'</i>	70
4.5.3	<i>Eingangsvariable 'Änderung der Bewertung'</i>	71
4.5.4	<i>Demonstration der Auswertung durch das Fuzzy System</i>	72
4.6	ZUSAMMENFASSUNG	73
5	ANWENDUNGSBEISPIELE	76
5.1	TESTNETZ DELFT	76
5.1.1	<i>Datenmaterial</i>	76
5.1.2	<i>Auswertung</i>	77
5.1.3	<i>Interpretation</i>	82
5.2	LOKALES VERSCHIEBUNGSFELD – HANGGRUTSCHUNG	83
5.2.1	<i>Datenmaterial</i>	83
5.2.2	<i>Auswertung</i>	84
5.2.3	<i>Interpretation</i>	87
5.3	GLOBALES VERSCHIEBUNGSFELD – PLATTENTEKTONIK	87
5.3.1	<i>Datenmaterial</i>	87
5.3.2	<i>Auswertung</i>	91
5.3.3	<i>Interpretation</i>	105
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	107
	LITERATURVERZEICHNIS	110

1 Motivation

Eine wichtige Aufgabe der Ingenieurgeodäsie ist es, Deformationen, also geometrische Veränderungen verschiedenster Art, aufzudecken, sei es an Bauwerken, technischen Anlagen oder anderen künstlichen und natürlichen Objekten wie Hangrutschungen, Verwerfungszonen etc.

In der Regel werden geodätische Überwachungsnetze rund um das zu beobachtende Objekt geplant und daran anschließend mit verschiedensten Methoden in mehreren Epochen gemessen. Zur Auswertung dieser Daten wurde die Deformationsanalyse entwickelt, die statistisch gesicherte Aussagen über die Veränderung des Objekts machen kann. Grundsätzliche Fragestellungen sind etwa, welche Punkte sich signifikant bewegt haben (Einzelpunktbewegung) oder ob sich einige der beobachteten Punkte gleichförmig bewegen (Blockbewegung). Bei tektonischen Überwachungsnetzen z.B. kann so die Verwerfung lokalisiert werden.

1.1 Geschichtlicher Überblick

Überwachungsmessungen und die dazugehörige Deformationsanalyse haben eine lange Tradition in der Ingenieurgeodäsie. Bereits Anfang des 20. Jahrhunderts wurde die Überwachung von Staumauern notwendig; die Auswertung damals verwendete keine strengen Algorithmen und auch keinerlei statistische Aussagen. Das Endergebnis der Auswertung waren aber bereits die Verschiebungsvektoren der Objektpunkte, die aus den Messungen mehrerer Epochen ermittelt wurden.

Lange Zeit endete hier die Analyse. (WELSCH, 1981) nennt dies die Phase der *deskriptiven Deformationsanalyse*. Durch die rasche Entwicklung von Meßinstrumenten und Computeranlagen erfolgte der Übergang zur *statistischen Deformationsanalyse*. Es wurde versucht, statistische Beurteilungskriterien für Überwachungsmessungen, vor allem für die Punktverschiebungen, zu finden.

So schlugen z.B. (HECK, KUNTZ, MEIER-HIRMER, 1977) und (HECK, 1978) vor, die relative Konfidenzellipse zwischen Verschiebungsvektoren zweier Epochen dafür heranzuziehen. Man zeichnet dazu im Startpunkt des Verschiebungsvektors die dazugehörige Konfidenzellipse; liegt der Endpunkt des Vektors außerhalb der Ellipse, wird die Verschiebung als signifikant angesehen. Dies stellt ein sehr einfaches, anschauliches Verfahren dar, das auf einer visuellen Beurteilung der Darstellung der Verschiebungsvektoren beruht.

In den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts beschäftigten sich viele Forschungsgruppen weltweit mit der Thematik der Deformationsmessungen und -analyse. Jede Gruppe entwickelte eigene Analysealgorithmen, die vom Prinzip her meist ähnlich waren.

Denn überall wurden die zu untersuchenden Objekte durch diskrete Punkte abstrahiert, zusätzlich wurden meist Stützpunkte im stabilen Bereich in das geodätische Netz aufgenommen, um durch die wiederholte Messung dieser Netze Aussagen über die Veränderung der Punkte und somit des gesamten Objekts treffen zu können. Deshalb wurde innerhalb der FIG Working Group 6.1 (WG on Deformation Measurements) 1978 das „Ad Hoc Committee on Deformation Analysis“ (Task Force 6.1.1) gegründet, um alle existierenden Verfahren zu untersuchen und gegebenenfalls zu vereinheitlichen. Es wurden (zum Teil simulierte) Testdaten an alle teilnehmenden Gruppen verschickt, um die verschiedenen Verfahren vergleichen zu können. Im „Seminar über Deformationsanalysen“ (CASPARY, WELSCH, 1979) wird z.B. ein Überwachungsnetz in Peru herangezogen, um signifikante Punktbewegungen zu bestimmen.

Bereits seit den späten 70er Jahren wurde parallel zur Deformationsanalyse die Strainanalyse bei Auswertung von Hangrutschungsmessungen und tektonischen Überwachungsmessungen eingesetzt, da das Konzept von Stress und Strain sehr gut auf diese Fragestellungen übertragbar ist. Vorreiter dabei waren z.B. (WELSCH, 1984) und (WELSCH, 1982) in München, (BRUNNER, 1979), (BRUNNER ET AL, 1981), (BRUNNER ET AL, 1984) in Melbourne sowie eine Gruppe des US Geological Survey, die Messungen in Kalifornien (San Andreas Verwerfung) analysierten, z.B. (PRESCOTT, SAVAGE, 1976, PRESCOTT, 1981).

In den 80er Jahren wurde in den Untersuchungen also dazu übergegangen, die Ergebnisse, die Verschiebungsvektoren, genauer zu analysieren bzw. zu interpretieren (*Phase der Interpretation*, (WELSCH, 1981)). So wurde z.B. im „Seminar Deformationsanalysen '83“ die grundsätzliche Aufforderung an die teilnehmenden Gruppen gestellt, neben den statistisch gesicherten Verschiebungsvektoren weiterführende Aussagen, z.B. über Deformationsmodelle oder über Blockbewegung, zu machen. Die vorgestellten Optionen bestanden darin, entweder ein Modell visuell zu erkennen und dann mittels eines statistischen Hypothesentests zu bestätigen oder abzulehnen, oder die Strainparameter für ein aus den Messpunkten erzeugtes Dreiecksmaschennetz zu berechnen und darauf aufbauend – wiederum visuell – Aussagen zu treffen und Blöcke konsistenter Bewegung zusammenzufassen.

Grundsätzlich wurde im Abschlußbericht des Ad Hoc Committees 1986 (CHRZANOWSKI, CHEN, 1986) festgestellt, dass es nicht möglich ist, ein einheitliches, allgemein gültiges Modell zur Auswertung von Überwachungsmessungen zu finden. Die generelle Theorie der mittleren Klaffung (PELZER, 1971) bzw. des globalen Kongruenztests (NIEMEIER, 1979) liegt praktisch allen Methoden zugrunde. Die

weiterführenden unterschiedlichen Modellansätze sind allerdings sehr ausgereift, weswegen keine Gruppe auf ihre spezielle Methode verzichten möchte.

Die Arbeit des Committees war damit abgeschlossen, da alle Methoden untersucht und ausgeschöpft waren. Somit endete die Arbeit an der Thematik Deformationsanalyse quasistatischer Netze; die Forschung konzentrierte sich in den nächsten Jahren auf kinematische und dynamische Überwachungsmessungen. Als Beispiele der zahlreichen Literatur seien hier (BOLJEN, 1983) und (HEUNECKE, 1995) genannt. Boljen entwickelte einen allgemeinen Lösungsansatz für ein dynamisches Deformationsmodell. Damit kann der Zusammenhang zwischen den aufgetretenen Deformationen und ihren Ursachen mathematisch beschrieben werden. Die Arbeit behandelt dabei speziell bodenmechanische Problemstellungen mittels eines elastoviskoplastischen Deformationsmodells. Der Hauptaspekt liegt bei der Anpassung und Überprüfung dieses Deformationsmodells durch geodätische Messungen. Heunecke baut seinerseits auf der Arbeit von Boljen auf. Durch die fächerübergreifende Integration von Systemtheorie, Mechanik und Ingenieurgeodäsie entwickelte er aus dem bereits bewährten KALMAN-Filter das Hannoversche Filter zur parametrischen Identifikation von Deformationsprozessen.

1.2 Neue Methoden in der Deformationsanalyse

In den 90er Jahren begannen neue Methoden wie wissensbasierende Systeme, Fuzzy Technologien sowie neuronale Netze ihren Einzug in die Geodäsie. Plötzlich wurde auch das als abgeschlossen angesehene Kapitel der statistischen Deformationsanalyse wieder interessant.

Hier soll ein kurzer Überblick über Arbeiten gegeben werden, die Teilprobleme der Deformationsanalyse mit diesen neuen Methoden lösen:

(LEHMKÜHLER, 1993) sieht die geodätische Deformationsanalyse als komplizierten Entscheidungsprozeß. Einige Teile der Deformationsanalyse bleiben nach wie vor dem menschlichen Auswerter überlassen, z.B. die Bildung kongruenter Punktgruppen, wo visuell und daher natürlich höchst subjektiv gehandelt wird. Solche Mängel erschweren die Automatisierung der Deformationsanalyse; daher enden Programmpakete üblicherweise mit der Berechnung und Visualisierung von Verschiebungsvektoren. Lehmkuhler sieht die Deformationsanalyse als Mustererkennungsaufgabe, wo seit langem Segmentierungsverfahren eingesetzt werden, um – allgemein – Teilbereiche eines Bildes, die in bestimmter Hinsicht einheitlich sind, hervorzuheben. Konkret werden durch die Begriffe *Ähnlichkeit* und *Nähe* aus Verschiebungsvektoren flächenhaft verteilter Punkte zusammenhängende Regionen mit einheitlichem Verschiebungsmodell erkannt. Weiterführende Arbeiten zur

Automatisierung der geodätischen Deformationsanalyse werden vorgeschlagen, da z.B. der Prozeß des Verstehens von Deformationsvorgängen als kognitiver Prozeß gut von wissensbasierenden Systemen nachgebildet werden könnte.

(BREZING, 2000) greift die Problematik auf, die Lehmkühler einige Jahre zuvor angesprochen hatte. Die programmgesteuerte Deformationsanalyse war immer noch unzureichend, da die Interpretation der Ergebnisse nach wie vor vom menschlichen Experten durchgeführt werden musste. Um diesen Vorgang zu objektivieren und damit eine Automatisierung zu ermöglichen, entwickelte Brezing ein Expertensystem (heute besser wissensbasierendes System genannt), das zusätzlich zu Erfassung und Auswertung geodätischer Beobachtungsdaten auch eine automatische Untersuchung auf Deformationen sowie eine Interpretation der Verschiebungsvektoren beherrschte. Konkret wurde damit der Teilbereich des Erkennens und der Verifizierung von Deformationsmodellen wie Verschiebung, Rotation, Stauchung, Dehnung, Scherung, Biegung, Wölbung sowie Kombinationen davon abgedeckt. Die Vorteile wissensbasierender Systeme liegen vor allem darin, dass menschliche Entscheidungsprozesse nachgebildet werden können. Weiters kann das in einer eigenen Wissensbasis gespeicherte Expertenwissen leicht aktualisiert werden, ohne den Programmcode ändern zu müssen.

(HEINE, 1999) beschreibt die Deformationsanalyse als einen Spezialfall der allgemeinen Systemtheorie und setzt daher in der Systemtechnik etablierte Verfahren ein. Anhand eines bewegungsaktiven Hangareals im Staubereich einer Talsperre werden Volterra-Modelle, Differenzgleichungsmodell, Fuzzy Modelle sowie Neuronale Netze verwendet, um den dynamischen Prozeß der Rutschung nachzubilden. Als Eingangsgrößen dienen u.a. Stauhöhe, Niederschläge, Tagesmitteltemperaturen und Schneehöhen. Heine kommt zu dem Schluß, dass Volterra-Modelle für diese hochkomplexe Anwendung mit nichtlinearem Charakter nicht so geeignet scheinen wie Fuzzy Modelle und künstliche neuronale Netze. Die Fuzzy Modelle konnten im gezeigten Beispiel gut zur Überprüfung geomechanischer Modellvorstellungen eingesetzt werden, während sich künstliche neuronale Netze sehr gut zur Vorhersage von Deformationsbeträgen bewährten.

(MIIMA, 2002) zeigt den erfolgreichen Einsatz von künstlichen neuronalen Netzen sowie von Fuzzy Logik zur Modellierung von Bauwerks-Deformationsprozessen. Konkret wurde der Verformungsprozeß einer Brücke anhand von fast 3 Jahren kontinuierlicher Überwachungsmessungen als nichtlinearer dynamischer Prozeß beschrieben. Die beiden Methoden sollten Zusammenhänge zwischen Eingängen (z.B. Druck, Temperatur, Wasserstandsänderungen, Verkehrslast) und Ausgängen

(Koordinatendifferenzen gemessener Punkte) finden, um auch eine Prädiktion des weiteren Bewegungsverhaltens der Brücke zu ermöglichen. Dabei ergaben sich als Vorteile neuronaler Netze, dass die Berechnungszeiten kurz sind und das Modell anhand der Beobachtungen „lernen“ kann. Im Gegensatz dazu sind die Resultate allerdings nicht so anschaulich sind wie bei Fuzzy Modellen. Beide Verfahren haben sich als geeignet erwiesen, um nichtlineare dynamische Systeme zu beschreiben; Vorteile beider Methoden gegenüber klassischer Modellierungsmethodik sind, dass die Verfahren robust und unabhängig von a-priori-Systeminformation sind.

(ZIMMERMANN, 2004) versucht, die geodätische Deformationsanalyse als Informationssystem zu konzipieren. Eine vollautomatische Auswertung beginnend mit der Aufnahme der Beobachtungen, über Vorverarbeitung, Netzausgleichung und Deformationsanalyse bis zur Visualisierung der Ergebnisse wäre wünschenswert. Ein Grund, warum das noch nicht möglich ist, liegt an den verschiedenen Softwareprodukten, die für Teilaufgaben verwendet werden (müssen), und den daraus resultierenden unterschiedlichen Datenformaten. Weiters ist gerade bei der Deformationsanalyse mit eventuell langen Zeitintervallen zwischen den Messepochen auf eine langfristige und nachhaltige Speicherung der Daten zu achten (Datenpersistenz). Hier kann die generelle Konzeption eines übergeordneten Informationssystems mittels objektorientierter Modellierung helfen, diese Nachteile zu überwinden. Denn durch objektorientierte Konzepte wie Vererbung, Kapselung, Generalisierung, Abstraktion wird eine einheitliche Datenstruktur erstellt, in deren Mittelpunkt Objekte und ihre Beziehungen stehen. Eine mächtige Datenbank im Hintergrund gewährleistet Datenkonsistenz für die verschiedenen Auswerteprozesse sowie Datenpersistenz über längere Zeit.

1.3 Überblick zur vorliegenden Arbeit

Die vorliegende Arbeit verwendet die in der Geodäsie noch eher jungen Fuzzy Methoden, um konsistente Punktbewegungen aufzudecken. Die Idee war, dort anzuschließen, wo das Ad Hoc Committee 1986 ihre Forschungen einstellte: aus den Verschiebungsvektoren, die die geodätische Deformationsanalyse liefert, weitere Informationen über Blockbewegungen abzuleiten.

Ursprünglich stammt die Idee zu diesem Verfahren aus (JIANG, ZHANG, 1999). Dort werden aus tektonischen Überwachungsmessungen bzw. den resultierenden Verschiebungsvektoren mittels einer Affintransformation tektonische Blöcke zusammengefasst, indem die „Güte“ der Transformation (Standardabweichung der Gewichtseinheit s_0) untersucht wird. Der grundsätzliche Gedanke ist, dass die Güte einer Punktgruppe, die alle auf demselben Block liegen, sicher kleiner ist als von

Punkten, die verschiedene Bewegungsmuster aufweisen. Die Abbruchschranke, wann ein Block als vollständig angesehen werden kann, ist sehr einfach gewählt. Sobald s_0 die mittlere Genauigkeit der Verschiebungen überschreitet, wird der Block beendet.

Dieses einfache Verfahren sollte nun „intelligent“ mittels Fuzzy Methoden erweitert werden. Aufgabenstellung ist also, aus gegebenen Verschiebungsvektoren Strukturen bzw. Blöcke mit ähnlichem Bewegungsmuster zu extrahieren. Dafür werden einerseits geodätische Parameter wie z.B. Strainparameter als Indikatoren verwendet, andererseits werden die Möglichkeiten der Fuzzy Systeme mit weiteren linguistisch definierten Kennwerten voll ausgeschöpft.

Denn ein Experte, der eine gegebene Graphik mit Verschiebungsvektoren manuell (bzw. eigentlich visuell) beurteilt, orientiert sich am Bewegungsmuster, um (geologisch bzw. tektonisch) sinnvolle Blockeinteilungen zu finden. Ein Block ist also im menschlichen Denken dadurch definiert, dass die auf ihm gelegenen Punkte ein ähnliches Bewegungsmuster besitzen. Die Eigenschaft „ähnlich“ kann nicht einfach berechnet werden; diese Definition ist ein typisches Beispiel für eine linguistische Regel, wie wir Menschen sie im täglichen Leben ständig verwenden. Um diesen Denkprozeß dem Computer zugänglich zu machen, werden Fuzzy Systeme benötigt. Hier können Eigenschaften wie z.B. „ähnlich“ entsprechend unserem Denken modelliert werden. Die Ähnlichkeit des Bewegungsmusters kann z.B. durch die Übereinstimmung von Richtung und Länge der Verschiebungsvektoren beschrieben werden.

Die Notwendigkeit zur Entwicklung des Algorithmus ergab sich aus dem Projekt OASYS (= Integrated Optimization of Landslide Alert Systems). Im Rahmen dieses im 5. Rahmenprogramm der EU geförderten Projekts wird ein verbessertes Monitoringsystem sowie ein Online-Alarmsystem für Hangrutschungsgebiete erstellt. Die wichtigsten Schritte seien hier kurz erklärt (KAHMEN, NIEMEIER, 2003): Mittels eines multidisziplinären Ansatzes werden mögliche Hangrutschungsgebiete identifiziert; dies geschieht auf Basis von Satellitenbildern, Hinweisen aus der Bevölkerung, geologischen Merkmalen usw, siehe Abbildung 1.1.

Für ein gefährdetes Gebiet muß zunächst ein grobes geodätisches Überwachungsnetz geschaffen werden; die Messungen erfolgen epochenweise und werden mittels einer klassischen Deformationsanalyse ausgewertet, um die Bewegung des gefährdeten Gebiets bestimmen zu können, siehe Abbildung 1.2.

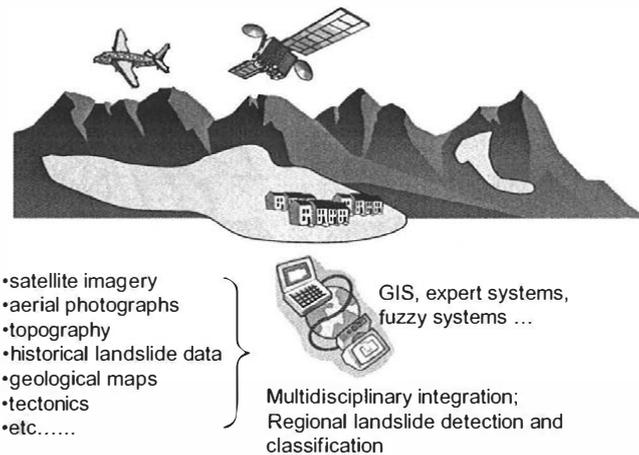


Abbildung 1.1: Schritt 1 von OASYS: Detektion möglicher Rutschungsgebiete.

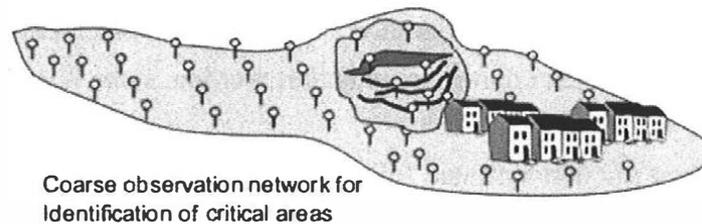


Abbildung 1.2: Schritt 2 von OASYS: Geodätische Überwachung zum Finden der instabilen Zonen.

Hier schließt der vorgestellte Algorithmus an: aus den berechneten Verschiebungen sollen nun Blöcke mit ähnlichem Bewegungsmuster detektiert werden. Ein Rutschhang besteht zumeist aus mehreren Bereichen, die sich zu verschiedenen Zeiten mit verschiedenen Geschwindigkeiten in verschiedene Richtungen bewegen. Werden diese Blockgrenzen sowie die Grenzen zwischen stabilen und bewegten Punkten gefunden, können im nächsten Schritt des Projekts (bei zunehmender Gefährdung des Gebiets) relativ messende, hochpräzise geotechnische Sensoren (z.B. Extensometer) über diese Blockgrenzen hinweg installiert werden. Diese Sensoren erzeugen permanent Daten über den relativen Bewegungszustand der Blöcke zueinander, siehe Abbildung 1.3.

Diese relativen Informationen sind wichtige Eingangsdaten für das intelligente Alarmsystem. Dazu soll ein wissensbasierendes System implementiert werden, das online verschiedenste Informationen bewertet. Im Gefahrenfall muß Alarm bei den zuständigen Behörden ausgelöst und die Bevölkerung informiert werden.

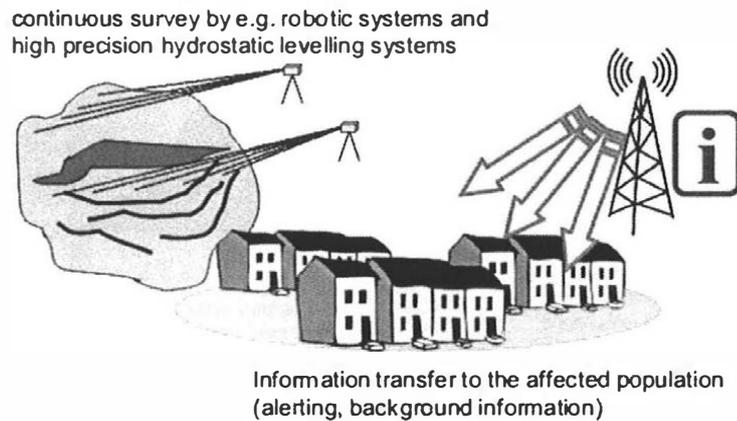


Abbildung 1.3: Schritt 3 von OASYS: Kontinuierliche Überwachung des bewegten Gebiets sowie Alarmierung der Bevölkerung.

Es hat sich allerdings gezeigt, dass das vorgestellte Verfahren sowohl für lokale als auch für regionale und sogar globale Verschiebungsmessungen angewendet werden kann. Eines der Beispiele zeigt die Separation von globalen Verschiebungsdaten; die bekannten tektonischen Platten können so detektiert werden, siehe Kapitel 5.

Der Aufbau der Arbeit gliedert sich wie folgt: Kapitel 2 gibt einen kurzen Überblick über die statistische Deformationsanalyse als Datenquelle für den entwickelten Algorithmus. Daraufhin wird die Theorie von Affintransformation bzw. der dazu äquivalenten Strainanalyse, die wichtige Parameter für den Algorithmus liefert, beschrieben. Kapitel 3 gibt eine kurze Einführung in Fuzzy Methoden, wobei nur auf verwendete Teilbereiche dieser umfangreichen und noch lange nicht vollständig erforschten Thematik eingegangen werden kann. Kapitel 4 bietet einen Überblick über die verschiedenen implementierten Fuzzy Systeme, sowie den mathematischen Hintergrund der jeweils verwendeten Parameter. Kapitel 5 zeigt 3 Anwendungsbeispiele für den entwickelten Algorithmus, sowohl im lokalen als auch im globalen Rahmen. Schlussfolgerungen und ein Ausblick auf die Zukunft moderner Methoden wie Fuzzy Systeme, wissensbasierende Systeme und neuronale Netze in der Geodäsie beenden die Arbeit.

2 Deformationsmessungen und –analyse

Der in Kapitel 4 vorgestellte Algorithmus zur Bestimmung von Blöcken mit ähnlichem Bewegungsmuster benützt Verschiebungsvektoren als Grundlage der Analyse. Prinzipiell können alle Arten von Verschiebungsvektoren verwendet werden, sinnvollerweise werden allerdings nur jene Vektoren analysiert, für die sichergestellt ist, dass die Bewegungen statistisch signifikant sind und methodisch richtig hergeleitet wurden (Stichwort: Datumsproblematik bei Kongruenzuntersuchungen). Daher wird zuerst kurz das Verfahren der geodätischen Deformationsanalyse vorgestellt, damit die Voraussetzungen des Algorithmus bekannt sind und die methodische Korrektheit der Eingangsdaten des Analysealgorithmus somit gewährleistet ist.

2.1 Grundlagen der geodätischen Deformationsanalyse

Die Aufgabe geodätischer Überwachungsmessungen besteht darin, geometrische Veränderungen an künstlichen sowie natürlichen Objekten zu erfassen. Die geodätische Deformationsanalyse ermöglicht die Bewertung der gemessenen Veränderungen. Im folgenden sollen die wichtigsten Schritte der Deformationsanalyse skizziert werden.

2.1.1 Objektmodell

Für tektonische Überwachungsmessungen (Hangrutschungen, Verwerfungszonen etc.) wird meist ein quasistatisches Punktmodell verwendet. Das bedeutet, dass durch wiederholte Messungen die zwischen den Epochen aufgetretenen Bewegungen mittels eines Kongruenztests bestimmt werden. Im Gegensatz zum kinematischen und dynamischen Modell werden keine Untersuchungen über Kräfte und ihre Ursachen angestrebt.

Das Objekt wird dabei durch diskrete Punkte so abstrahiert, dass aufgrund der Messungen und der daraus berechneten Bewegungen des Punktrasters auf Deformationen des Objekts geschlossen werden kann (Generalisierungsproblem, siehe Abbildung 2.1).

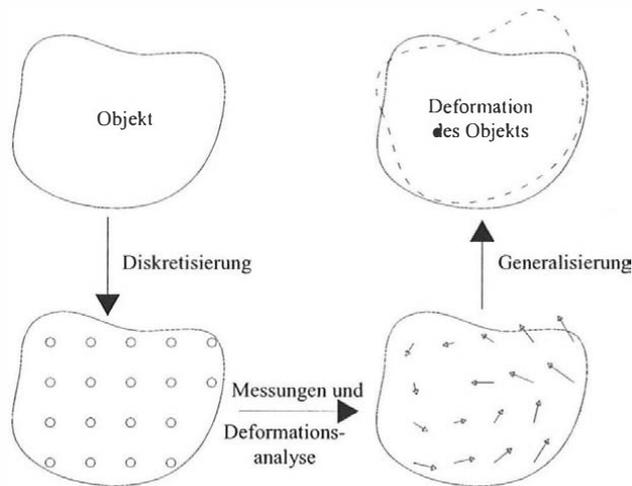


Abbildung 2.1: Generalisierungsproblem bei Überwachungsnetzen, nach (NIEMEIER, 1985).

Der prinzipielle Aufbau eines solchen Überwachungsnetzes ist im Folgenden dargestellt (siehe Abbildung 2.2):

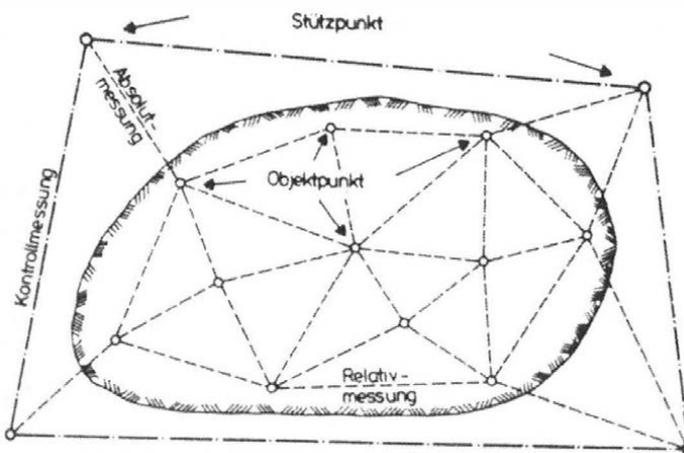


Abbildung 2.2: Prinzipskizze eines geodätischen Überwachungsnetzes, aus (PELZER, 1985).

Besteht das Überwachungsnetz nur aus Objektpunkten, spricht man von einem Relativmodell, da nur relative Bewegungen des Objekts ermittelt werden können; ein Beispiel dafür wären Messungen an tektonischen Verwerfungszonen, wo kein Teilbereich als stabil angesehen werden kann.

Sind zusätzlich Referenz- bzw. Stützpunkte im stabilen Gebiet vorhanden (wie z.B. bei lokalen Hangrutschungen), können durch Einbeziehung dieser Punkte ins Überwachungsnetz auch absolute Deformationen bestimmt werden. Man spricht hier von einem zweistufigen Netzaufbau. Die angenommene Stabilität der Referenzpunkte muß selbstverständlich überprüft werden.

Messungen, welche die Punkte verbinden, werden in mindestens zwei Epochen (Null- und Folgemessungen) durchgeführt; daraus können die wahrscheinlichsten Koordinaten jedes Punktes zu jeder Epoche berechnet werden. Da sich diese Koordinaten auch bei stabiler Lage der Punkte im Rahmen der Meß- und Koordinatengenauigkeiten unterscheiden werden, müssen signifikante Punkt-bewegungen durch eine Kongruenzanalyse bestimmt werden. Wie im geschichtlichen Überblick (Kapitel 1.1) bereits ausgeführt wurde, existieren dafür mehrere, vom Prinzip her ähnliche Methoden; stellvertretend soll hier das Hannoversche Verfahren kurz skizziert werden.

2.1.2 Basismodell und Einzelausgleichungen

Das Basismodell mit der linearen Kongruenzhypothese lautet für alle gemessenen Epochen (NIEMEIER, 1979):

$$E\{l\} = Ax$$

$$H_0 : Bx = w = 0$$

$$\Sigma_{ll} = \sigma_0^2 Q = \sigma_0^2 P^{-1}$$

Der Vektor l enthält dabei die Beobachtungen, x die Koordinatenunbekannten, und die Matrix A beschreibt das funktionale Modell. Die stochastische Information ist durch die Matrix Q und die Varianz σ_0^2 gegeben. H_0 ist die Hypothese der Kongruenz aller Epochen. Sie wird durch einen allgemein gehaltenen linearen Zusammenhang ($Bx = w = 0$) definiert.

Explizit für Epochen 1,...,k lautet das Modell:

$$\begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ l_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ v_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & & & 0 \\ & A_{22} & & \\ & & \cdot & \\ & & & \cdot \\ 0 & & & A_{kk} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \hat{x}_k \end{pmatrix}$$

$$\sigma_0^2 Q = \sigma_0^2 \begin{pmatrix} Q_{11} & & & 0 \\ & Q_{22} & & \\ & & \cdot & \\ & & & \cdot \\ 0 & & & Q_{kk} \end{pmatrix}$$

Wenn – wie hier definiert – keine interepochalen Korrelationen existieren ($A_{ij} = 0, Q_{ij} = 0$), kann jede Epoche zuerst getrennt mittels einer freien Netzausgleichung mit Gesamtpurminimierung untersucht werden. Dadurch kann die Genauigkeit und Zuverlässigkeit jeder Epoche überprüft sowie Ausreißer eliminiert werden. Es ergibt sich also für jede Epoche ein Gauß-Markoff-Modell:

$$\mathbf{l}_i + \mathbf{v}_i = A_{ii} \hat{\mathbf{x}}_i$$

$$\Sigma_{ii} = \sigma_0^2 Q_{ii}$$

Die Schätzwerte für die wahren Koordinaten können mittels $\hat{\mathbf{x}}_i = (A_{ii}^T P_i A_{ii})^{-1} A_{ii}^T P_i \mathbf{l}_i$ berechnet werden, wobei $P_i = Q_{ii}^{-1}$ ist und $(A_{ii}^T P_i A_{ii})^{-1}$ für die Pseudoinverse der Normalgleichungsmatrix steht.

$$s_{0i}^2 = \frac{\mathbf{v}_i^T P_i \mathbf{v}_i}{f_i} = \frac{\Omega_i}{f_i} \quad \text{dient bekanntlich als Schätzwert für die Varianz der}$$

Gewichtseinheit σ_0^2 .

Für die weitere Vorgehensweise ist es notwendig, dass eine gemeinsame Varianz gewährleistet ist, d.h. die Erwartungswerte der Einzelepochen müssen auf Identität geprüft werden:

$$H: E\{s_{0i}^2\} = \sigma_0^2 \quad i = 1, \dots, k$$

Die Testgröße, die bei Gültigkeit von H Fisher-verteilt ist, wird folgendermaßen

gebildet: $T_F = \frac{s_{0i}^2}{s_{0j}^2}$. Somit kann H durch Vergleich von T_F mit dem F-Quantil

$F_{f_i, f_j, 1-\alpha}$ verifiziert oder abgelehnt werden.

Wird der Test abgelehnt, müssen die Gewichte der einzelnen Epochen mittels Varianzkomponentenschätzung homogenisiert werden. Wurden die Gewichtsrelationen zwischen den Epochen hingegen korrekt abgeschätzt, unterscheiden sich die einzelnen Schätzungen s_{0i}^2 also nur im Rahmen des Zufalls. Dann kann eine Gesamtvarianz berechnet werden:

$$s_0^2 = \frac{\sum \Omega_i}{\sum f_i} = \frac{\Omega}{f}$$

2.1.3 Einbeziehung der Kongruenzhypothese

Wird nun die Kongruenzhypothese H_0 mit in die Berechnungen einbezogen, bedingt sie einen additiven Zuschlag zur vorher bestimmten Verbesserungsquadratsumme Ω :

$$\Omega_H = \Omega + R$$

In R steckt also die gesamte Information, ob Deformationen aufgetreten sind. Die Berechnung von R kann auf zwei Arten erfolgen:

Bei der *expliziten Hypothesenformulierung* wird eine lineare Bedingung $Bx = w$ in das Basismodell $E\{\mathbf{l}\} = A\mathbf{x}$, $\Sigma_{ll} = \sigma_0^2 Q_{ll}$ integriert. Im Fall der Kongruenzuntersuchung kann diese Bedingung folgendermaßen dargestellt werden:

$H_0: \mathbf{d} = \hat{\mathbf{x}}_2 - \hat{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{0}$ bedeutet, dass die Koordinaten der beiden untersuchten Epochen ident sind. $Q_{dd} = Q_{x_1x_1} + Q_{x_2x_2}$ wird nach dem Kovarianzfortpflanzungsgesetz aus den Kofaktormatrizen der Einzelausgleichungen bestimmt.

Der Zuschlag R kann hier direkt aus $R = \mathbf{d}^T Q_{dd}^- \mathbf{d}$ berechnet werden, wobei Q_{dd}^- für die Pseudoinverse von Q_{dd} steht. Der Rang von Q_{dd} soll hier mit h bezeichnet werden: $h = \text{rg}(Q_{dd})$. Die χ^2 -verteilte Größe $\theta^2 = \frac{R}{h}$ wird beim Kongruenztest benötigt; θ wird nach (PELZER, 1971) als *mittlere Klaffung* bezeichnet. Wichtig anzumerken ist, dass in diesem Fall R direkt ohne Neuausgleichung bestimmt werden kann.

Eleganter und computerunterstützt leichter durchzuführen ist die Berechnung von R mittels *impliziter Hypothesenformulierung*; hier wird nach den Einzelausgleichungen eine gemeinsame Ausgleichung berechnet, wobei die identen Punkte nur einmal als Unbekannte auftreten: $\hat{\mathbf{x}}_H = \hat{\mathbf{x}}_1 = \hat{\mathbf{x}}_2$. Dadurch ist implizit die Hypothese $\hat{\mathbf{x}}_2 - \hat{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{0}$ enthalten. Das Modell lautet also:

$$\mathbf{l} + \mathbf{v}_H = A\hat{\mathbf{x}}_H$$

$$\Sigma_{ll} = \sigma_0^2 Q_{ll} \text{ und } P = Q_{ll}^{-1}.$$

In diesem Fall erhält man die Verbesserungsquadratsumme aus

$$\Omega_H = (\mathbf{l} - A\hat{\mathbf{x}}_H)^T P(\mathbf{l} - A\hat{\mathbf{x}}_H), \text{ mit den entsprechenden Freiheitsgraden } f_H.$$

Es ergibt sich also direkt Ω_H ; da Ω aus den Einzelausgleichungen bekannt ist, kann

R aus $R = \Omega_H - \Omega$ berechnet werden; h ergibt sich aus $h = f_H - f$.

2.1.4 Globaler Kongruenztest

Egal, welche der gezeigten Berechnungsmethoden für R gewählt wurde, stehen nun R und Ω mit den entsprechenden Freiheitsgraden zur Verfügung. Es folgt der *globale Kongruenztest* (PELZER, 1971, bzw. NIEMEIER, 1979): Hier wird der Zuschlag zur Verbesserungsquadratsumme R gegenüber Ω getestet:

$$T_F = \frac{R/h}{\Omega/f} = \frac{R}{s_0^2 \cdot h} = \frac{\theta^2}{s_0^2} \sim F_{h,f}$$

Bei Gültigkeit der Nullhypothese H_0 folgt die Testgröße T_F einer zentralen Fisher-Verteilung, und es gilt mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit α :

$$P\{T_F > F_{h,f,1-\alpha} \mid H_0\} = \alpha$$

Ist $T_F > F_{h,f,1-\alpha}$, wird die Nullhypothese H_0 abgelehnt; es sind also signifikante Deformationen im Netz aufgetreten.

Der Globaltest gibt hier nur eine qualitative Aussage; wo genau die Deformationen aufgetreten sind, muß im *Lokalisierungsschritt* bestimmt werden.

2.1.5 Lokalisierung der Bewegungen

In der Folge sind also diejenigen Punkte bzw. Teilnetze zu finden, durch deren Bewegung der globale Kongruenztest versagt. Für diese Lokalisierung gibt es wiederum verschiedene Verfahren; hier soll die *Methode der maximalen Klaffungsanteile* kurz angesprochen werden.

Die Information über die gesamte Deformation ist in R enthalten. Jeder Punkt des Netzes wird nun verdächtigt, signifikant verschoben zu sein und so zur Ablehnung des Globaltests beigetragen zu haben. Der Einfluß jedes Punktes auf R wird also getrennt untersucht; dazu ist es notwendig, R in zwei stochastisch unabhängige Summanden, also den Klaffungsanteil für den bewegten Punkt R_B sowie für alle festen Restpunkte R_F , aufzuteilen:

$$R = R_B + R_F, \text{ zur theoretischen Begründung siehe z.B. (NIEMEIER, 1979).}$$

Der Punkt mit dem maximalen Klaffungsanteil R_B wird als verschoben angesehen und aus der stabilen Punktmenge entfernt. War der entfernte Punkt an der Bildung des Datums beteiligt, muß eine Datumstransformation auf die Restpunktgruppe durchgeführt werden. Der Zuschlag R wird nun neu gebildet, und der Kongruenztest trifft erneut die Entscheidung, ob weitere Punkte verschoben sind; ist das der Fall,

muß der nächste Punkt mit dem größten Einfluß auf R entfernt werden. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis der globale Kongruenztest angenommen wird.

Als Ergebnis liegen somit die stabilen Restpunkte (zugleich die Datumspunkte) sowie die verschobenen Einzelpunkte mit Angabe ihrer signifikanten Verschiebungen relativ zur stabilen Punktgruppe vor.

Die soeben skizzierte Vorgehensweise bei der Lokalisierung wird als *Rückwärtsstrategie* bezeichnet. Sinnvoll einsetzbar ist sie bei einstufigem Netzaufbau, d.h. bei einem Relativmodell, wie es z.B. bei tektonischen Überwachungsnetzen verwendet wird. Da hier ja keine stabilen Punkte vorhanden sind, werden aus der Gesamtheit der Punkte die verschobenen Objektpunkte iterativ entfernt. Hingegen bei einem Absolutmodell, d.h. bei Vorhandensein stabiler Stützpunkte, wird zuerst die Stabilität dieser Referenzpunkte überprüft. Dabei wird der globale Kongruenztest nur für die stabile Punktgruppe durchgeführt; eventuell verschobene Punkte werden mittels Rückwärtsstrategie entfernt. Daraufhin werden die als nicht stabil angesehenen Objektpunkte überprüft, ob tatsächlich Bewegungen aufgetreten sind; dabei wird derjenige Punkt zur Stützpunktgruppe hinzugefügt, der den kleinsten Beitrag zur Klaffungssumme bedingt. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis der Globaltest anschlägt; diese Vorgehensweise wird als *Vorwärtsstrategie* bezeichnet. Als Ergebnis liegen somit die stabile Stützpunktgruppe sowie die Punktbewegungen der Objektpunkte absolut zu den Referenzpunkten vor.

Für Details wie Vorgehensweise bei geänderter Netzkonfiguration, weitere Lokalisierungsmethoden etc. wird auf die Literatur wie (NIEMEIER, 1979), (PELZER, 1971), (PELZER, 1985), (WELSCH ET AL, 2000) verwiesen.

2.1.6 Zusammenfassung

Wie bereits in Kapitel 1.1 ausgeführt, liefert die Deformationsanalyse die Verschiebungsvektoren zwischen den Messepochen für jeden Punkt. Weiterführende Analysen sind in dieser kurz vorgestellten Vorgehensweise nicht enthalten. Eine Möglichkeit, die Deformationen genauer zu interpretieren, ist, die Punkte den verschiedenen tektonischen Blöcken bzw. den Blöcken mit ähnlichem Bewegungsmuster zuzuordnen. Dafür wird bei tektonischen Deformationen sinnvollerweise die Strainanalyse verwendet werden. Im Folgenden werden daher die Grundkonzepte der den Geodäten eher vertrauten Affintransformation sowie der dazu äquivalenten Strainanalyse besprochen.

2.2 Transformationen und Strainanalyse

Geodätische Überwachungs- bzw. Deformationsmessungen dienen der Feststellung von Bewegungen und Verformungen eines Objekts. Abbildung 2.3 zeigt eine Einteilung der gebräuchlichsten Begriffe (nach WELSCH ET AL, 2000):



Abbildung 2.3: Einteilung des Begriffs „Deformation“.

In der Geodäsie wird üblicherweise jede Art der (geometrischen) Veränderung eines Objektes als Deformation bezeichnet. Eine feinere Unterscheidung erlaubt die Untersuchung des Verhaltens der inneren Geometrie des Messobjekts: bei der *Starrkörperbewegung* treten keinerlei Änderungen der inneren Geometrie auf, nur Translationen und Rotationen des gesamten Objekts (oder von Teilen des Objekts). Starrkörperbewegungen können z.B. mit Hilfe einer Ähnlichkeitstransformation analysiert werden, während durch eine Affintransformation auch *Verformungen* berücksichtigt werden können (siehe Kapitel 2.2.1).

Im Gegensatz zur Starrkörperbewegung wird bei einer Verformung die innere Geometrie des Objekts geändert; neben den Verzerrungen (also Dehnungen/Stauchungen und Schubverformungen) können auch Biegungen und Torsionen auftreten; die beiden letzten sind aber für Krustenbewegungen nicht relevant und werden daher nicht weiter behandelt.

Grundlage für die Untersuchung von Verformungszuständen sind die Kontinuumsmechanik und die Elastizitätstheorie, die auf dem Hooke'schen Gesetz beruht: Ein Kontinuum (so auch die Erdkruste) wird unter Einwirkung äußerer Kräfte (*Stress*) elastisch verformt (*Strain*). Diese Deformationen sind im allgemeinen nichtlinearer Natur, meist kann aber für geodätische Anwendungen, wo die Größenordnung der Verformungen üblicherweise klein gegenüber der Ausdehnung des Objekts ist, von infinitesimalem Strain ausgegangen werden. Somit vereinfachen sich die Beziehungen, sodaß nur lineare Terme zur Analyse verwendet werden können (siehe Kapitel 2.2.2).

2.2.1 Ähnlichkeits- und Affintransformation

In der Geodäsie wird meist die Ähnlichkeits- bzw. Helmert-Transformation verwendet, da Kongruenz von Punkten und ihren Abbildungen notwendig ist, um die innere Geometrie zu erhalten. Gerade im Bereich der Deformationsanalyse ist es aber sinnvoll, auf diese Eigenschaft und damit auch auf die Konformität zugunsten anderer Vorteile zu verzichten. Denn mit Hilfe der Helmert-Transformation können nur die Starrkörperbewegungen eines Objekts aufgedeckt werden (Translationen, Rotationen). Ist es (wie im Fall von Hangrutschungen und Krustenbewegungen) aber wahrscheinlich, dass auch innere Verformungen des Objekts stattgefunden haben, muß auf die affine Transformation zurückgegriffen werden, um auch die inneren Verzerrungen des Objekts (*Strain*) aufzeigen zu können. Im Folgenden werden kurz die wichtigsten Beziehungen und Eigenschaften beider Transformationen besprochen.

2.2.1.1 Ähnlichkeitstransformation

Bei der Ähnlichkeitstransformation werden Punkte nach folgender Vorschrift abgebildet:

$$\mathbf{x}' = (1 + m) \cdot R(\varepsilon) \cdot \mathbf{x} + \mathbf{t}$$

mit

$\mathbf{x} = (x, y, z)^T$, $\mathbf{x}' = (x', y', z')^T$... Koordinaten vor und nach der Abbildung

$\mathbf{t} = (t_x, t_y, t_z)^T$... Verschiebungsparameter

m ... Maßstabsfaktor

$R(\varepsilon)$... Drehmatrix

In zweidimensionalen Anwendungen werden 2 Translationen, 1 Rotation und 1 Maßstabsparameter benötigt, um einen Punkthaufen kongruent in einen anderen überzuführen, im 3D-Raum sind hierfür 3 Translationen, 3 Rotationen und 1 Skalierungsparameter notwendig. Daraus leitet sich auch der übliche Name *7-Parameter-Helmert-Transformation* ab.

Für kleine Drehwinkel, wie sie in der Geodäsie meist vorkommen, vereinfachen sich die Beziehungen zu:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = (1 + m) \cdot \begin{pmatrix} 1 & \varepsilon \\ -\varepsilon & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix}$$

bzw.

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = (1 + m) \cdot \begin{pmatrix} 1 & \varepsilon_z & -\varepsilon_y \\ -\varepsilon_z & 1 & \varepsilon_x \\ \varepsilon_y & -\varepsilon_x & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix}$$

Die Transformationsparameter müssen durch idente Punkte aus beiden Koordinatensystemen bestimmt werden. Sind dafür mehr idente Koordinaten als notwendig vorhanden, spricht man von einer überbestimmten Helmert-Transformation. Hier werden die Parameter so bestimmt, dass die Quadratsumme der Verbesserungen (Restklaffungen) minimiert wird (Methode der kleinsten Quadrate, $v^T P v \rightarrow \min$).

Weitere Informationen können der Literatur ((WELSCH ET AL, 2000), (NIEMEIER, 2002)) entnommen werden.

2.2.1.2 Affintransformation

Im Gegensatz zur Ähnlichkeitstransformation sind bei der Affintransformation auch Verformungen von Winkeln möglich, wodurch die Konformität des Objekts vor und nach der Abbildung verlorengeht.

Weiters können verschiedene Maßstabsfaktoren in verschiedenen Koordinatenrichtungen auftreten, wodurch Streckenänderungen von ihrer Orientierung im Koordinatensystem abhängig werden.

Geometrisch kann die Affintransformation als schräge Parallelprojektion zweier beliebig geneigter Ebenen π und π' aufeinander gedeutet werden (siehe Abbildung 2.4), wodurch sich (z.B. nach STRUBECKER, 1966, WOLFRUM, 1978) folgende Eigenschaften ergeben:

- parallele Geraden bleiben parallel, siehe g_1, g_2, g_3 bzw. g_1', g_2', g_3' in Abbildung 2.4.
- Teilstreckenverhältnisse bleiben erhalten, siehe Punktetripel (P,Q,R) und (P',Q',R') in Abbildung 2.4.

Üblicherweise haben geodätische Netze eine größere horizontale Ausdehnung als in der Höhe. Daher ist die Bestimmung von Transformationsparametern bzw. später Strainparametern, die die Beziehung zwischen Lage und Höhe beschreiben, in manchen Fällen nicht sinnvoll. Daher und auch aufgrund der später dargestellten Beispiele beschränken sich alle Angaben und Formeln ab nun auf den zweidimensionalen Fall; der Übergang auf 3D kann - wenn nötig und sinnvoll - selbstverständlich leicht durchgeführt werden.

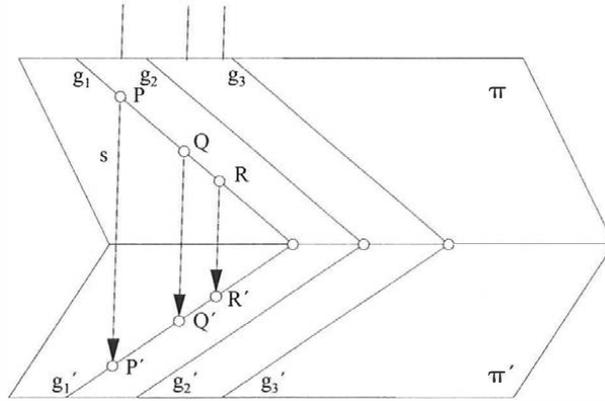


Abbildung 2.4: Deutung der Affintransformation als schräge Parallelprojektion zweier beliebig geneigter Ebenen π und π' , nach (STRUBECKER, 1966). Entsprechende Punkte werden mittels des Sehstrahls s von π auf π' abgebildet.

$$x' = a \cdot x + b \cdot y + c$$

$$y' = d \cdot x + e \cdot y + f$$

bzw.

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ d & e \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c \\ f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_x \cdot \cos \omega_x & m_y \cdot \sin \omega_y \\ -m_x \cdot \sin \omega_x & m_y \cdot \cos \omega_y \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix}$$

mit $(x, y)^T, (x', y')^T \dots$ Koordinaten vor und nach der Transformation

$a, b, c, d, e, f \dots$ Transformationsparameter

$(t_x, t_y)^T \dots$ Verschiebungsparameter

$m_x, m_y \dots$ Maßstabsfaktoren in x- und y-Richtung

$\omega_x, \omega_y \dots$ Rotationsparameter um die x- bzw. y-Achse

Es werden also 6 Transformationsparameter zur Beschreibung des Deformationszustandes benötigt:

Die Parameter c und f beschreiben die Starrkörpertranslation: $t_x = c, t_y = f$.

a, b, d und e beinhalten für jede Koordinatenachse einen Rotationsparameter sowie einen Maßstabsfaktor. Die Maßstabsfaktoren können leicht explizit angegeben werden:

$m_x = \sqrt{a^2 + d^2}, m_y = \sqrt{b^2 + e^2}$. Die beiden Rotationsparameter der

Affintransformation ω_x, ω_y , also die Drehwinkel um die beiden Koordinatenachsen,

können folgendermaßen berechnet werden: $\omega_x = \arctan \frac{-d}{a}, \omega_y = \arctan \frac{b}{e}$.

Diese Transformationsparameter sind jedoch bei kleinen Bewegungen nicht immer aussagekräftig, daher wird für die Untersuchung der Verschiebungsvektoren die äquivalente Strainanalyse verwendet.

2.2.2 Strainanalyse

Wie bereits einleitend erwähnt, sind die Affintransformation und die Strainanalyse völlig äquivalente Konzepte. Beide basieren auf den rein geometrischen Änderungen eines Objekts. Die Affintransformation wurde z.B. in der Photogrammetrie verwendet, um Filmverzerrungen bestimmen zu können (WOLFRUM,1978). Die Strainanalyse andererseits hat ihren Ursprung in der Kontinuumsmechanik, wurde aber in den späten 70er Jahren auch für den Einsatz in der Geodäsie entdeckt, um die eigenen Messungen sinnvoll interpretieren zu können, (z.B. BRUNNER, 1979, WELSCH, 1982a, SCHNEIDER, 1982, KERSTING, 1992). Vor allem für Untersuchungen von Krustenbewegungen liefert die Strainanalyse wertvolle Indikatoren zur Beschreibung des Verformungszustandes.

2.2.2.1 Theoretische Betrachtungen

Wie im vorigen Abschnitt dargestellt, steht der Koordinatenvektor eines Punktes \mathbf{x}' (affin verformtes Gebiet) mit dem Koordinatenvektor \mathbf{x} (vor der Deformation) in folgender Beziehung:

$$\mathbf{x}' = F \cdot \mathbf{x} + \mathbf{t}$$

mit $\mathbf{x} = (x, y)^T$... Koordinaten vor der Deformation

$\mathbf{x}' = (x', y')^T$... Koordinaten nach der Deformation

$\mathbf{t} = (t_x, t_y)^T$... Translationsvektor

F stellt dabei die sogenannte *Deformationsmatrix* dar (manchmal auch *Deformationsgradient* genannt):

$$F = \begin{pmatrix} \frac{\partial x'}{\partial x} & \frac{\partial x'}{\partial y} \\ \frac{\partial y'}{\partial x} & \frac{\partial y'}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{xx} & f_{xy} \\ f_{yx} & f_{yy} \end{pmatrix}$$

In F sind die Verzerrungen sowie der Rotationsanteil enthalten. Die Diagonalglieder geben dabei Dehnungsfaktoren in den Koordinatenrichtungen an, die Nebendiagonalglieder beschreiben die Scherungskomponenten. Abbildung 2.5 zeigt die Verzerrungsanteile jedes Elementes von F .

Verwendet man den Verschiebungsvektor $\mathbf{u} = \mathbf{x}' - \mathbf{x}$, kann die Deformation direkt in den Verschiebungsanteil \mathbf{t} , die Rotation sowie die Verformung (repräsentiert durch F) zerlegt werden:

$$\mathbf{u} = \mathbf{x}' - \mathbf{x} = F \cdot \mathbf{x} + \mathbf{t} - \mathbf{x} = (F - I) \cdot \mathbf{x} + \mathbf{t} = dF \cdot \mathbf{x} + \mathbf{t}$$

mit I ... Einheitsmatrix

$dF = F - I$ wird als *Verschiebungsgradient* bezeichnet.

In der Literatur (z.B. WELSCH, 1982a, 1982b, 1984; BRUNNER, 1979) wird üblicherweise der Verschiebungsvektor \mathbf{t} ignoriert; für die Anwendung von Hangbewegungen, die im allgemeinen einen starren und einen Verzerrungsanteil enthalten, erscheint es jedoch sinnvoll, die Verschiebungsparameter gleichzeitig mit den Verzerrungsparametern zu schätzen.

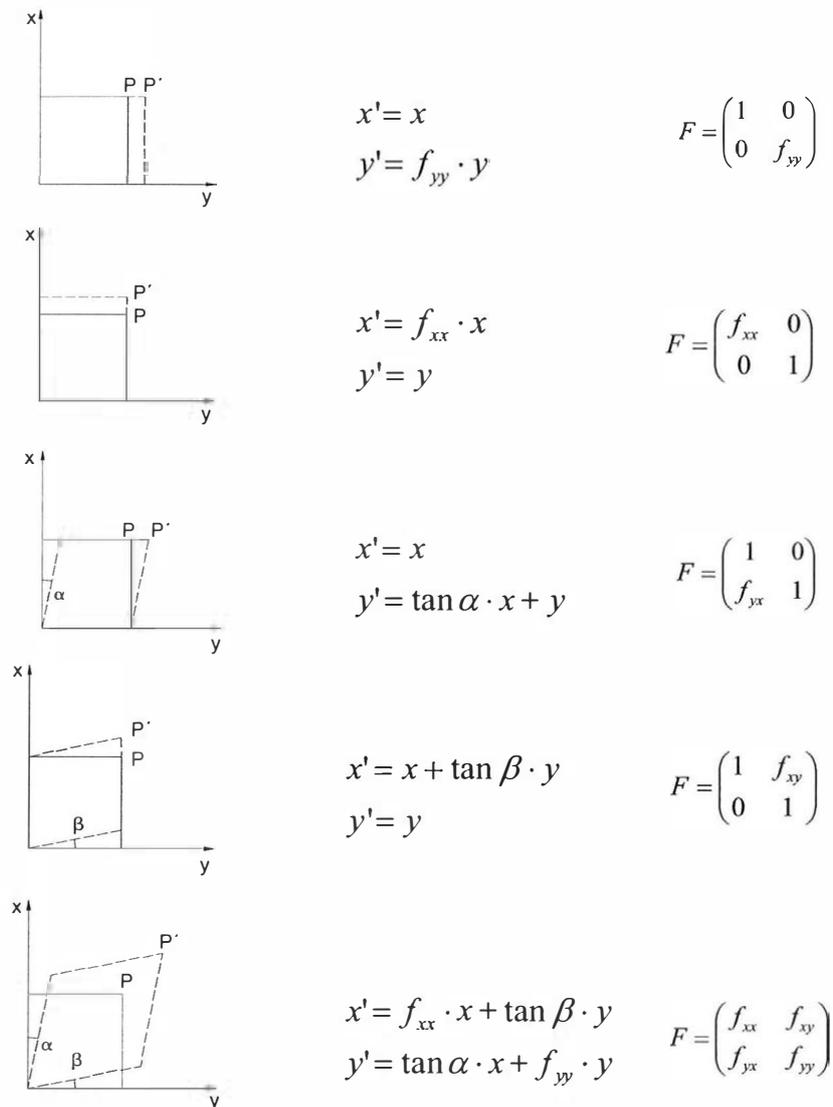


Abbildung 2.5: Geometrische Bedeutung der Komponenten der Deformationsmatrix F , nach (WELSCH ET AL, 2000).

Die Deformationsmatrix F ist nur im Sonderfall (keine Starrkörperbewegung) symmetrisch. Auf jeden Fall ist F regulär, d.h. $\det F > 0$, siehe z.B. (PARISCH, 2003). Somit lässt sich die Matrix polar in das Produkt einer orthogonalen Rotationsmatrix R und einer symmetrischen, positiv definiten Verzerrungsmatrix U zerlegen:

$$F = R \cdot U$$

Anmerkung: die hier gebrachte Ableitung beschränkt sich auf den rechtsseitigen Strecktensor U , völlig analog lässt sich auch das linksseitige Produkt $F = V \cdot R$ (mit V =Links-Strecktensor) ableiten. Details wie die Eindeutigkeit dieser Zerlegung und ähnliches sind z.B. in (BECKER, BÜRGER, 1975) oder (PARISCH, 2003) zu finden.

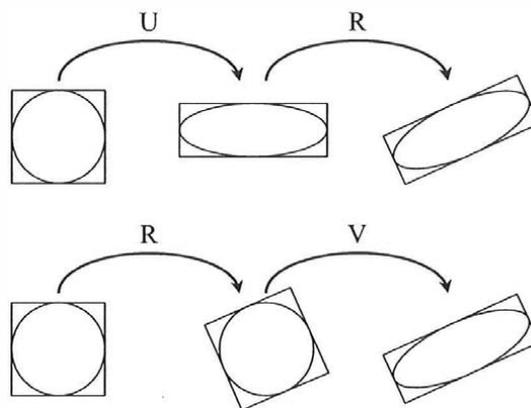


Abbildung 2.6: Äquivalenz der Zerlegungen $F = R \cdot U$ und $F = V \cdot R$, nach (BECKER, BÜRGER, 1975).

Die Zerlegung $F = R \cdot U$ entspricht anschaulich einer Verzerrung des Ausgangsobjektes mittels U , gefolgt von einer Rotation ausgedrückt durch R (siehe Abbildung 2.6 oben). Für den analogen Fall $F = V \cdot R$ wird zunächst die Rotation ausgeführt, gefolgt von der Verzerrung V (siehe Abbildung 2.6 unten).

In der Literatur gibt es weitere Verzerrungstensoren, z.B. den (Rechts-)Cauchy-Green-Tensor

$$C = F^T F = U^T R^T R U = U^T U = U^2 \quad (\text{wegen der Orthogonalität von } R)$$

sowie den Green'schen-Verzerrungstensor

$$G = \frac{1}{2}(C - I) = \frac{1}{2}(F^T F - I) = \frac{1}{2}(U^2 - I).$$

Diese nicht-linearen Beziehungen gelten für homogene finite Verformungen jeder Größenordnung. Sind nun – wie in der Geodäsie üblich – die Verzerrungen und somit die Verzerrungsparameter klein, d.h. liegt infinitesimaler Strain vor, so dürfen

zur Vereinfachung die Produkte und Quadrate der Parameter vernachlässigt werden. Die wesentlichsten Schritte dieser *geometrischen Linearisierung* sind:

Aus $G = \frac{1}{2}(F^T F - I)$ und $F = I + dF$ folgt:

$$G = \frac{1}{2}(I + dF^T)(I + dF) - \frac{1}{2}I = \frac{1}{2}(dF + dF^T) + \frac{1}{2}dF^T dF$$

Der letzte Term darf also vernachlässigt werden. Weiters ist:

$$\begin{aligned} U^2 = F^T F &= (I + dF^T)(I + dF) = I + dF^T + dF + dF^T dF = \\ &= [I + \frac{1}{2}(dF + dF^T)]^2 - \frac{1}{4}(dF - dF^T)^2 + dF^T dF = (I + G)^2 \end{aligned}$$

Daraus folgt nach der Linearisierung der einfache Zusammenhang:

$$U = I + G = I + \frac{1}{2}(dF + dF^T)$$

Aus der Beziehung $F = R \cdot U$ ergibt sich R daher zu $R = I + \frac{1}{2}(dF - dF^T)$. Der

Beweis dafür folgt durch Einsetzen:

$$\begin{aligned} F = R \cdot U &= [I + \frac{1}{2}(dF - dF^T)] \cdot [I + \frac{1}{2}(dF + dF^T)] = \\ &= I + \frac{1}{2}(dF - dF^T) + \frac{1}{2}(dF + dF^T) + \frac{1}{4}(dF - dF^T) \cdot (dF + dF^T) = \\ &= I + dF = F \quad \text{q.e.d.} \end{aligned}$$

Bei kleinen Drehwinkeln ω ergibt sich R nach der Linearisierung also zu

$$R = \begin{pmatrix} 1 & \omega \\ -\omega & 1 \end{pmatrix}. \text{ Aus } R = I + \frac{1}{2}(dF - dF^T) \text{ folgt unmittelbar } \omega = \frac{1}{2}(f_{xy} - f_{yx}).$$

Weiters erhält man $F = U + R - I$ bzw. mit $U = I + E$:

$$F = R + E$$

und

$$E = F - R = (I + dF) - (I + dR) = dF - dR.$$

$E = \begin{pmatrix} e_{xx} & e_{xy} \\ e_{xy} & e_{yy} \end{pmatrix}$, die *Verzerrungsmatrix* bzw. der *Straintensor*, ist symmetrisch, was

ebenfalls durch Einsetzen gezeigt werden kann:

$$E = F - R = I + dF - I - \frac{1}{2}(dF - dF^T) = \frac{1}{2}(dF + dF^T).$$

Somit kann bei infinitesimalem Strain anstelle der multiplikativen eine additive Zerlegung von F in $F = R + E$ vorgenommen werden; die Starrkörperbewegung R kann sehr leicht von F abgespalten werden, um die Verzerrungsmatrix E direkt zu erhalten. E enthält mit den Strainparametern e_{xx}, e_{xy}, e_{yy} , die zur praktischen Untersuchung der Verschiebungsvektoren notwendigen Größen. Die Berechnung und Bedeutung von e_{xx}, e_{xy}, e_{yy} wird in den folgenden Abschnitten dargestellt.

2.2.2.2 Praktische Berechnung der Strainparameter

In der Praxis wird für ein Überwachungsnetz häufig eine Dreiecksvermaschung durchgeführt. Dazu kann z.B. die Delaunay-Triangulation verwendet werden, die jedem Punkt seine natürlichen Nachbarn zuordnet. Genauer dazu ist in Kapitel 4.1.1 zu finden. Für jedes Dreieck der Triangulation können dann die Strainparameter berechnet werden. Dies hat den Vorteil, dass die Parameter eindeutig bestimmt sind; gleichzeitig soll diese Vorgehensweise sicherstellen, dass der Strain im betrachteten kleinräumigen Teilgebiet als homogen anzusehen ist. Für jedes Dreieck wird der Verzerrungszustand z.B. durch Strainellipsen (siehe später) dargestellt. Zusammengehörige Blöcke werden in diesem Fall meist durch manuelle und vor allem visuelle Interpretation durch den Experten gebildet (siehe Abbildung 2.7).

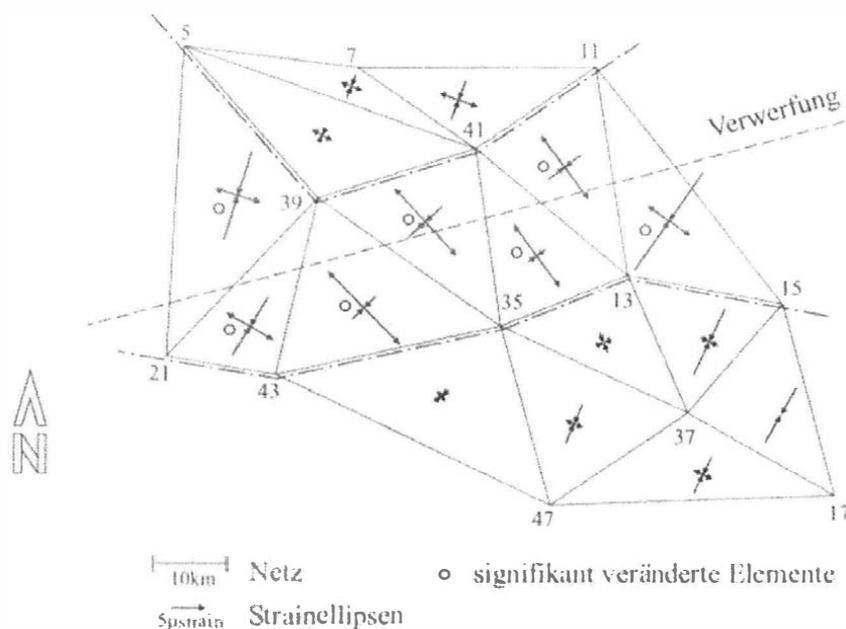


Abbildung 2.7: Verzerrungsellipsen für ein Dreiecksmaschennetz inklusive manueller Blockbildung, aus (WELSCH ET AL, 2000).

Wenn mehr als 3 Punkte für die Berechnung zur Verfügung stehen, müssen die Strainparameter durch eine Methode der kleinsten Quadrate-Schätzung bestimmt werden. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, gleichzeitig Genauigkeitsabschätzungen durchführen zu können.

$$u_{x_i} = x_i' - x_i = e_{xx} \cdot x_i + e_{xy} \cdot y_i + \omega \cdot y_i + t_x$$

$$u_{y_i} = y_i' - y_i = e_{xy} \cdot x_i + e_{yy} \cdot y_i - \omega \cdot x_i + t_y$$

oder

$$\mathbf{u} = H \cdot \mathbf{p}$$

mit

$$H = \begin{pmatrix} x & y & 0 & y & 1 & 0 \\ 0 & x & y & -x & 0 & 1 \end{pmatrix}_i$$

$$\mathbf{p} = (e_{xx} \quad e_{xy} \quad e_{yy} \quad \omega \quad t_x \quad t_y)^T$$

Diese Vorgehensweise setzt also die Koordinatenänderungen \mathbf{u} und die Parameter \mathbf{p} in Beziehung zueinander; sie wird deshalb auch oft als *x-Methode* bezeichnet.

Eine zweite Methode soll hier nur kurz erwähnt werden: die Parameter können auch direkt aus den Änderungen der gemessenen Strecken und Winkel berechnet werden (*l-Methode*). Es kann gezeigt werden, dass beide Methoden bei gleichem Datenmaterial idente Ergebnisse liefern (BRUNNER ET AL, 1981). Ein Nachteil der l-Methode ist allerdings, dass in beiden Epochen unbedingt dieselben Beobachtungen vorhanden sein müssen, während die x-Methode diesbezüglich flexibler ist.

Die Diagonalelemente der Verzerrungsmatrix E , e_{xx} und e_{yy} , stellen Maßstabsfaktoren entlang der x- bzw. y-Achse dar, das Nebendiagonalelement e_{xy} beschreibt den Scherwinkel (als Tangenswert bzw. im Bogenmaß). Es handelt sich dabei um dimensionslose Größen, die üblicherweise im Größenbereich von 10^{-6} auftreten und daher mit der Einheit ppm oder auch mit μstrain (Mikrostrain) versehen werden.

Weitere Verformungsparameter, die des öfteren aus E abgeleitet werden, sind:

$$\gamma_1 = e_{yy} - e_{xx} \dots \text{reine Scherung (pure shear)}$$

$$\gamma_2 = 2e_{xy} \dots \text{Ingenieurscherung (engineering shear)}$$

$$\Delta = e_{xx} + e_{yy} \dots \text{Dilatation}$$

$$\gamma = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2} \dots \text{maximale Scherdehnung}$$

Diese Parameter werden im Folgenden nicht verwendet; genauere Informationen über Eigenschaften und Bedeutung können z.B. bei (WELSCH ET AL, 2000) nachgeschlagen werden.

Die Strainparameter e_{xx}, e_{xy}, e_{yy} beziehen sich auf das aktuelle Koordinatensystem. Um invariante, objektbezogene Angaben über den Verzerrungszustand zu erhalten, wird mit Hilfe der Hauptachsentransformation in das System der Hauptverzerrungen übergegangen. Diese Hauptverzerrungen e_1, e_2 können auf zweifache Art gewonnen werden:

- durch Spektralzerlegung der Verzerrungsmatrix E :

$$E = S \cdot \Lambda \cdot S^T = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

mit Λ ...Spektralmatrix

S ...Modalmatrix

θ ...Orientierung des Hauptachsensystems

λ_1, λ_2 ...Hauptverzerrungen

- direkt aus E , analog der geodätischen Fehlerellipse:

$$e_1 = \lambda_1 = \frac{1}{2}(e_{xx} + e_{yy} + e)$$

$$e_2 = \lambda_2 = \frac{1}{2}(e_{xx} + e_{yy} - e)$$

$$\tan 2\theta = \frac{2e_{xy}}{e_{xx} - e_{yy}}$$

mit der Hilfsgröße $e^2 = (e_{xx} - e_{yy})^2 + 4e_{xy}^2$

Die Verzerrungsellipse (e_1, e_2, θ) bzw. $(\lambda_1, \lambda_2, \theta)$ enthält alle Informationen, die zur Beschreibung des Verzerrungszustandes notwendig sind. Die graphische Darstellung der Ellipse erfolgt üblicherweise im Schwerpunkt der zur Berechnung verwendeten Punkte; Dehnungen ($e_1, e_2 > 0$) werden dabei meist durch eine durchgezogene Linie angezeigt, Stauchungen ($e_1, e_2 < 0$) strichliert. Eine weitere Möglichkeit zur Darstellung zeigt Abbildung 2.7. Hier werden Pfeilspitzen verwendet, um Dehnungen (Pfeile zeigen von Ellipsenmittelpunkt weg) und Stauchungen (Pfeile zeigen zum Ellipsenmittelpunkt) anzuzeigen.

2.2.2.3 Zusammenfassung

Die Parameter der Verzerrungsellipse, e_1 und e_2 , stellen die optimalen Parameter zur Analyse von Verschiebungsfeldern dar. Im Gegensatz zu den koordinatensystem-abhängigen Strainparametern e_{xx}, e_{xy}, e_{yy} sind sie invariant gegenüber Transformationen; weiters kann durch die Verzerrungsellipse der Verformungszustand eines Körpers vollständig beschrieben werden.

Mit den vorgestellten Theorien der Deformationsanalyse und Strainanalyse sowie dem abgeleiteten Formelwerk stehen also die geodätischen Grundlagen zur Untersuchung von Verschiebungsvektoren zur Verfügung. Nach einer Einführung in das Gebiet der Fuzzy Methoden (Kapitel 3) folgt in Kapitel 4 die Zusammenführung dieser beiden Werkzeuge zu einem Analysealgorithmus.

3 Einführung in Fuzzy Methoden

In den exakten Wissenschaften geht man üblicherweise davon aus, mit „scharfen“, genauen Daten und Modellen zu arbeiten. Bei genauerer Überlegung erkennt man allerdings, dass Modelle für die jeweilige Aufgabenstellung meist nur mit idealisierten Annahmen erstellt werden können, da manche Informationen nicht zugänglich oder von Zufallsmechanismen abhängig sind (*unsichere Information*). Auch die vermeintlich exakten Messwerte sind eigentlich keine scharfen Daten, sondern *unpräzise Information*. Bisher hat man versucht, diese Unschärfe durch Annahme von Wahrscheinlichkeitsaussagen und Toleranzangaben zu beschreiben.

Aus dem täglichen Leben sind wir allerdings gewohnt, mit unscharfen Informationen umzugehen. Dabei tritt meist eine sprachliche Unschärfe (*vage Information*) auf. Bereits in der Motivation (Kapitel 1) wurde erwähnt, dass Experten Blockbewegungen vor allem visuell anhand der Ähnlichkeit der Verschiebungsvektoren beurteilen. „Ähnlichkeit“ kann nicht exakt mathematisch definiert werden; sie könnte aber z.B. durch die Ähnlichkeit der Beträge sowie der Azimute der Verschiebungsvektoren beschrieben werden. Ein Experte handelt dabei intuitiv nach linguistischen Regeln; ein Beispiel dafür ist:

Wenn die Azimute der Vektoren ähnlich sind, liegen die Punkte wahrscheinlich auf einem gemeinsamen Block.

Die Wertebereiche für die Ähnlichkeit der Beträge und Azimute sind allerdings nicht ganz klar abgrenzbar, es handelt sich dabei um unscharfe Information.

Unsere Sprache ist also bestens geeignet, mit solch unscharfen Informationen umzugehen; um auch im Computer damit arbeiten zu können, wird die Theorie der Fuzzy Mengen verwendet. Die Möglichkeiten der menschlichen Sprache werden dabei durch *linguistische Variablen* nachgebildet (siehe Kapitel 3.2.1).

Meist wird als erste Veröffentlichung über die *Fuzzy Set Theory* ein Artikel von Lotfi Zadeh aus dem Jahr 1965 genannt. Weniger bekannt ist, dass bereits Karl Menger 1951 in einer Veröffentlichung den Begriff der *ensembles flous* (also *fuzzy sets* bzw. unscharfe Mengen) verwendet hat (SEISING, 1999). Schon 1922 hat Lukasiewicz eine dreiwertige Logik (mit den Werten 0, 1 und $\frac{1}{2}$ für „unbestimmt“) vorgeschlagen. Zadeh hat allerdings als erster von verallgemeinerten, charakteristischen Funktionen mit einem gleitenden Übergang zwischen den Werten 0 und 1 gesprochen. Zuerst als theoretisches, mathematisches Konstrukt untersucht, entwickelte sich die Theorie der unscharfen Mengen in den späten 80er Jahren bzw. den 90er Jahren zu einem brauchbaren Werkzeug in der Industrie. Fuzzy Regler konnten viele Aufgaben besser

und eleganter lösen als herkömmliche Programmierung. Als Paradebeispiel gilt die 1987 in Betrieb genommene U-Bahn in Sendai (Japan), wo mit Hilfe von Fuzzy-Reglern ein ruckfreies Anfahren und Abbremsen erreicht werden konnte.

Bis heute ist die Entwicklung auf diesem Gebiet nicht abgeschlossen.

In den letzten Jahren wurden auch in der Geodäsie immer wieder Fuzzy Systeme verwendet. Heine beschreibt dynamische Deformationsprozesse am Beispiel eines Rutschhanges durch Volterra- und Fuzzy Modelle (HEINE, 1999). Wieser verwendet Fuzzy Modelle für Qualitätsaussagen und für die Steuerung von Auswertevorgängen im Zusammenhang mit GPS (WIESER, 2002). Leinen versucht mittels Fuzzy Modellen die Ambiguity-Lösung bei GPS On-the-Fly Anwendungen zuverlässiger zu machen, indem die scharfen Grenzen bei den dabei auftretenden statistischen Tests durch dem Menschen natürlicher erscheinende unscharfe Grenzwerte ersetzt werden (LEINEN, 2001).

Im folgenden Abschnitt 3.1 sollen die Grundlagen, die zum Aufbau und Verständnis eines Fuzzy Systems notwendig sind, kurz dargestellt werden. Es handelt sich dabei um das Konzept der Zugehörigkeitsfunktionen und um Operationen auf unscharfen Mengen, die die Grundlage für Fuzzy Logik und unscharfes Schließen sind. Darauf aufbauend wird in Abschnitt 3.2 die unscharfe Regelung (*Fuzzy Control*) zur Prozesssteuerung und Entscheidungsfindung vorgestellt, da die für diese Arbeit implementierten regelbasierten Fuzzy Systeme (siehe Kapitel 4) diesen Inferenzmechanismus verwenden.

Hier können nur die notwendigsten Konzepte, die in der Arbeit verwendet wurden, beschrieben werden. Ausführliche Informationen findet man z.B. in (BANDEMÉR, NÄTHER, 1992), (BANDEMÉR, 1997), (KAHLERT, FRANK, 1993), (KRUSE ET AL, 1995) oder (MAYER ET AL, 1993).

3.1 Konzepte der unscharfen Mengen

3.1.1 Zugehörigkeitsfunktionen (membership functions):

Bei klassischen Mengen ist die Zugehörigkeit eines Elementes x zu einer Menge X gleich 0 oder 1:

$$f : X \rightarrow \{0,1\}$$
$$f_X(x) = \begin{cases} 1 & \text{falls } x \in X \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Bei der Verwendung von unscharfen Mengen wird vom klassischen Zweiwertigkeitsprinzip (ja/nein, wahr/falsch, 1/0) Abstand genommen. Die Zugehörigkeit μ eines Elementes kann nun auch Werte zwischen 0 und 1 annehmen:

$$\mu_{\tilde{A}} : X \rightarrow [0,1]$$

Eine unscharfe Menge \tilde{A} wird also durch ihre Elemente und deren Zugehörigkeiten definiert:

$$\tilde{A} := \{x \in X \mid (x, \mu_{\tilde{A}}(x))\}$$

Anmerkung: Die Festlegung des Intervalls $[0, 1]$ als mögliche Werte der Zugehörigkeiten ist völlig willkürlich. Je nach Anwendung können natürlich auch andere Intervalle dafür sinnvoll sein. Einige Operationen setzen allerdings ein Einheitsintervall voraus; jedes beliebige Intervall kann in diesem Fall aber selbstverständlich leicht auf $[0, 1]$ transformiert werden.

Einige elementare Begriffe, die im Zusammenhang mit Fuzzy Mengen und Zugehörigkeitsfunktionen auftreten, sollen ebenfalls kurz erläutert werden:

Der *Träger (support)* einer unscharfen Menge \tilde{A} ist die (scharfe) Menge aller Elemente, deren Zugehörigkeitsgrad >0 ist:

$$\text{supp}(\tilde{A}) := \{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) > 0\}$$

Die (scharfe) Menge aller zu einer unscharfen Menge \tilde{A} gehörenden Elemente, deren Zugehörigkeitsgrad mindestens den Wert α besitzt, wird α -Schnitt (α -cut) genannt:

$$A_{\alpha} := \{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\}$$

Man erkennt, dass der Träger ein Spezialfall des allgemeinen α -Schnitts ist:
 $\text{supp}(\tilde{A}) = A_0$

Ein weiterer Spezialfall des α -Schnitts ist der *Kern (core)*; der Kern ist definiert als der 1-Schnitt, also die Menge aller Elemente, deren Zugehörigkeitsgrad genau 1 ist:

$$\text{core}(\tilde{A}) = A_1 \quad \text{bzw.} \quad \text{core}(\tilde{A}) := \{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) = 1\}$$

Die Zugehörigkeit kann in Form von analytischen Funktionen beschrieben werden (parametrisch), oder mit Wertetabellen (nichtparametrisch); meist wird die Kennlinie auch graphisch dargestellt (siehe Abbildung 3.1).

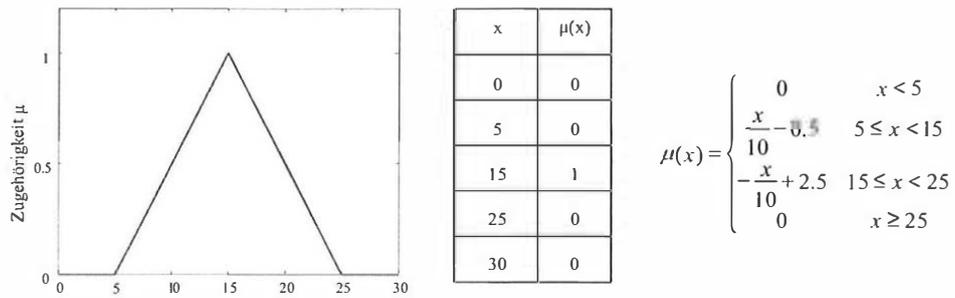


Abbildung 3.1: Beispiel für die graphische Darstellung der Zugehörigkeitsfunktion (links), die dazugehörige Wertetabelle (Mitte) sowie die parametrische Darstellung (rechts).

Prinzipiell gibt es keine Einschränkungen, wie Zugehörigkeitsfunktionen auszusehen haben, in der Praxis werden jedoch wegen der Berechnungszeiten meist stückweise stetige lineare Funktionen (dreiecksförmig, trapezförmig) oder Gauß-Kurven verwendet (siehe Abbildung 3.2).

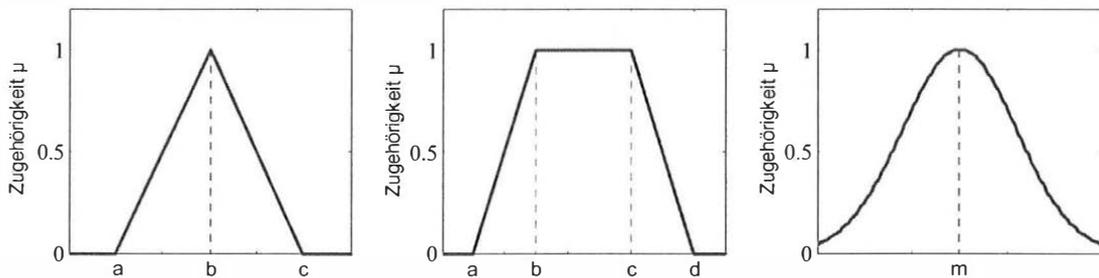


Abbildung 3.2: Beispiele für die in der Praxis am häufigsten verwendeten Zugehörigkeitsfunktionen: Dreiecksfunktion, Trapez, Gaußkurve.

Die allgemeinen Formeln zur Beschreibung dieser Funktionen sind wie folgt gegeben (unter der Voraussetzung, dass die Zugehörigkeit auf das Intervall $[0, 1]$ beschränkt ist):

$$\text{gauss}(x; m, a) = e^{-a(x-m)^2} \text{ mit dem Formparameter } a > 0$$

$$\text{dreieck}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & c \leq x \end{cases}$$

$$\text{trapez}(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x \leq d \\ 0 & d \leq x \end{cases}$$

Die Dreiecks- bzw. Gaussfunktion werden in der Praxis oft für die Beschreibung des Zustandes „ungefähr b“ bzw. „ungefähr m“ verwendet, die Trapezfunktion meist für die Definition von „ungefähr zwischen b und c“.

Die für diese Arbeit implementierten Fuzzy Systeme (siehe Kapitel 4) verwenden Dreiecks- und Trapezfunktionen zur Beschreibung der Zugehörigkeiten.

3.1.2 Operationen auf unscharfen Mengen:

Die klassischen Mengenoperationen Vereinigung, Durchschnitt und Komplement bilden die Grundlage für unscharfes Schließen (*Fuzzy Logic*) und müssen daher für unscharfe Mengen mit Hilfe der Zugehörigkeitsfunktionen ebenfalls verallgemeinert werden:

Der *Durchschnitt* (UND-Verknüpfung) wird meist durch den Minimum-Operator ausgedrückt:

$$\mu_{\tilde{A} \cap \tilde{B}}(x) = \min(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)) \quad \forall x \in X$$

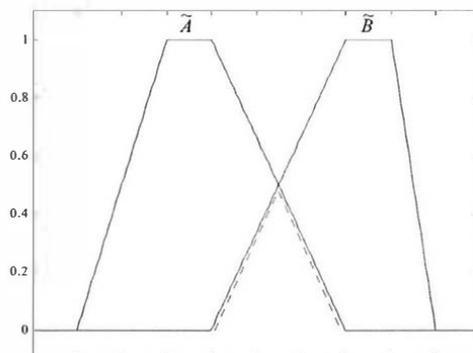


Abbildung 3.3: Darstellung des Durchschnitts unscharfer Mengen.

Die *Vereinigung* zweier Mengen (ODER-Verknüpfung) wird durch den Maximum-Operator dargestellt:

$$\mu_{\tilde{A} \cup \tilde{B}}(x) = \max(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)) \quad \forall x \in X$$

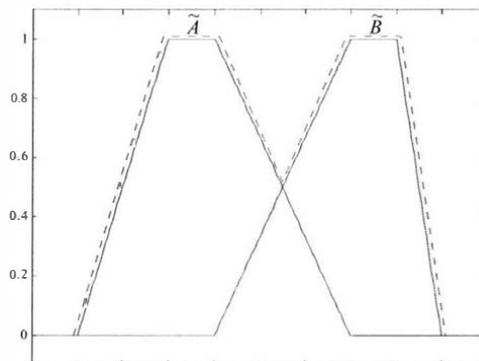


Abbildung 3.4: Darstellung der Vereinigung unscharfer Mengen.

Wie leicht gezeigt werden kann, sind die so definierten Operationen kommutativ,

$$\tilde{A} \cup \tilde{B} = \tilde{B} \cup \tilde{A}$$

$$\tilde{A} \cap \tilde{B} = \tilde{B} \cap \tilde{A}$$

assoziativ

$$\tilde{A} \cup (\tilde{B} \cap \tilde{C}) = (\tilde{A} \cup \tilde{B}) \cap \tilde{C}$$

$$\tilde{A} \cap (\tilde{B} \cup \tilde{C}) = (\tilde{A} \cap \tilde{B}) \cup \tilde{C}$$

und distributiv

$$\tilde{A} \cup (\tilde{B} \cap \tilde{C}) = (\tilde{A} \cup \tilde{B}) \cap (\tilde{A} \cup \tilde{C})$$

$$\tilde{A} \cap (\tilde{B} \cup \tilde{C}) = (\tilde{A} \cap \tilde{B}) \cup (\tilde{A} \cap \tilde{C})$$

Das *Mengenkomplement*, die dritte elementare Mengenoperation, entspricht der logischen Verneinung:

$$\mu_{\tilde{A}'}(x) = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x) \quad \forall x \in X$$

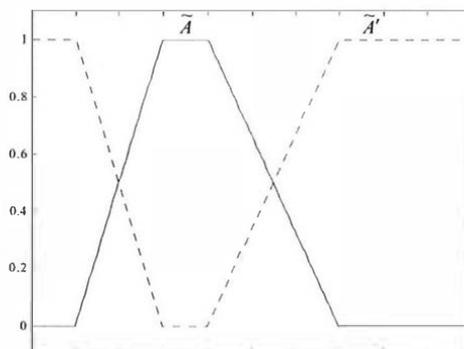


Abbildung 3.5: Darstellung des Komplements einer unscharfen Menge.

Nicht alle Rechengesetze lassen sich so einfach von scharfen auf unscharfe Mengen übertragen wie Vereinigung und Durchschnitt. Der hier verwendete Mengenkomplement-Operator hat z.B. die Eigenschaft: $\tilde{A} \cup \tilde{A}' \neq X$ und $\tilde{A} \cap \tilde{A}' \neq \emptyset$.

Dadurch kann es zu unerwünschten Ergebnissen kommen. Meist wird daher das Komplement nicht durch Mengenoperationen, sondern durch eigene Fuzzy Mengen bzw. linguistische Terme neu definiert.

Anmerkung: Die hier verwendeten Minimum- und Maximum-Operatoren wurden von Zadeh vorgeschlagen und werden meist in der Praxis wegen der schnellen Berechnungszeiten verwendet. Daneben existieren noch weitere wichtige Operatoren, die sogenannten t-Normen (Dreiecks-Normen) und die dazu dualen t-Conormen (Dreiecks-Conormen). Der Minimum-Operator stellt dabei die einfachste t-Norm dar, dementsprechend der Maximum-Operator die einfachste t-Conorm. Hier soll allerdings nicht weiter auf die allgemeinen Eigenschaften von Operatoren eingegangen werden; für weitere Informationen siehe z.B. (MAYER ET AL, 1993) oder (GRAUEL, 1995).

Die Wahl der Operatoren hängt immer von der Anwendung ab; hier zählen einerseits mathematische Aspekte wie Effizienz in Berechnungen (Berechnungszeiten), oder ob Eigenschaften wie Assoziativität, Monotonie, Stetigkeit etc. notwendig sind. Weiters sind auch pragmatische Aspekte wichtig, wie z.B. empirische Relevanz, ob der Operator also den Zweck erfüllt, dass das menschliche Verhalten in diesem Fall nachgebildet wird.

3.1.3 Fuzzy Logik und unscharfes Schließen:

Bei der Definition der Mengenoperatoren fällt bereits die Analogie von Mengenoperationen (Durchschnitt, Vereinigung, Komplement) und Logikoperationen (Und, Oder, Verneinung) auf. Der Zusammenhang ist dadurch gegeben, dass die Zugehörigkeitsfunktion auch als Wahrheitswert eines Faktus gedeutet werden kann. Als Erweiterung der klassischen zweiwertigen Logik ergibt sich also, dass der Wahrheitswert eines Faktus bzw. eines logischen Schlusses nicht nur mit *wahr* oder *falsch*, sondern als unscharfe Menge angegeben werden kann (mehrwertige Logik).

Wir beschränken uns hier auf den logischen Schluß, der die methodische Grundlage für die regelbasierte Inferenz in Fuzzy Systemen darstellt:

Aus einer logischen Regel (Implikation) WENN $x = A$ DANN $y = B$ soll mit einem aktuellen Faktum ($x=A_1$) ein logischer Schluß gezogen werden:

Implikation : WENN $x=A$ DANN $y=B$

Faktum: $x=A_1$

Schluß : $y=?$

Bei klassischen Mengen ist eine Wenn-Dann-Regel nur anwendbar, wenn die Bedingung des Wenn-Teils erfüllt ist. Beim unscharfen Schluß wird die Regel auch ausgewertet, wenn die Prämisse nur „zu einem gewissen Grad“ erfüllt ist. Dieser *Aktivierungsgrad* kann z.B. sehr einfach als Grad der Übereinstimmung des Inputs A_1 mit dem Regelineinput A angesehen werden.

Mathematische Grundlage für den unscharfen logischen Schluß und somit auch für unscharfe Regler und Expertensysteme sind unscharfe Relationen. Sie stellen Beziehungen zwischen (in diesem Fall) unscharfen Mengen dar, sind also unscharfe Mengen von geordneten Paaren:

Eine zweistellige *Fuzzy Relation* R wird durch das Kreuzprodukt der Grundmengen G_1, G_2 dargestellt: $R : G_1 \times G_2 \rightarrow [0,1]$

R wird beschrieben durch die Zugehörigkeitsfunktion $\mu_R(x, y)$, die jedem Element $(x, y) \in G_1 \times G_2$ den Zugehörigkeitsgrad μ_R zuordnet. Eine Verallgemeinerung auf n -stellige Fuzzy Relationen ist analog durchzuführen.

Besondere Bedeutung kommt dabei dem unscharfen Kreuzprodukt bzw. dem *unscharfen cartesischen Produkt* von Fuzzy Mengen zu, das durch den Minimum-Operator realisiert wird:

$$\mu_1 \times \mu_2 : G_1 \times G_2 \rightarrow [0,1]$$

$$(\mu_1 \times \mu_2)(x, y) := \min[\mu_1(x), \mu_2(y)], \quad (x, y) \in G_1 \times G_2$$

Das Kreuzprodukt (und somit der Minimum-Operator) wird nämlich zur Modellierung der logischen Implikation $x \rightarrow y$, also der Wenn-Dann-Regeln, verwendet:

$$\mu_{x \rightarrow y}(x, y) := \min(\mu_1(x), \mu_2(y)) \quad (x, y) \in G_1 \times G_2$$

Für den *unscharfen logischen Schluß* bedeutet dies mathematisch:

Eine Fuzzy Menge μ_1 auf der Grundmenge G_1 , die ein aktuelles Ereignis repräsentiert, wird über eine Fuzzy Relation R auf der Kreuzproduktmenge $G_1 \times G_2$ in eine Fuzzy Menge μ_2 (auf der Grundmenge G_2) übergeführt: $\mu_2 = \mu_1 \circ R$. μ_2 stellt die gesuchte Schlussfolgerung dar. Übertragen auf das Beispiel weiter oben bedeutet dies:

Implikation : WENN $x=A$ DANN $y=B$

Faktum: $x=A_1$

Schluß : $y=B_1=A_1 \circ R$

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die praktische Modellierung der Wenn-Dann-Regeln durch den Minimum-Operator (UND-Verknüpfung) der gedanklichen Festlegung der Implikation entspricht, nämlich dass eine Regel als wahr zu betrachten ist, wenn Prämisse UND Schlussfolgerung wahr sind. Trotz einiger Unzulänglichkeiten dieser Methode – laut empirischen Studien sind Min- und Max-Operatoren z.B. nur eine grobe Annäherung an die menschliche Bewertungsweise – spielt der Minimum-Operator eine dominierende Rolle in der Praxis. Für eine weiterführende Diskussion bzw. einen Vergleich der klassischen und der unscharfen Implikation sei auf (KAHLERT, FRANK, 1993) verwiesen.

3.2 Fuzzy Control (unscharfe Regelung)

Fuzzy Regler sind wie konventionelle Regler ein nützliches Werkzeug, um Prozesse zu steuern oder Entscheidungen zu treffen. Unscharfe Regler werden meist eingesetzt, wenn es kein analytisches oder nur ein sehr kompliziertes Modell gibt, das den Prozeß beschreibt. Der Vorteil dabei ist, dass das menschliche (Experten-) Wissen, das eher qualitativ als quantitativ, nämlich meist in Form linguistischer Regeln, vorliegt, ähnlich dem menschlichen Denken verarbeitet werden kann.

Der prinzipielle Aufbau eines Fuzzy Reglers ist in Abbildung 3.6 gegeben. Der Regler bestimmt einen (scharfen) Ausgangswert y ausgehend von (scharfen) Eingangsgrößen x_i durch Inferenz, d.h. durch Anwendung der im Fuzzy-System implementierten Regeln. Die einzelnen notwendigen Schritte werden im Folgenden besprochen.

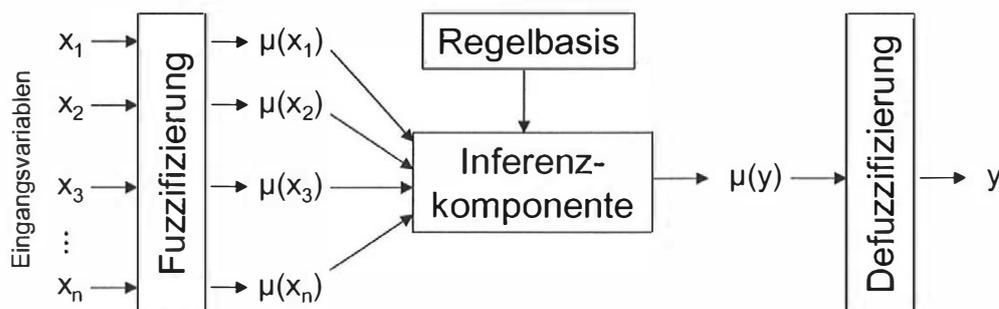


Abbildung 3.6: Struktur eines Fuzzy Reglers.

Zu Beginn sei angemerkt, dass es bei der Konzeptionierung eines Fuzzy Reglers in keinem Schritt allgemeingültige Regeln oder Empfehlungen gibt, was die Wahl von Zugehörigkeitsfunktionen, Operatoren und Berechnungsmethoden angeht. Das Ergebnis allein rechtfertigt den Ansatz und die verwendeten Operatoren. Möglicherweise müssen mehrere Operatoren getestet oder Zugehörigkeitsfunktionen modifiziert werden, um das gewünschte Ergebnis zu erreichen.

Die Eigenschaften eines Fuzzy Reglers können durch das *Übertragungsverhalten* charakterisiert werden. Dabei werden (wie bei konventionellen Reglern) graphische *Kennlinien* ermittelt. Untersuchungen zeigen, dass die Wahl der Operatoren für die Und-, und Oder-Verknüpfung, die Inferenz- sowie die Defuzzifizierungsmethode großen Einfluß auf das Übertragungsverhalten haben. Die Anzahl der linguistischen Terme pro Variable steuert die „Auflösung“ des Systems: je höher die Anzahl der Terme und somit je kleiner die Einflussbreite jedes Terms, desto höher ist die „Auflösung“ bzw. die Sensitivität des Systems. Graphisch bedeutet das, dass die Steilheit der Kennlinie durch die Einflussbreite der Zugehörigkeitsfunktionen gesteuert wird. Daneben spielt der Grad der Überlappung der Zugehörigkeitsfunktionen eine große Rolle: je kleiner der Grad der Überlappung, desto stufenförmiger ist die Übertragungskennlinie (bei Defuzzifizierung nach der Schwerpunktmethode) ausgebildet, siehe z.B. Abbildung 3.7. Weiters ist die Regelbasis selbst für den groben Verlauf der Kennlinie (monoton, sinusförmig,...) verantwortlich.

Für den einfachsten Fall (eine Eingangs- und eine Ausgangsgröße) kann das Übertragungsverhalten, wie bereits erwähnt, graphisch durch eine statische, meist nichtlineare Kennlinie beschrieben werden. Für mehrere Eingangsgrößen ist eine graphische Darstellung nur mehr schwer möglich. Genauer zu diesem Thema findet man in (KAHLERT, FRANK, 1993).

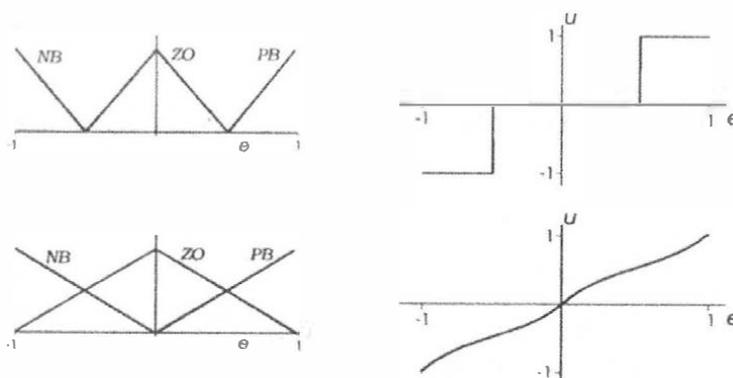


Abbildung 3.7: Beispiel für die Abhängigkeit der Übertragungsfunktion vom Überlappungsgrad der linguistischen Terme, aus (KAHLERT, FRANK, 1993).

3.2.1 Linguistische Variable

Zur Übersetzung des menschlichen Denkprozesses werden in Computern *linguistische Variable* verwendet. Diese unterscheiden sich von numerischen Variablen, dass ihre Werte nicht durch Zahlen, sondern durch Wörter der täglichen Sprache angegeben werden. Es wird also versucht, möglichst viel des Reichtums der menschlichen Sprache in die Verarbeitung durch den Computer einzubeziehen. Auf die strenge wissenschaftliche Definition einer linguistischen Variablen nach Zadeh wird hier verzichtet; für Interessierte sei auf (MAYER ET AL, 1993) verwiesen.

Eine linguistische Variable (z.B. Körpergröße) wird durch mehrere *linguistische Terme* (z.B. klein, mittel, groß) beschrieben. Was die empfohlene Anzahl der linguistischen Terme pro Variable betrifft, gibt es kaum Praxisregeln; laut psychologischen Studien ist es nicht sinnvoll, zuviele Ausprägungen zu verwenden, da die meisten Menschen diese nicht mehr unterscheiden können. Auch hier schwanken die Angaben für die Maximalanzahl der Terme zwischen 7 und 11, siehe (MAYER ET AL, 1993), (KRUSE ET AL, 1995), (KAHLERT, FRANK, 1993). In der Praxis werden je nach Anwendung z.B. 2 bis 7 linguistische Terme verwendet, um einen Zustand zu beschreiben, z.B. klein, mittel, groß oder auch sehr klein, klein, mittel, groß, sehr groß für die Körpergröße eines Mannes (siehe Abbildung 3.8). Es ist jedoch unmittelbar einsichtig, dass das Gesamtsystem umso sensibler reagieren kann, je feiner die Unterteilung ist.

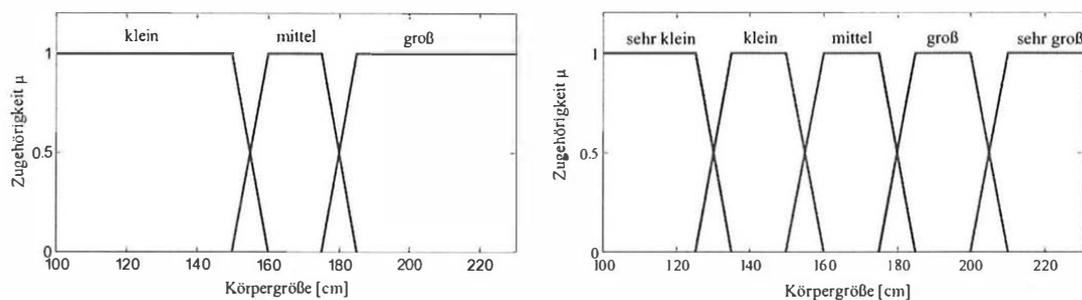


Abbildung 3.8: Beispiele für die Einteilung der linguistischen Variablen „Körpergröße eines Mannes“ in 3 (links) bzw. 5 (rechts) linguistische Terme.

Um glatte Übergänge in der Berechnung zu erreichen, wird empfohlen, dass die Summe der Zugehörigkeitsgrade zu allen linguistischen Termen für jeden scharfen Eingangswert gleich 1 ist, d.h. die Zugehörigkeitsfunktionen sollten wie in Abbildung 3.8 symmetrisch aufgebaut sein und sich bei $\mu=0.5$ schneiden. Je nach Anwendung können aber natürlich auch andere Einteilungen sinnvoll sein.

3.2.2 Schritt 1: Fuzzifizierung

Nachdem in der Planungsphase bereits die relevanten Eingangs- und Ausgangsgrößen gefunden wurden, müssen während der Implementierung sinnvolle Zugehörigkeitsfunktionen für die jeweiligen Eigenschaften festgelegt werden. D.h. die Form und die spezifischen Wertebereiche der Zugehörigkeitsfunktionen müssen für jede linguistische Variable bzw. jeden linguistischen Term festgelegt werden.

In der konkreten Anwendung wird eine Eingangsgröße (ein scharfer Messwert) fuzzifiziert, d.h. durch seine Zugehörigkeitsgrade der einzelnen Terme dargestellt (siehe Abbildung 3.9). Manchmal wird in der Literatur angegeben, dass man durch die Fuzzifizierung eine unscharfe Menge erhält; streng genommen handelt es sich dabei aber um einen Vektor aller Zugehörigkeitsgrade.

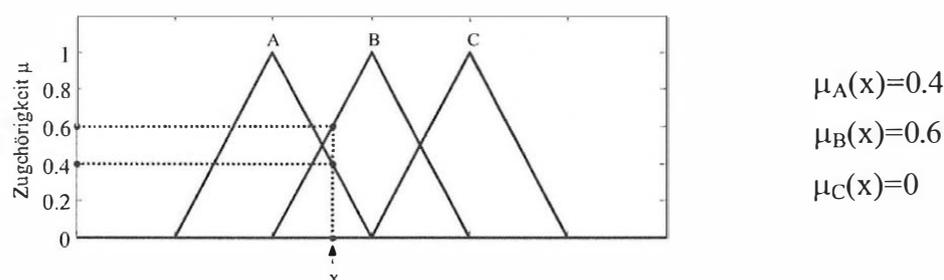


Abbildung 3.9: Beispiel für die Fuzzifizierung einer Eingangsgröße x durch die Darstellung ihrer Zugehörigkeitsgrade μ zu den Fuzzy Termen A, B und C.

Die Fuzzifizierung entspricht also der linguistischen Interpretation einer gemessenen oder berechneten technischen Größe.

3.2.3 Schritt 2: Regelbasis

Das zur Verarbeitung nötige Expertenwissen wird in Form von Wenn-Dann-Regeln erfasst. Dabei ist es wichtig, dass anstelle komplizierter mathematischer Modelle das menschliche Denken zur Aufstellung der Regeln verwendet wird. Die Regelbasis enthält alle Wenn-Dann-Regeln.

Jede (linguistisch formulierte) Wenn-Dann-Regel besteht aus einer Prämisse (Wenn-Teil), in der die Meßgrößen verarbeitet werden, sowie aus einer Konklusion (Dann-Teil), die den Stellwert bzw. Ausgabewert für diese Situation ausgibt.

Eine allgemeine Darstellung von m Regeln mit je n Eingangsgrößen würde z.B. folgendermaßen aussehen:

- R_1 : WENN $x_1 = A_{11}$ UND...UND $x_i = A_{1i}$ UND...UND $x_n = A_{1n}$ DANN $y = B_1$
 \vdots
 R_j : WENN $x_1 = A_{j1}$ UND...UND $x_i = A_{ji}$ UND...UND $x_n = A_{jn}$ DANN $y = B_j$
 \vdots
 R_m : WENN $x_1 = A_{m1}$ UND...UND $x_i = A_{mi}$ UND...UND $x_n = A_{mn}$ DANN $y = B_m$

mit x_1, \dots, x_n ... Eingangsgrößen

A_{1i}, \dots, A_{mi} ... linguistische Terme der Eingangsgröße x_i

y ... Ausgangsgröße

B_1, \dots, B_m ... linguistische Terme der Ausgangsgröße

Anmerkung: Die Faktenbasis, die bei Expertensystemen notwendig ist, ist bei Fuzzy Reglern nicht vorhanden, da die Eingangsdaten (Fakten) ja üblicherweise von Sensoren bzw. wie in diesem Fall von mathematischen Berechnungen geliefert werden.

3.2.4 Schritt 3: Inferenz und Aggregation

Inferenz bezeichnet hier das fuzzy-logische Schließen auf unscharfen Informationen. Aus einem aktuellen Eingangswert (Fakt) wird mit Hilfe der Regeln (Implikationen) ein logischer Schluß gezogen. Zadeh prägte dafür den Ausdruck *Approximatives Schließen* (*approximate reasoning*). Diese Art des Schließens entspricht sehr gut dem menschlichen „Alltagsschließen“.

Wie bereits in Kapitel 3.1.3 definiert wurde, wird zur Modellierung der Wenn-Dann-Regeln üblicherweise der Minimum-Operator verwendet:

$$\mu_{x \rightarrow y}(x, y) := \min(\mu_1(x), \mu_2(y)) \quad (x, y) \in G_1 \times G_2$$

Für den allgemeinen Fall gilt:

$$R_1: \min[\mu_{11}(x'_1), \dots, \mu_{1n}(x'_n), \mu_{B_1}(y)] = \mu_{B'_1}(y)$$

\vdots

$$R_j: \min[\mu_{j1}(x'_1), \dots, \mu_{jn}(x'_n), \mu_{B_j}(y)] = \mu_{B'_j}(y)$$

\vdots

$$R_m: \min[\mu_{m1}(x'_1), \dots, \mu_{mn}(x'_n), \mu_{B_m}(y)] = \mu_{B'_m}(y)$$

$x' = (x'_1, \dots, x'_n)$ stellt dabei den aktuellen Satz von Eingangsgrößen dar.

Für jede Regel R_j kann also der *Erfüllungsgrad* H_j der Prämisse beim aktuellen Ereignis berechnet werden:

$$H_j := \min[\mu_{j_1}(x_1'), \dots, \mu_{j_n}(x_n')]$$

Als Ergebnismenge der Regel R_j erhält man dann also jene Fuzzy Menge μ_{B_j} , die sich aus μ_{B_j} sowie dem berechneten Erfüllungsgrad H_j ergibt. Vereinfacht ausgedrückt erzeugt also jede Regel ein „geköpftes“ bzw. ein durch „Abschneiden“ bei H_j erzeugtes Fuzzy Set, repräsentiert durch die Zugehörigkeitsfunktionen $\mu_{x \rightarrow y}$ bzw. μ_{B_j} für den allgemeinen Fall, siehe Abbildung 3.10, oberste Zeile.

Die Kombination all dieser einzelnen Mengen erfolgt durch die sogenannte *Aggregation*. Die häufigste Aggregationsmethode ist der Maximum-Operator (= Max-Min-Inferenz), die auf Zadeh und Mamdani zurückgeht.

$$R_1 \cup \dots \cup R_j \cup \dots \cup R_m : \mu_{ges} := \max[\mu_{B_1}(y), \dots, \mu_{B_j}(y), \dots, \mu_{B_m}(y)]$$

Die so erzeugte Gesamtmenge μ_{ges} stellt also die Zugehörigkeiten der Ausgangsvariablen zu ihren einzelnen linguistischen Termen dar (siehe Abbildung 3.10, rechts unten).

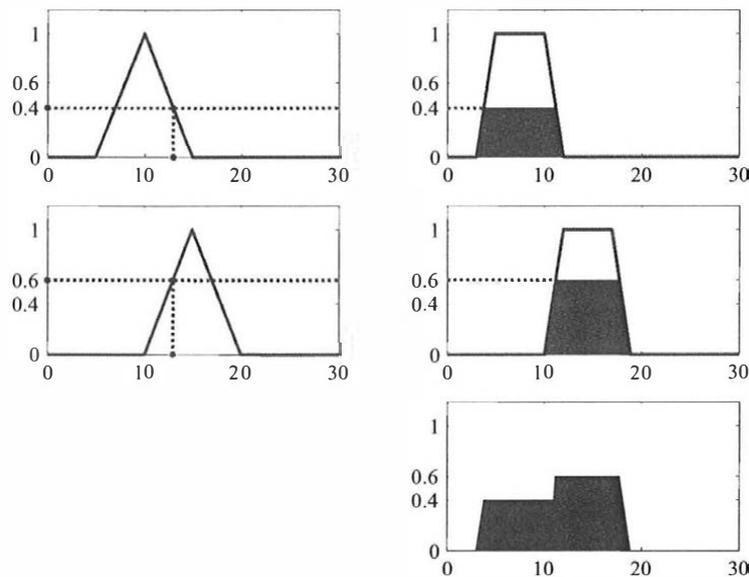


Abbildung 3.10: Beispiel für die Inferenz und Aggregation in einem Fuzzy System. Jede Zeile repräsentiert eine Regel, rechts unten ist die aggregierte Gesamtmenge dargestellt.

3.2.5 Schritt 4: Defuzzifizierung

Als Ausgangswert wird üblicherweise keine Fuzzy Menge, wie sie im Aggregations Schritt erzeugt wird, sondern wieder ein scharfer Wert benötigt. Es muß also aus der zuvor erzeugten Aggregationsmenge ein scharfer Wert berechnet werden, obwohl dabei ein Teil der Information verloren geht. Für diese Defuzzifizierung existieren mehrere Methoden. Die am häufigsten angewandte ist, den Flächenschwerpunkt der Aggregationsmenge zu berechnen. Diese Methode, meist als *Center of Gravity* (CoG) oder als *Centroid* bezeichnet, ist einfach zu implementieren und hat sich in der Praxis bewährt (siehe Abbildung 3.11, rechts unten).

$$x_S = \frac{\int_{x_A}^{x_E} x \cdot f(x) dx}{\int_{x_A}^{x_E} f(x) dx}$$

mit x_S ...x-Wert des Schwerpunkts, gesuchter Ausgangswert

x_A, x_E ...x-Werte von Anfang und Ende der aggregierten Fläche

$f(x)$...Berandungsfunktion des Flächenstücks

Hier zeigt sich, warum zumeist Dreiecks- und Trapezfunktionen in den praktischen Anwendungen verwendet werden. Denn für diese stückweise linearen Funktionsverläufe sind die Schwerpunktsberechnungen leicht und schnell durchzuführen; für einen komplizierteren Funktionsverlauf muß hingegen eine numerische Integrationsmethode angewandt werden.

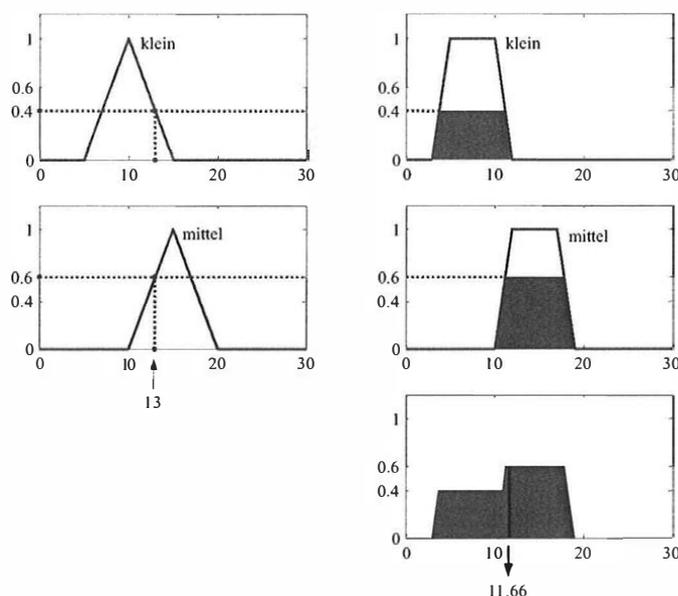


Abbildung 3.11: Aus der unscharfen Ausgangsmenge, die in Abbildung 3.7 erzeugt wurde, wird ein scharfer Ausgangswert durch Defuzzifizierung gewonnen.

Bei der Erstellung des Systems muß man sich allerdings auch einiger Nachteile der Schwerpunktmethodene bewusst sein: einerseits kann damit nicht der gesamte Ausgangsgrößenbereich erreicht werden. Andererseits kann es auch zu unerwünschten Ergebnissen kommen, nämlich dass der Schwerpunkt gar nicht in der Menge liegt (siehe Abbildung 3.12). Man stelle sich als extremes Beispiel folgende Situation vor, (KRUSE ET AL,1995), (BANDEMER,1993): Ein Fahrzeug soll gesteuert werden, dass es einem Hindernis, das direkt in Fahrtrichtung liegt, ausweichen kann. Das aggregierte Fuzzy Set hat nach Auswertung aller Regeln zwei Maxima: „Auto nach links steuern“ und „Auto nach rechts steuern“. Die CoG-Methode bestimmt daraus die Steuergröße, und das Auto würde gerade auf das Hindernis zufahren.

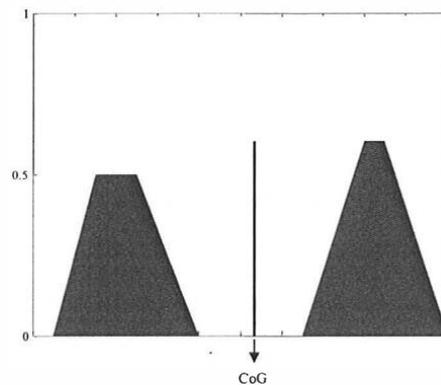


Abbildung 3.12: Beispiel für die nachteilige Eigenschaft, dass der Schwerpunkt nicht innerhalb der Menge liegen muß.

Eine zweite Methode der Defuzzifikation, die *Maximum-Methode*, versucht dieses Problem zu umgehen. Sie wählt den Ergebniswert, an dem die aggregierte Fuzzy Menge maximal wird. Da diese Methode nicht eindeutig sein muß (wenn also nicht nur ein Element, sondern mehrere Elemente in einem Intervall den Maximalwert annehmen), muß eine erweiterte Strategie eingesetzt werden, indem der kleinste, der größte bzw. der mittlere Wert des Maximums herangezogen wird (Smallest of Maximum SoM, Largest of Maximum LoM, Mean of Maximum MoM). Doch gerade bei der häufig angewendeten Methode MoM ist wiederum nicht gewährleistet, dass der gefundene Punkt innerhalb der Menge liegt. Ein weiterer Nachteil ist, dass hier nur das Intervall mit dem maximalen Ausgangswert betrachtet wird; der übrige Funktionsverlauf wird im Gegensatz zur Schwerpunktmethodene völlig ignoriert.

Abbildung 3.13 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der in den meisten Systemen implementierten und soeben erwähnten Defuzzifizierungsmethoden. Für weitere Methoden der Defuzzifizierung siehe (KAHLERT, FRANK, 1993) oder (BANDEMER, GOTTWALD, 1992).

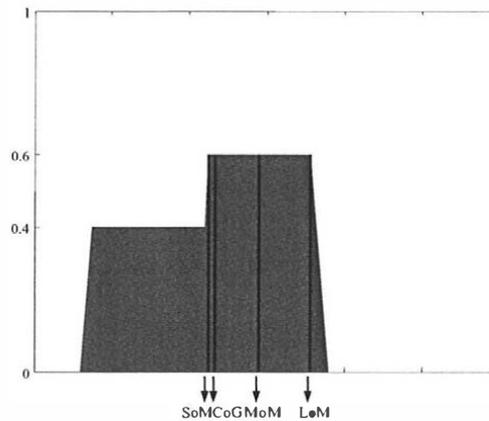


Abbildung 3.13: Überblick über die Ergebnisse der häufigsten Defuzzifizierungsmethoden.

3.2.6 Typen von Fuzzy Reglern

Der soeben beschriebene Fuzzy Regler wird als *Mamdani-Regler* bezeichnet. Die wichtigsten Schritte sollen hier nochmals kurz zusammengefasst werden:

- ein Experte formuliert (linguistische) Regeln anhand seines Wissens
- für die notwendigen Eingangs- und Ausgangsgrößen werden linguistische Terme sowie deren Wertebereiche (Zugehörigkeitsfunktionen) definiert
- die (gemessenen) Eingangswerte werden an den Inferenzmechanismus weitergegeben, wo der Erfüllungsgrad jeder Regel berechnet wird (mittels des MIN-Operators)
- nach Auswertung aller Regeln werden die entstandenen Teilmengen aggregiert (mittels MAX-Operator)
- daraus wird in der Defuzzifizierung ein scharfer Ausgangswert berechnet.

Im Gegensatz dazu soll nun kurz der *Takagi-Sugeno-Regler* beschrieben werden. Er beruht auf einer Modifikation des Mamdani-Ansatzes, unterscheidet sich jedoch in folgenden Punkten:

- Regelbasis: Eine allgemeine Regel R_i wird folgendermaßen definiert:

$$R_i : \text{WENN } x_1 = A_{1,i} \text{ UND } \dots \text{ UND } x_n = A_{n,i} \text{ DANN } y_i = f_i(x_1, \dots, x_n)$$

$$\text{mit z.B. } f_i(x_1, \dots, x_n) = a_{0,i} + a_{1,i} \cdot x_1 + \dots + a_{n,i} \cdot x_n, \quad i = 1, \dots, k$$

Der Ausgangswert wird also nicht in linguistische Terme partitioniert; f_i und die Gewichtsparameter $a_{0,i}, \dots, a_{n,i}$ hängen von der Anwendung ab, meist wird wie hier ein linearer Zusammenhang mit den Eingangsgrößen x_1, \dots, x_n definiert.

- keine Defuzzifizierung: der Ausgangswert y wird direkt über die funktionalen Zusammenhänge f_i bestimmt. Nach Auswertung aller Regeln müssen die einzelnen Werte von f_i zusammengefasst werden:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^k H_i \cdot f_i(x_1, \dots, x_n)}{\sum_{i=1}^k H_i}$$

Die scharfe Ausgangsgröße y wird also direkt als mit den Erfüllungsgraden der Prämissen H_i gewichtete Summe der Ausgangswerte f_i berechnet. Dadurch ist keine Defuzzifizierung notwendig.

Der Takagi-Sugeno-Regler eignet sich daher besonders für Anwendungen, wo die Funktionen f_i analytisch oder aus Beobachtungen abgeleitet werden können, wie z.B. Interpolation (GRAUEL, 1995); die Parameter a können z.B. auch durch Neuronale Netze gefunden werden.

Da gerade die physikalischen Eigenschaften eines Hanges nicht bekannt sind, wird im Folgenden ein Mamdani-Regler verwendet (siehe Kapitel 4).

Weitere aus den beiden Grundtypen abgeleitete Reglertypen sowie alle grundlegende Literatur, also z.B. die Originalartikel von Zadeh, Mamdani, werden in (GRAUEL, 1995), (KRUSE ET AL, 1995), oder (BANDEMER, 1993) angegeben.

4 Grundlagen des Algorithmus

Wie bereits zu Beginn festgestellt, wird dieses Kapitel aus wirtschaftlichem Interesse gekürzt gegenüber der originalen Arbeit veröffentlicht. Konkret werden dabei die Zugehörigkeitsfunktionen sowie die Regelbasis nicht dargestellt; bei einigen Parametern wurden diese Graphiken dennoch zur Veranschaulichung des Prinzips übernommen.

4.1 Übersicht über den Programmablauf

In Kapitel 2 erfolgte die Darstellung der Strainanalyse, der geodätischen Grundlage für eine Untersuchung von Verschiebungsvektoren. Die Theorie der Fuzzy Methoden (Kapitel 3) erlaubt eine etwas differenziertere Sichtweise auf die üblicherweise „exakten“ geodätischen Messdaten und Ergebnisse. Außerdem stellen Fuzzy Methoden eine Möglichkeit zur Verfügung, unser Alltagsdenken und -wissen methodisch zu verarbeiten.

Der im folgenden vorgestellte Algorithmus versucht, diese beiden Zugänge zu verbinden, um aus gegebenen Verschiebungsvektoren Blöcke gleichen Bewegungsverhaltens zu finden.

Als Eingangsdaten dienen die (Abbildungs-)Koordinaten (y,x) zweier Epochen, samt Genauigkeitsinformation s_y, s_x (falls vorhanden bzw. gewünscht). Diese Koordinatenpaare repräsentieren die Verschiebungsvektoren, die zwischen den beiden Messepochen aufgetreten sind. Es sei angemerkt, dass momentan nur zwei Epochen verglichen werden können. Da der Algorithmus grundsätzlich als Vorstufe zur Instrumentierung mit permanent messenden, hochgenauen Sensoren gedacht ist (siehe Kapitel 1), erscheint eine Erweiterung auf gleichzeitige Verarbeitung mehrerer Epochen nicht notwendig. Falls nötig, können mit dem bestehenden Algorithmus aber je zwei seriell aufeinanderfolgende Messepochen analysiert werden.

Der gesamte Algorithmus wurde im mathematischen Softwarepaket Matlab[®] implementiert, da Matlab sowohl hochwertige mathematische Routinen als auch eine Fuzzy Toolbox zur Verfügung stellt.

Allgemein wurden für alle implementierten Fuzzy Systeme die Max-Min-Inferenz und die 'Center of Gravity'-Defuzzifizierungsmethode verwendet. Die Grundlagen dazu wurden bereits in Kapitel 3.2 dargestellt.

4.1.1 Nachbarschaft

Mit den eingelesenen Punkten wird zunächst eine Delaunay-Triangulation durchgeführt, um die natürlichen Nachbarn der einzelnen Punkte zu bestimmen. Die

Punkte werden dabei so in Dreiecke eingeteilt, dass kein anderer Punkt innerhalb des Kreises liegt, der dem Dreieck umschrieben ist, siehe Abbildung 4.1. Die Delaunay-Triangulation ist ein Standardverfahren für GIS-Anwendungen. Bekanntlich ist diese Triangulation dual dem Voronoi-Diagramm; der Mittelpunkt des erwähnten Kreises um ein Dreieck entspricht einem Knoten des Voronoi-Polygons (siehe Abbildung 4.1 in grau).

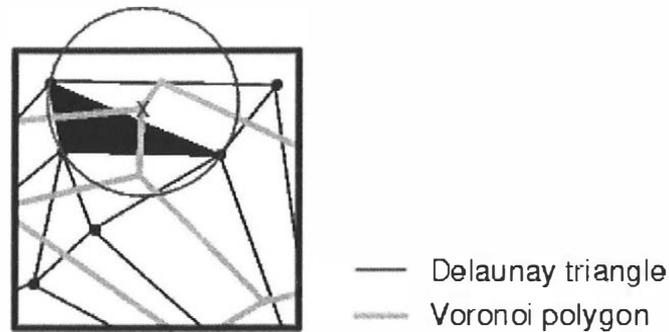


Abbildung 4.1: Darstellung von Delaunay-Triangulation und Voronoi-Polygonen, aus (MATLAB, 2003).

Aus der Delaunay-Triangulation wird programmintern eine Nachbarschaftsmatrix der Dimension $n \times n$ (mit $n = \text{Anzahl der eingelesenen Punkte}$) erstellt, in der benachbarte Punkte mit 1 gekennzeichnet sind.

Abbildung 4.2 zeigt die Dreieckseinteilung für ein Anwendungsbeispiel aus Kapitel 5. Gleichzeitig wird auch eine eher unangenehme Eigenschaft der Delaunay-Triangulation dargestellt. Es wird stets ein „konvexes“ Dreiecksnetz erzeugt, deshalb gelten auch z.B. die Punkte 21 und 47 als benachbart, obwohl dies nicht dem menschlichen Denken entspricht. An den Rändern kann es daher zu unerwünschten und nicht sinnvollen Effekten kommen.

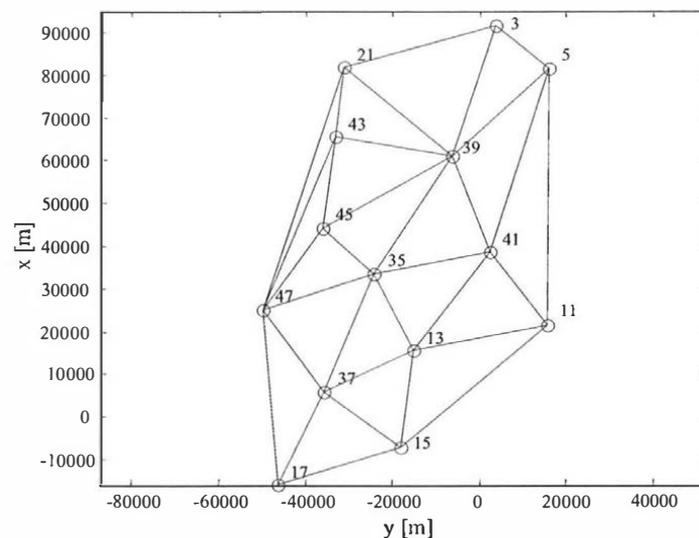


Abbildung 4.2: Beispiel einer Delaunay-Triangulation für einen späteren Anwendungsfall.

4.1.2 Schema des Programmablaufs

Die Verschiebungsvektoren werden als Eingangsdaten eingelesen; daraus werden verschiedene geodätische und visuelle Parameter abgeleitet. Aus den Beobachtungen (den Verschiebungsvektoren) werden mittels einer vermittelnden Ausgleichung die Strainparameter e_{xx} , e_{xy} , e_{yy} , die den inneren Verformungszustand beschreiben, sowie die Starrkörperbewegungskomponenten ω (Rotation), t_x , t_y (Translationen) berechnet und zur Bewertung des Bewegungsverhaltens herangezogen. In Kapitel 2.2.2.2 wurden Bedeutung und Berechnung dieser Parameter bereits ausführlich beschrieben. Für die Bestimmung dieser 6 Parameter benötigt man also 3 Punkte (in 2D), das ist auch der Grund, warum in früheren Arbeiten die Strainanalyse stets in Dreiecken durchgeführt wurde. Da hier zur Ableitung von Genauigkeitsmaßen aber das Prinzip der kleinsten Quadrate angewendet werden soll, muß der kleinstmögliche Startblock 4 Punkte enthalten.

Der Algorithmus startet also mit der Suche nach 4 benachbarten Punkten (siehe Strukturdiagramm in Abbildung 4.3). Da von vornherein keine Kombination von 4 Punkten ausgeschlossen werden kann, müssen alle möglichen Kombinationen berechnet werden. Aus dieser Vielzahl von Lösungen (z.B. 200 Kombinationen bei 14 Punkten, 900 Lösungen bei 30 Punkten und knapp 9000 Fälle bei ungefähr 200 Punkten) muß der „optimalste“ Block gefunden werden. Dazu dient das erste Fuzzy System „Auswahl4“. Aus den berechneten Parametern der Ausgleichungen werden hier alle Möglichkeiten bewertet; ist die „beste“ Lösung gefunden, wird iterativ ein Punkt nach dem anderen dem Block hinzugefügt. Dabei wird wiederum aus allen Nachbarpunkten der „optimalste“ Punkt gewählt, d.h. der Punkt, dessen Verschiebungsvektor am besten mit dem Bewegungsmuster des Blockes übereinstimmt. Diese Auswahl geschieht mit dem Fuzzy System „Auswahl-Iteration“. Sobald ein neuer Punkt vorläufig hinzugefügt wurde, muß im dritten Fuzzy System, „Bewertung“, ein Indikator berechnet werden, wie gut dieser Punkt tatsächlich zum Block passt; denn es kann ja auch der Fall eintreten, dass nur mehr schlecht passende Punkte vorhanden sind. Fuzzy System 2 wählt dennoch den optimalsten Punkt daraus aus; System 3 muß daher diese Wahl bewerten. Ein viertes Fuzzy System „Entscheidung“ trifft eine endgültige ja/nein-Entscheidung auf der Basis der Entwicklung des Blocks. Wird der Punkt akzeptiert, wird der nächste Punkt ausgewählt; muß der Punkt verworfen werden, wird der letzte Punkt natürlich entfernt und der Block wird beendet.

Danach wird versucht, aus den verbliebenen Punkten neue Startblöcke mit 4 Punkten zu finden, und der Algorithmus startet von neuem.

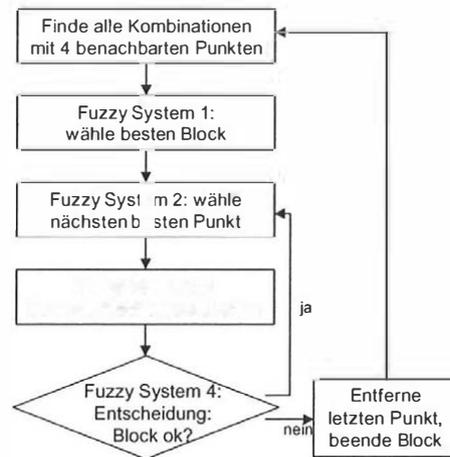


Abbildung 4.3: Gesamtschema des Algorithmus.

In den folgenden Kapiteln werden die vier Fuzzy Systeme, der mathematische Hintergrund der Eingangsparameter sowie der jeweilige Ausgangsparameter genauer beschrieben. Die praktischen Anwendungsbeispiele des Algorithmus finden sich in Kapitel 5.

4.2 Fuzzy System „Auswahl4“

Das Fuzzy System „Auswahl4“ dient zu Beginn des Ablaufs zur Auswahl des 4-Punkte-Startblocks aus der Vielzahl von möglichen Lösungen.

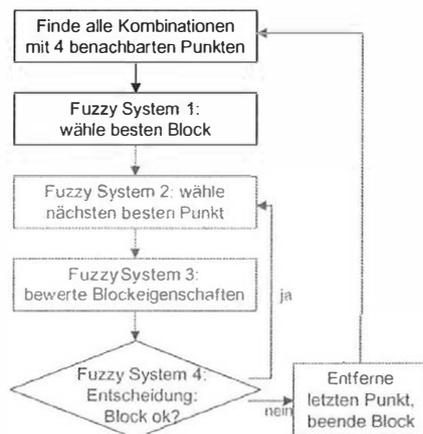


Abbildung 4.4: Teil des Strukturdiagramms für das erste Fuzzy System.

Dabei werden für alle möglichen 4-Punkt-Kombinationen, die aus benachbarten Punkten gebildet werden können, die folgenden Parameter berechnet:

- Standardabweichung der Gewichtseinheit s_0 der Ausgleichung
- Halbachsen e_1 und e_2 der Verzerrungsellipse
- Interquartilsabstand iqr der Residuen der Ausgleichung
- Ähnlichkeit der Azimute der Verschiebungsvektoren
- Ähnlichkeit der Beträge der Verschiebungsvektoren

Diese Parameter haben sich in den vorangehenden Untersuchungen als wichtige Indikatoren erwiesen. Anhand dieser Eingangsparameter erstellt das Fuzzy System eine Reihung; die beiden bestpassendsten 4-Punkt-Blöcke werden dem Anwender angezeigt, der sich für einen Startblock entscheiden muß.

Einen Überblick über Eingangs- und Ausgangsparameter gibt Abbildung 4.5. Die einzelnen Parameter werden in den folgenden Abschnitten genauer beschrieben.

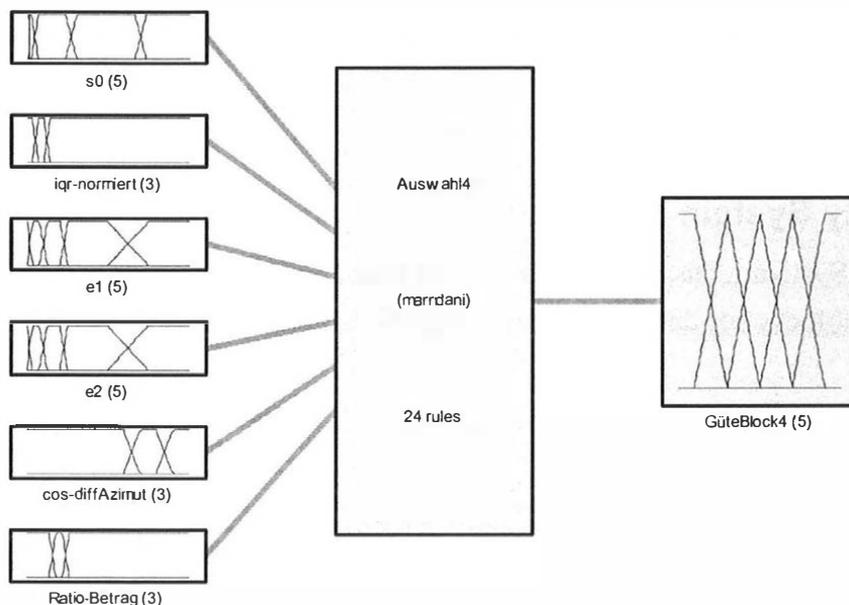


Abbildung 4.5: Struktur des ersten Systems. Die Eingangsvariablen (links) werden über das Inferenzsystem (mitte) auf eine Ausgangsgröße (rechts) abgebildet.

4.2.1 Outputvariable 'GüteBlock4'

Zum besseren Verständnis soll zu Beginn des Abschnitts zunächst die Ausgangsvariable beschrieben werden. In den folgenden Abschnitten der Eingangsvariablen und der zugehörigen Verknüpfungsregeln wird stets darauf Bezug genommen.

Die Ausgangsvariable bezeichnet einen Wert, der die Güte des Blocks darstellt. Der Wertebereich liegt zwischen 0 und 1; je höher der Wert, desto besser passen die Bewegungsmuster der jeweils untersuchten 4 Punkte zueinander.

Anmerkung: Theoretisch liegen die Ausgangswerte aller 4 Fuzzy Systeme im Intervall $[0,1]$, praktisch wird der Bereich durch die Wahl der Defuzzifizierungsmethode jedoch eingeschränkt. Bei der Center of Gravity-Methode (wie hier verwendet), betragen z.B. der minimal bzw. maximal erreichbare Wert des besprochenen ersten Fuzzy Systems 0.14 bzw. 0.86.

Die Ausgangsvariable wird durch 5 linguistische Terme beschrieben: sehr-klein, klein, mittel, groß, sehr-groß. Die Wertebereiche der Zugehörigkeitsfunktionen sind Abbildung 4.6 zu entnehmen.

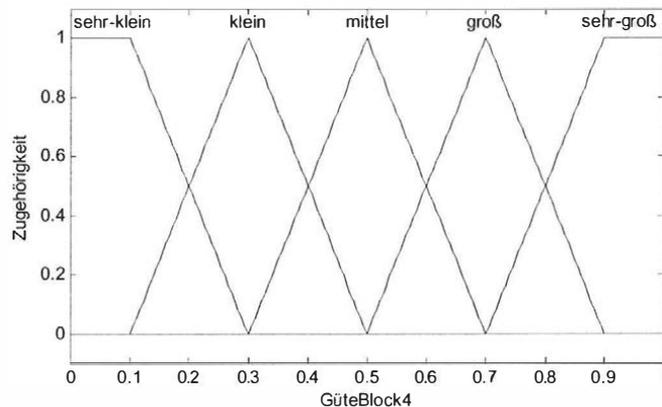
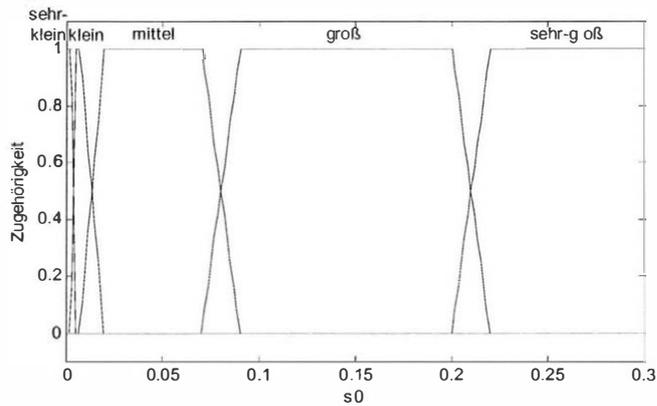


Abbildung 4.6: Einteilung der Ausgangsvariablen in 5 linguistische Terme.

4.2.2 Standardabweichung der Gewichtseinheit nach dem Ausgleich

Ein Eingangsparameter des Fuzzy Systems ist die Standardabweichung der Gewichtseinheit nach dem Ausgleich der Strainanalyse, im folgenden mit s_0 bezeichnet. Prinzipiell kann s_0 verwendet werden, um die „Güte“ der affinen Abbildung der Punkte aufeinander zu beurteilen.

Zur Interpretation des Eingangswerts (Fuzzifizierung, siehe Kapitel 3.2.2) müssen Form und Wertebereiche der Zugehörigkeitsfunktionen festgelegt werden. Der Parameter s_0 wird im Fuzzy System konkret durch 5 linguistische Terme repräsentiert (siehe Abbildung 4.7):

Abbildung 4.7: Modellierung der Eingangsvariablen s_0 .

Für das Fuzzy System bedeutet dies: je größer s_0 ist, desto eher muß angenommen werden, dass diese Punkte nicht auf einem gemeinsamen Block liegen. Dies wird auch durch die Wenn-Dann-Regeln, die diese Eingangsvariable mit dem Ausgangswert (GüteBlock4) verbinden, ausgedrückt.

```

IF (s0 IS sehr-klein) THEN (GüteBlock4 IS sehr-groß) (1)
IF (s0 IS klein) THEN (GüteBlock4 IS groß) (1)
IF (s0 IS mittel) THEN (GüteBlock4 IS mittel) (1)
IF (s0 IS groß) THEN (GüteBlock4 IS klein) (1)
IF (s0 IS sehr-groß) THEN (GüteBlock4 IS sehr-klein) (1)

```

Anmerkung: Die Zahl hinter jeder Regel (hier immer 1) gibt den jeweiligen Gewichtungsfaktor an. So können Regeln mit weniger Einfluß dementsprechend implementiert werden.

Die Gesamtheit aller Regeln bilden die Regelbasis dieses Fuzzy Systems. Durch die Verknüpfung der Eingangsvariablen mit der Ausgangsvariablen mittels der Regelbasis kann der Inferenzmechanismus gemäß Kapitel 3.2.4 angewendet werden. Der Ablauf einer solchen Auswertung ist exemplarisch in Kapitel 4.2.7 angegeben.

4.2.3 Halbachsen e_1 und e_2 der Verzerrungsellipse

Zwei weitere Eingangsparameter sind die Beträge der großen und kleinen Halbachse der jeweiligen Verzerrungsellipse (e_1 und e_2). Die Parameter der Verzerrungsellipse werden aus den Strainparametern abgeleitet; sie sind unabhängig vom Koordinatensystem und beschreiben vollständig den Verzerrungszustand des Körpers; zur Ableitung der Verzerrungsellipse siehe Kapitel 2.2.2.2. Solange die Halbachsen e_1 bzw. e_2 klein sind (üblicherweise nur wenige ppm, abhängig von der

Ausdehnung des Gebiets und der Größe der Verschiebungen), gilt das Gebiet als wenig verzerrt, das Bewegungsmuster der Punkte stimmt also gut überein. Wird eine oder beide der Halbachsen groß, ist anzunehmen, dass ein nicht passender Punkt mit völlig anderem Bewegungsmuster die Parameter verzerrt, worauf entsprechend reagiert werden muß.

4.2.4 Interquartilsabstand der Residuen nach dem Ausgleich

Der Begriff *Interquartilsabstand* (*interquartile range*, *iqr*) stammt aus dem Bereich der deskriptiven Statistik und bezeichnet den Bereich einer Datenreihe zwischen dem 25%- und 75%-Quantil, auch erstes und drittes Quartil (Q_1 und Q_3) genannt:

$$iqr = Q_3 - Q_1$$

Informationen finden sich z.B. in (FILZMOSE, 2002) und im Web (WEISSTEIN, 2004); der Originalartikel stammt von (TUKEY, 1977).

Der Interquartilsabstand wird meist zum Erstellen der sogenannten Boxplots benötigt. Der *Boxplot* stellt die Verteilung einer Datenreihe anschaulich graphisch dar. Die Werte werden der Größe nach sortiert, dann wird der Median (also das 50%-Quantil) sowie die 25%- und 75%-Quantile berechnet. Der Interquartilsabstand ist durch die Länge des Rechtecks (*box*) gekennzeichnet, der Median ist als Linie in dieser Box markiert. Dadurch lassen sich robuste Maße für die Streuung und das Mittel ableiten. Anhand der Lage des Medians in der Box kann eine eventuelle Schiefe der Verteilung erkannt werden. Werte außerhalb der Box, aber innerhalb des 1.5-fachen Interquartilsabstands werden durch die sogenannten Barthaare (*whiskers*) dargestellt; Werte außerhalb der Whiskers gelten als Ausreißer. Dabei ist zu beachten, dass die Whiskers allgemein nicht bis zum berechneten 1.5-fachen Grenzwert, sondern immer nur bis zum letzten Wert der Reihe innerhalb dieses 1.5-fachen Abstands gezeichnet werden.

Abbildung 4.8 zeigt die graphische Darstellung der wichtigsten Kennwerte des Boxplots: Als Daten dienen zwei Reihen von Residuen nach der Strainanalyse. Reihe 1 beschreibt einen Fall, für den alle 4 Punkte auf einem Block liegen. Die Residuen streuen wenig; die Box ist also sehr kurz, d.h. der *iqr* ist sehr klein; außerdem gibt es keine Ausreißer, denn die Whiskers reichen nur bis zum jeweils äußersten Wert. Reihe 2 dagegen zeigt einen Fall, für den 3 Punkte einen Block bilden, der vierte Punkt allerdings nicht zu diesem Block gehört. Die Box, d.h. der Interquartilsabstand, ist deutlich größer als bei Reihe 1. Außerdem kann man sehen, dass die Werte weit streuen; weiters ist ein Ausreißer rechts oben mit einem '+' markiert. Der Median liegt hier nicht in der Mitte der Box, man könnte (bei einer größeren

Datenmenge als der verfügbaren) also davon ausgehen, dass diese Verteilung schiefsymmetrisch ist.

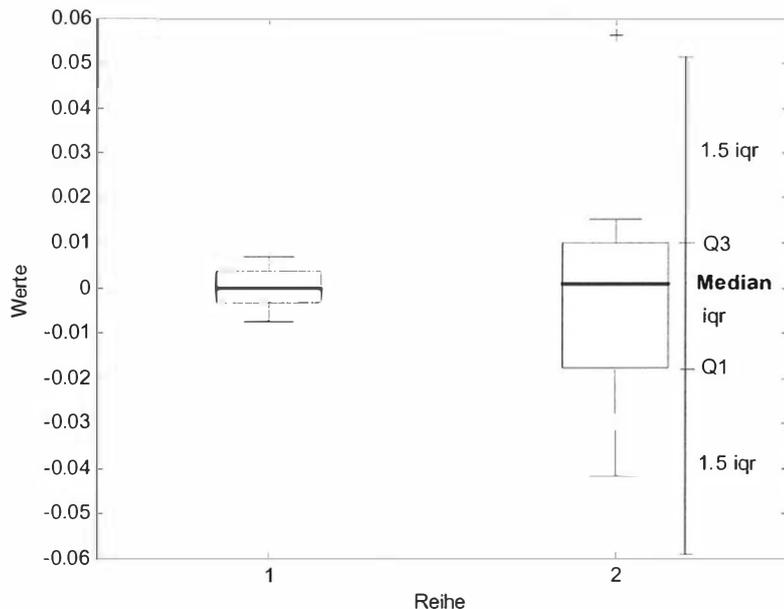


Abbildung 4.8: Beispiele für einen Boxplot. Reihe 2 zeigt die Definition des Interquartilsabstands (iqr), sowie einen Ausreißer außerhalb des 1.5-fachen iqr.

Im implementierten Algorithmus wird, wie eben beschrieben, die Verteilung der Residuen nach der Strainanalyse analysiert. Untersuchungen zur Einteilung der verschiedenen 4-Punkt-Blöcke haben das in Abbildung 4.8 gezeigte Verhalten bestätigt: Für Abbildung 4.9 wurden die Strainanalysen und der Interquartilsabstand der Residuen aller 221 möglichen 4-Punkt-Kombinationen des Testnetzes Delft (siehe Kapitel 5.1) berechnet und in der zufälligen Reihenfolge der Berechnung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die 58 iqr-Werte der korrekten Kombinationen (in blau) meist deutlich von den 163 nicht korrekten Gruppierungen (in rot) unterscheiden. Der Interquartilsabstand der Residuen ist also als Indikator für eine Unterscheidung zwischen korrekten und nicht korrekten Blöcken geeignet.

Auch bei Darstellung derselben Interquartilsabstand-Werte in Histogrammen erkennt man die unterschiedliche Verteilung. Abbildung 4.10 zeigt die kombinierten Histogramme für den iqr der korrekten Blöcke in blau, während die nicht korrekten Blöcke wiederum in rot dargestellt sind.

Abbildung 4.11 zeigt die Verteilung der Residuen selbst; auch hier ist deutlich der Unterschied in der Streuung zwischen korrekten Blöcken (dunkel, im Vordergrund) und nicht korrekten Blöcken (hell, im Hintergrund) zu erkennen.

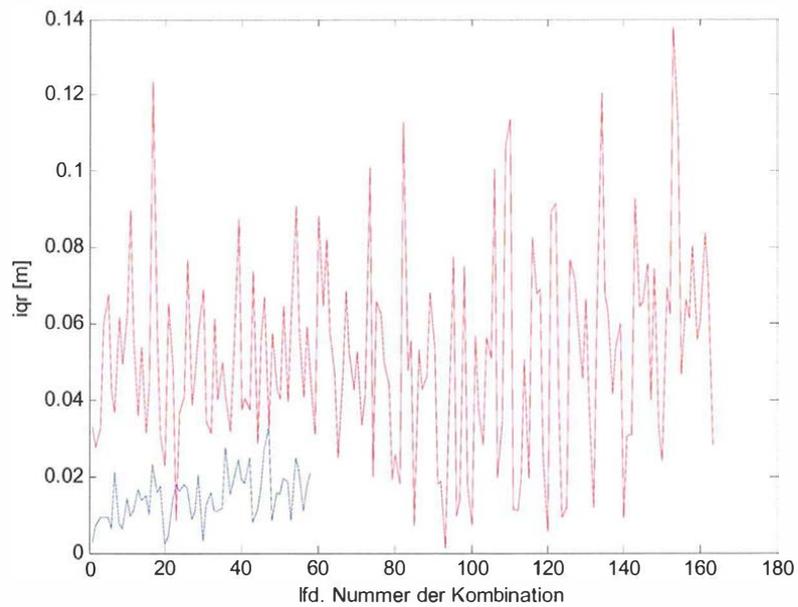


Abbildung 4.9: Interquartilsabstand der Residuen für 221 verschiedene 4-Punkt-Kombinationen des Testnetzes Delft. Korrekte Kombinationen sind in blau dargestellt, nicht korrekte in rot.

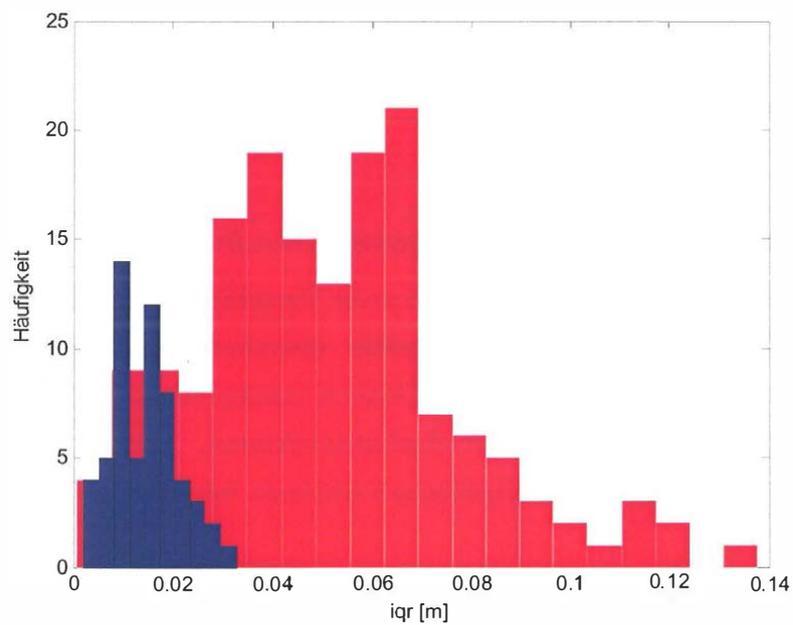


Abbildung 4.10: Histogramme für die Interquartilsabstände der korrekten Fälle (in blau) und der nicht korrekten Fälle (in rot).

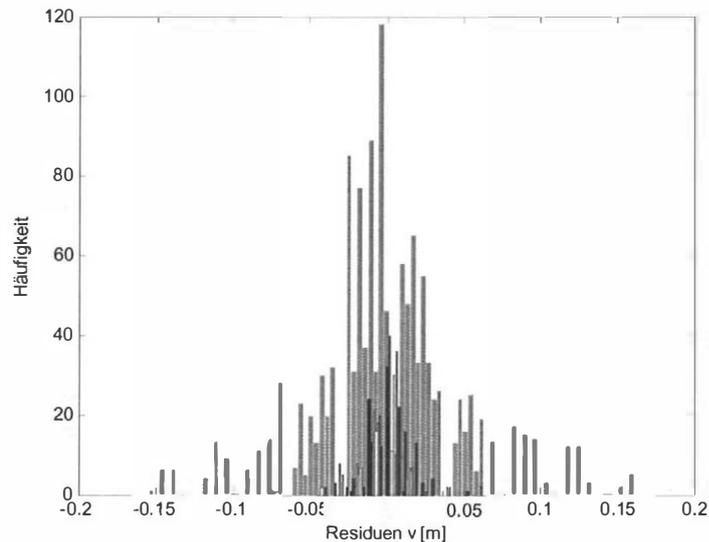


Abbildung 4.11: Histogramm der Residuen nach der Strainanalyse für 221 4-Punkt-Kombinationen. Residuen der korrekten Fälle dunkel im Vordergrund, für nicht korrekte Fälle hell im Hintergrund.

Die absoluten Werte des Interquartilsabstandes sind natürlich abhängig von der Größe der aufgetretenen Bewegungen. Um das Verfahren für ein möglichst breites Anwendungsspektrum zu entwickeln, wurde daher der normierte Interquartilsabstand verwendet. Dabei wird der Maximalwert des IQR aus allen 4-Punkt-Lösungen zur Normierung der Werte herangezogen. Dadurch ergeben sich die Zugehörigkeitsfunktionen und Regeln.

4.2.5 Ähnlichkeit der Verschiebungsvektoren in Azimut

Dem menschlichen Betrachter erscheinen zwei Verschiebungsvektoren als ähnlich, wenn sie in Richtung und Betrag ungefähr übereinstimmen. Einer der beiden Parameter, die hier das menschliche Denken nachzubilden versuchen, ist die Ähnlichkeit der Azimute der Verschiebungsvektoren, ausgedrückt durch die Differenz zweier Azimute. Diese Eigenschaft wird nun folgendermaßen verwendet:

Um herauszufinden, ob die 4 Punkte des Startblocks genähert gleiches Azimut besitzen, werden die Azimutdifferenzen zwischen den einzelnen Vektoren betrachtet. In günstigen Fällen betragen diese Differenzen nur wenige Gon, allerdings können bei der automatischen Berechnung Probleme an der Sprungstelle von -200 auf $+200$ gon auftreten, sodaß manche Situationen falsch beurteilt würden. Daher wurde dazu übergangen, den Indikatorwert für das Fuzzy System folgendermaßen neu zu berechnen:

$$\text{indikator} = \frac{\sum_{i,j=1, \dots, 4; i \neq j}^6 \cos(Az_i - Az_j)}{6} \quad \text{mit } Az_i \dots \text{Azimut des Vektors } i$$

Die einzelnen Differenzen der Azimute ($Az_i - Az_j$) werden mit der Cosinus-Funktion bewertet, dadurch wird die Periodizität berücksichtigt. Weiters hat die Cosinus-Funktion im günstigen Fall, d.h. Differenz der Azimute nahe 0 gon, ein Maximum von 1. Bei 4 untersuchten Azimuten lassen sich 6 Kombinationen durch Differenzbildung erzeugen; die 6 berechneten Cosinus-Werte werden aufsummiert und durch Division durch 6 gewichtet.

Günstige Fälle erhalten so Indikatorwerte nahe bei 1. Je weiter gestreut die Azimute sind, desto kleiner ist der berechnete Indikatorwert.

Ein Rechenbeispiel soll die Vorgehensweise erläutern:

Azimut Az_i [gon]	Differenzen	Azimutdifferenz $Az_i - Az_j$ [gon]
Az1 20	Az1-Az2	-10
Az2 30	Az1-Az3	-20
Az3 40	Az1-Az4	100
Az4 -80	Az2-Az3	-10
	Az2-Az4	110
	Az3-Az4	120

Die Indikatorfunktion liefert mittels Cosinusbildung und Aufsummieren der einzelnen Terme einen Wert von 0.4102; dieser Fall wäre also eher negativ zu beurteilen.

Zur weiteren Illustration zeigen die folgenden Graphiken einen sehr günstigen Fall (Abbildung 4.12 links) sowie einen der ungünstigsten Verteilungen der Vektoren (Abbildung 4.12 rechts).

Im Fuzzy System 1 wird dieser Indikator folgendermaßen modelliert: 4 Vektoren besitzen z.B. ein ähnliches Azimut, wenn der berechnete Indikatorwert etwa im Intervall [0.8; 1] liegt.

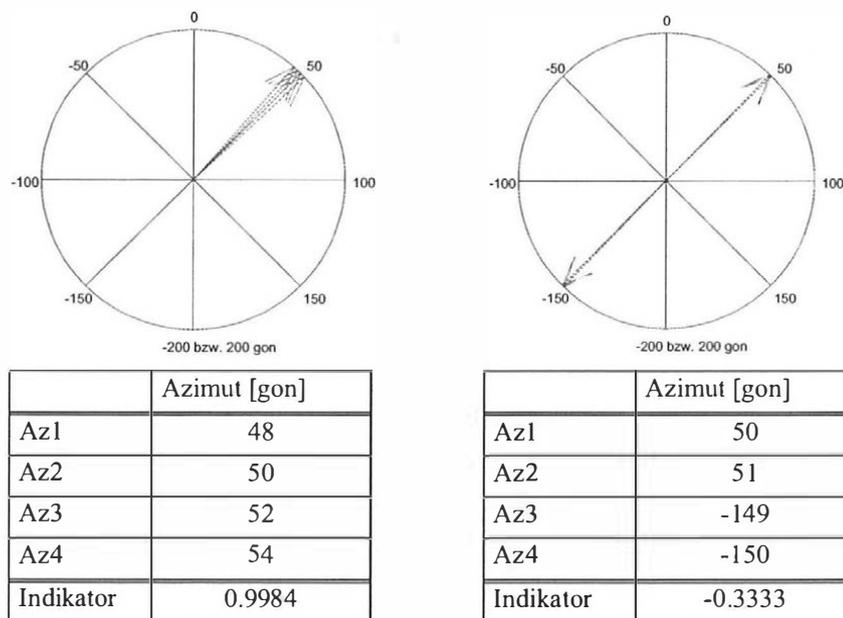


Abbildung 4.12: Indikatorberechnung für einen günstigen und einen sehr ungünstigen Fall.

4.2.6 Verhältnis der Beträge der Verschiebungsvektoren

Der nächste Parameter beurteilt die Länge der Verschiebungsvektoren. Sind die Beträge von Verschiebungsvektoren ähnlich, erkennt das menschliche Auge sie als zusammengehörig.

Für den Startblock mit 4 Punkten wird der Mittelwert und der Median der Vektorbeträge untersucht. Im Falle von 4 passenden Punkten liegen Mittelwert und Median dicht beisammen. Ist allerdings ein nicht passender Vektor verwendet worden, liefert der Mittelwert als nicht robuster Schätzer einen durch den „Ausreißer“ verzerrten Wert, der stark vom Median abweicht. Untersucht wird daher das Verhältnis $\frac{\text{Mittelwert}}{\text{Median}}$ der Vektorlänge. Weicht es stark von 1 ab, wird ein nicht passender Punkt mit zu kurzem bzw. zu langem Vektor in der Gruppe vermutet. Diese 4-Punkt-Kombination muß im Fuzzy System also als nicht passend bewertet werden.

4.2.7 Demonstration einer Auswertung durch das Fuzzy System

Anhand des ersten Fuzzy Systems sollen die in Kapitel 3.2 theoretisch besprochenen Schritte der Auswertung (Fuzzifizierung, Inferenz, Aggregation, Defuzzifizierung) explizit demonstriert werden (Abbildung 4.15).

Jede Zeile in dieser Abbildung repräsentiert eine Wenn-Dann-Regel der Regelbasis. Die gelben Bereiche stellen die EingangsvARIABLEN dar, die letzte blaue Spalte steht für die AusgangsvARIABLE.

Ein Vektor mit konkreten Eingangswerten wird zuerst fuzzifiziert, d.h. die Zugehörigkeiten zu den jeweiligen linguistischen Termen werden ermittelt (siehe Abbildung 4.13). Die Eingangswerte für dieses Beispiel lauten (Tabelle 4.1):

s_0 [m]	iqr-normiert	e_1 [ppm]	e_2 [ppm]	cos-diffAz	RatioBetrag
0.0067	0.06	0.7	5.4	0.87	0.954

Tabelle 4.1: Konkrete Eingangswerte für das besprochene Beispiel.

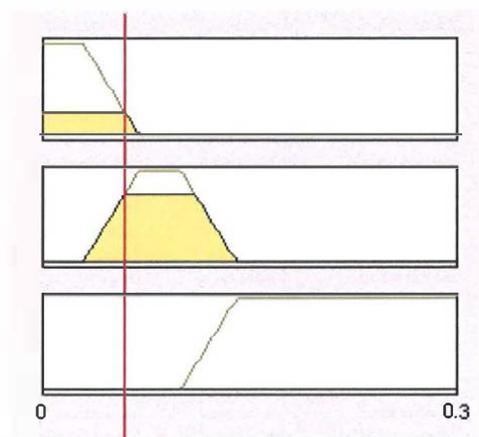


Abbildung 4.13: Detail aus Abbildung 4.15: Fuzzifizierung der Eingangsvariablen iqr-normiert für den konkreten Wert $iqr-normiert = 0.06$.

Analog Kapitel 3.2.4 wird jede Regel auf ihren Erfüllungsgrad untersucht, die Ergebnismenge (in blau) wird also – aufgrund der Verwendung des Minimum-Operators für die Abarbeitung einer Zeile – auf der Höhe der jeweiligen Zugehörigkeit (in gelb) „geköpft“, siehe Abbildung 4.14.

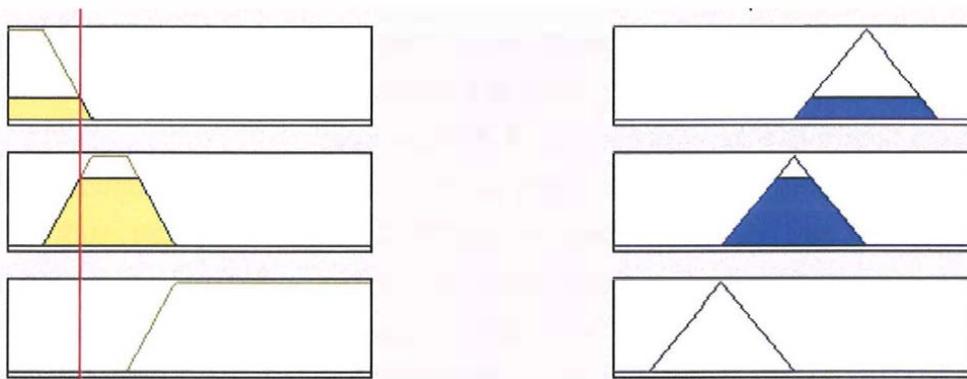


Abbildung 4.14: Detail aus Abbildung 4.15: Inferenzmechanismus für die drei Regeln der Eingangsvariablen iqr-normiert (Zeilen 4 bis 6 in Abbildung 4.15).

Die Fuzzy Sets der einzelnen Regeln (letzte Spalte in Abbildung 4.15, in blau) werden danach mittels des Maximum-Operators aggregiert (Max-Min-Strategie analog Kapitel 3.2.4). Als Ergebnis wird die Aggregationsmenge rechts unten dargestellt.

Daraufhin muß durch die Defuzzifizierung aus der Aggregationsmenge ein scharfer Ausgangswert bestimmt werden (rechts unten in Abbildung 4.15). Dies geschieht unter Verwendung der Center of Gravity-Methode (*CoG*, Kapitel 3.2.5); der Ausgangswert (hier 0.72) wird durch die rote vertikale Linie dargestellt.

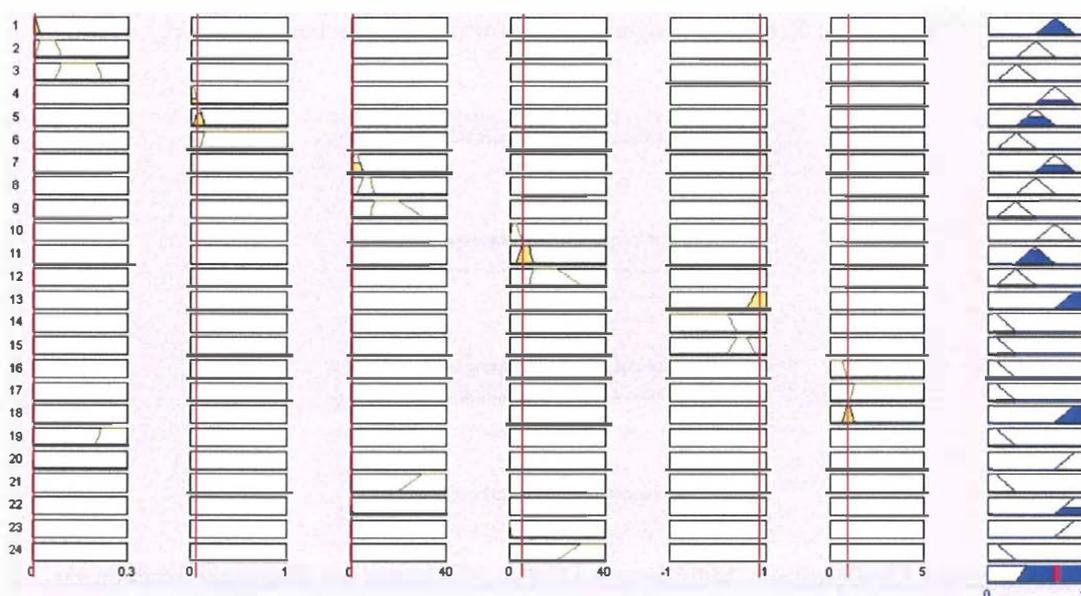


Abbildung 4.15: Inferenz, Aggregation und Defuzzifizierung in der Matlab Fuzzy Toolbox am Beispiel des ersten Fuzzy Systems.

4.3 Fuzzy System „Auswahl-Iteration“

Ist im ersten Schritt ein passender Startblock gefunden worden, wird iterativ ein Punkt nach dem anderen hinzugefügt. Aus der Nachbarschaftsmatrix werden zunächst alle Nachbarpunkte ermittelt, dann werden alle möglichen Blöcke einer Strainanalyse unterzogen, d.h. im ersten Iterationsschritt treten 5-Punkt-Blöcke auf, im zweiten Schritt Blöcke bestehend aus 6 Punkten usw.

Das zweite Fuzzy System wird benötigt, um aus all diesen Möglichkeiten in jedem Iterationsschritt den optimalen Block auszuwählen. Prinzipiell ist die Aufgabe also mit der von Fuzzy System 1 zu vergleichen. Es werden auch dieselben geodätischen Parameter untersucht (s_0 , e_1 , e_2 , iqr); diese werden daher hier nicht mehr extra aufgeführt. Die Berechnung der visuellen Parameter Azimut und Vektorlänge wurde hingegen der speziellen Aufgabenstellung angepasst. Diese sollen hier kurz erklärt werden.

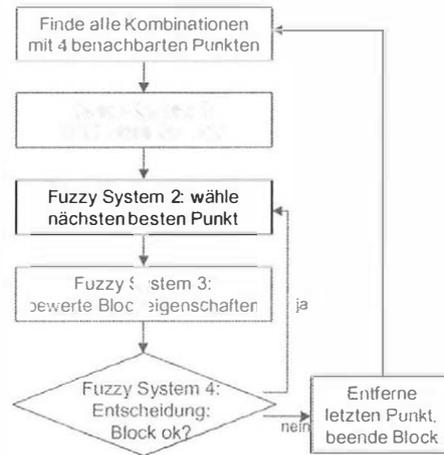


Abbildung 4.16: Positionierung des zweiten Fuzzy Systems innerhalb des Algorithmus.

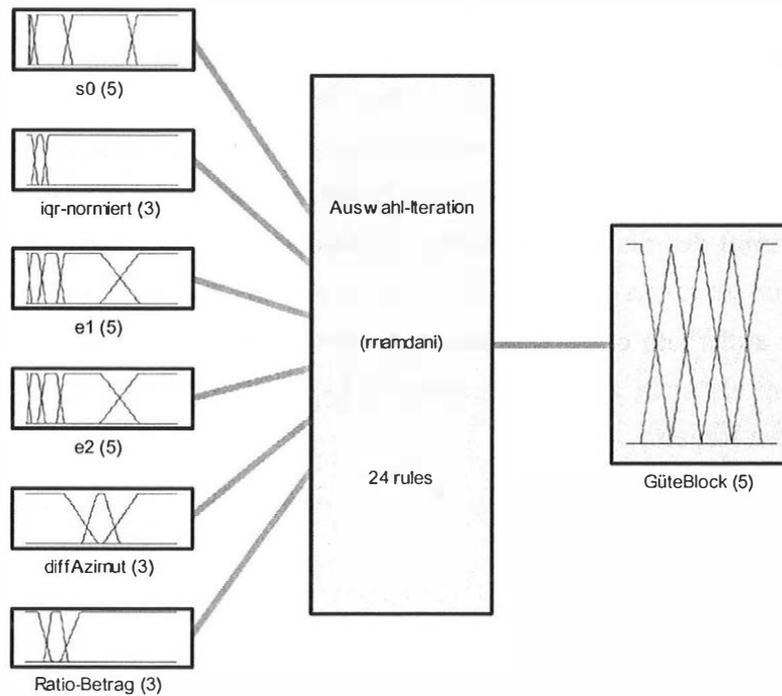


Abbildung 4.17: Struktur des zweiten Fuzzy Systems.

4.3.1 Outputvariable 'GüteBlock'

Die Ausgangsvariable entspricht wie im ersten Fuzzy System einem Qualitätsindikator für die untersuchten Blöcke. Die Modellierung dieses Outputwerts ist daher völlig analog zum vorigen Abschnitt:

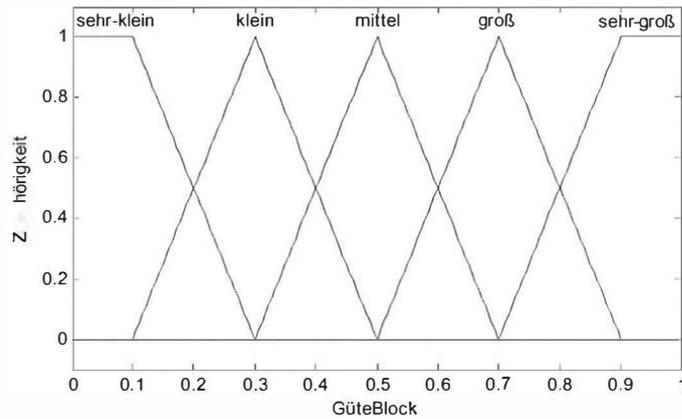


Abbildung 4.18: Beschreibung der Outputvariable, analog zu Fuzzy System 1.

4.3.2 Eingangsvariable 'Ähnlichkeit in Azimut'

Für die Suche nach dem nächsten passenden Punkt kann angenommen werden, dass die 4 gewählten Startpunkte ähnliches Azimut besitzen. Daher wird eine andere Methode als im ersten Fuzzy System verwendet, um zu überprüfen, ob das Azimut des neu zu untersuchenden Punktes zum bereits gefundenen Block passt. Das Durchschnittsazimut des bisherigen Blocks wird gebildet (Mittelwert), und mit dem Azimut des neuen zu untersuchenden Vektors verglichen. Liegt die Differenz dieser beiden Azimute außerhalb eines Bereiches von etwa ± 20 gon, wird der neue Punkt im Fuzzy System als nicht zum Block passend beurteilt (siehe Abbildung 4.19 und die dazugehörigen Regeln).

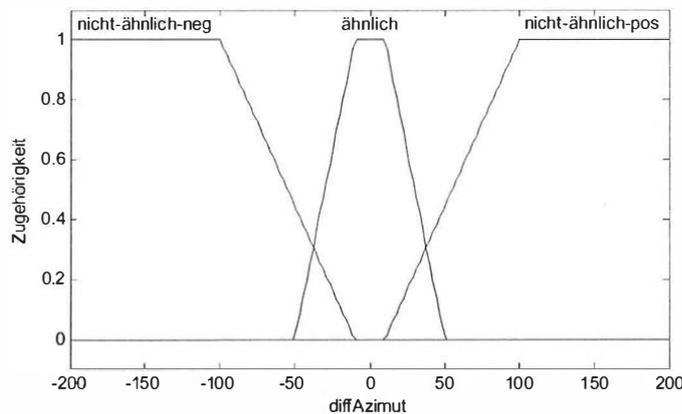


Abbildung 4.19: Modellierung der Differenz zweier Azimute.

```
IF (diffAzimut IS ähnlich) THEN (GüteBlock IS sehr-groß) (1)
IF (diffAzimut IS nicht-ähnlich-neg) THEN (GüteBlock IS sehr-klein) (1)
IF (diffAzimut IS nicht-ähnlich-pos) THEN (GüteBlock IS sehr-klein) (1)
```

Die implementierten Regeln zeigen den Einfluß dieses Parameters, denn die Terme der Eingangsgröße werden nur auf die extremen Terme der Outputgröße (sehr-groß, sehr-klein) abgebildet. Hier findet also eine starke Separation statt.

4.3.3 Beträge der Verschiebungsvektoren

Für die Bestimmung des nächsten passenden Punkts wird wieder angenommen, dass die Vektoren des Startblocks ähnliche Längen besitzen. Daher wird als Indikator das Verhältnis $\frac{\text{durchschnittlicher Betrag des Blocks}}{\text{Betrag des Neupunkts}}$ gebildet. Liegt dieser Verhältnis-

wert etwa zwischen 0.9 und 1.1, wird der Punkt akzeptiert, außerhalb dieses Bereiches wird der neue Punkt im Fuzzy System verworfen.

4.4 Fuzzy System „Bewertung“

Der im Fuzzy System „Auswahl-Iteration“ gefundene neue Punkt wird als der optimal passende unter der Vielzahl von verfügbaren Nachbarpunkten angenommen. Auch für den Fall, dass nur mehr schlecht passende Punkte vorhanden sind, wird vom Fuzzy System 2, „Auswahl-Iteration“, dennoch der beste unter diesen ausgewählt. Es muß also überprüft werden, ob dieser gefundene Punkt tatsächlich zum Bewegungsmuster des Blocks passt oder ob der Punkt wieder entfernt und der Block beendet werden soll.

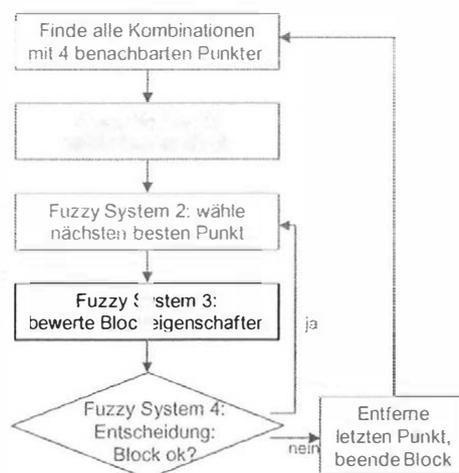


Abbildung 4.20: Position des dritten Fuzzy Systems im Algorithmus.

Dazu werden die *Änderungen* der vorhin beschriebenen Basisparameter (s_0, e_1, e_2, \dots) betrachtet. Dahinter steckt die Überlegung, dass sich bei Hinzunahme eines gut passenden Punktes die Parameter nicht stark ändern, d.h. dass das Verhältnis der

Werte zwischen Iterationsschritt $i-1$ und i ungefähr 1 ist. Paßt das Bewegungsmuster des zuletzt hinzugenommenen Punktes nicht zu dem des Blocks, ändern sich die Parameter wie e_1 , e_2 , s_0 , und das Verhältnis dieser Werte zwischen den einzelnen Iterationen weicht stark von 1 ab.

Abbildung 4.21 zeigt den Überblick über das System; die verwendeten Eingangs- und Ausgangsvariablen werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

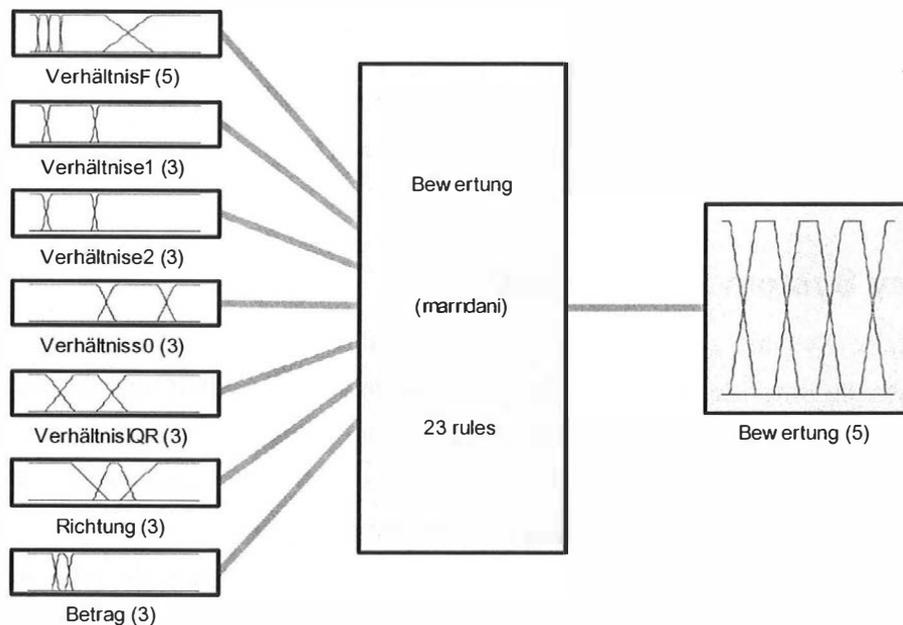


Abbildung 4.21: Struktur des dritten Fuzzy Systems.

4.4.1 Ausgangsvariable 'Bewertung'

Wiederum soll zuerst die Ausgangsvariable behandelt werden, damit die logischen Regeln der nächsten Abschnitte verständlich werden.

Die Ausgangsvariable Bewertung liegt im Wertebereich $[0,1]$ und kann als Qualitätsindikator für die Entwicklung des untersuchten Blocks interpretiert werden. Je höher der berechnete Wert aus dem Fuzzy System, desto schlechter die Bewertung und desto eher sollte der aktuelle Block beendet werden.

Die Variable wird zur feineren Unterscheidung in 5 linguistische Terme eingeteilt (siehe Abbildung 4.22):

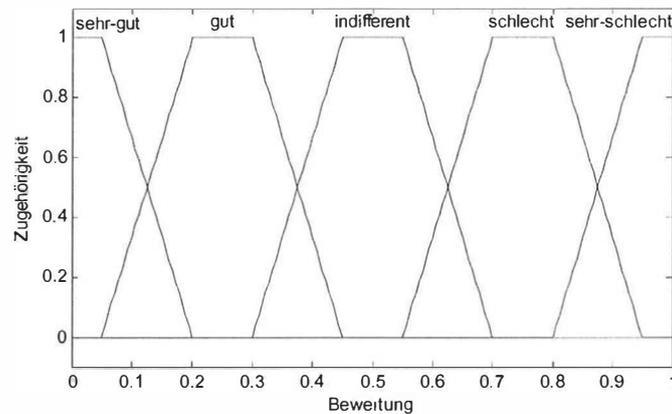


Abbildung 4.22: Ausgangsvariable 'Bewertung'.

4.4.2 Eingangsvariable 'Verhältnis-s0'

In den ersten beiden Fuzzy Systemen wurde der Qualitätsindikator s_0 als wichtige Eingangsgröße für die Analyse der Verschiebungen angeführt. Hier im dritten System zur Bewertung der Entwicklung des Blocks muß also das Verhältnis der beiden s_0 -Werte während der letzten Iterationsschritte ($i-1$) und i untersucht werden:

Verhältnis- $s_0 = \frac{s_{0,i-1}}{s_{0,i}}$. Ist s_0 im letzten Schritt plötzlich stark angestiegen, ergibt sich

ein Indikatorwert deutlich kleiner als 1; Werte im Bereich von 1 bzw. größer als 1 sind ungefährlich, da dabei s_0 im letzten Schritt stabil geblieben bzw. gesunken sein muß. Bei größeren Punktmengen ist allerdings ein Korrekturwert für den gewünschten Parameter anzusetzen.

Der Parameter s_0 beruht, wie bereits ausgeführt, auf der Idee, dass ein falsch hinzugenommener Punkt die Güte eines ansonsten korrekten Blockes stört, was sich, bedingt durch die Berechnung von s_0 aus der Verbesserungsquadratsumme $\sum v^T P v$, in einem Anstieg von s_0 äußert. Weiters ist bekannt, dass $v^T P v$ zur Berechnung von s_0 mit der Anzahl der Freiheitsgrade gewichtet wird:

$$s_0 = \sqrt{\frac{\sum v^T P v}{n - u}}$$

mit n ...Anzahl der Beobachtungen

u ...Anzahl der Unbekannten

$f = n - u$...Freiheitsgrade

Der Einfluß eines falschen Punktes auf einen Block mit wenigen Punkten (z.B. 5) und somit auf s_0 ist deutlich größer als der Einfluß desselben falschen Punktes auf

einen Block mit vielen (z.B. 50) Punkten. Das führt dazu, dass der Parameter Verhältnis- s_0 sehr schnell zu 1 konvergiert, wodurch jede Information verloren geht.

Ziel ist es also, einen Korrekturfaktor neu zu entwickeln, der diese Eigenschaft berücksichtigt. Die Annahme dabei ist, dass es möglich sein soll, wie bei kleiner Punkteanzahl ein Verhältnis der letzten beiden s_0 -Werte von z.B. 0.8 bzw. allgemein

einer Schranke S detektieren zu können: $\frac{s_{0,i-1}}{s_{0,i}} = 0.8 = S$.

Zur Ableitung sei ohne Beschränkung der Allgemeinheit angenommen, dass jeder korrekte Punkt denselben konstanten Beitrag $v^T P v$ liefert; dieser Beitrag wird im folgenden zu 1 angenommen. Der nächste (falsche) Punkt erzeugt einen Zuschlag von dv zur Verbesserungsquadratsumme, also:

$$\frac{s_{0,i-1}}{s_{0,i}} = \frac{\sqrt{\frac{n \cdot v^T P v}{n-u}}}{\sqrt{\frac{n \cdot v^T P v + dv}{n+2-u}}} = S, \text{ da jeder Punkt zwei neue Beobachtungen liefert.}$$

Auflösen nach dv zeigt, dass der Zuschlag von der Anzahl n der Beobachtungen abhängt. dv gibt an, wie groß der Zuschlag eines neuen Punktes sein muß, um die Schranke S auszulösen (siehe auch Abbildung 4.23):

$$dv = \frac{n \cdot (n+2-u)}{S^2(n-u)} - n$$

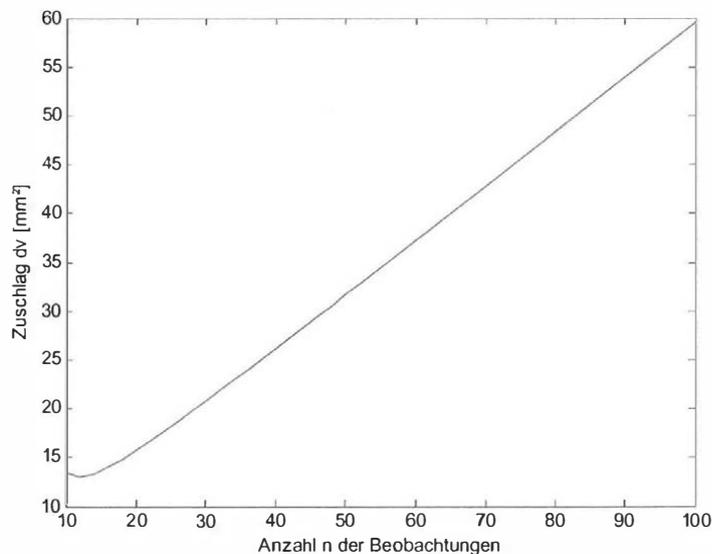


Abbildung 4.23: Notwendige Größe des Zuschlags dv , um bei einer Schranke $S=0.8$ detektiert werden zu können.

Analog zu anderen Parametern (siehe nächste Abschnitte) soll die Abweichung von Verhältnis- s_0 von 1 beurteilt werden. Der Korrekturfaktor von Punkt i auf Punkt $i+1$ ist also folgendermaßen neu anzusetzen:

$$1 - \frac{s_{0,i-1}}{s_{0,i}} = k \cdot \left(1 - \frac{s_{0,i}}{s_{0,i+1}}\right)$$

mit i ... verwendete Punktzahl

n ... Anzahl der Beobachtungen, jeder Punkt liefert 2 Beobachtungen

$n - u$... Freiheitsgrade

$$k = \frac{1 - \frac{\sqrt{n} \cdot \sqrt{n+2-u}}{\sqrt{n-u} \cdot \sqrt{n+2}}}{1 - \frac{\sqrt{n+2} \cdot \sqrt{n+4-u}}{\sqrt{n+2-u} \cdot \sqrt{n+4}}}$$

Die (üblicherweise kleine) Abweichung von Verhältnis- s_0 von 1 wird mit dem Korrekturfaktor k erweitert, um die Abweichungen vergleichen zu können.

Wir definieren also neu:

$$\text{Verhältnis-}s_0 = \left(1 - \frac{s_{0,i}}{s_{0,i+1}}\right) \cdot k$$

Praktisch bedeutet das folgendes: liegt das Verhältnis der s_0 -Werte ursprünglich unter 1, ist s_0 im letzten Schritt angestiegen, und ein falscher Punkt muß vermutet werden. Nach der Korrektur wird der Wert umso größer, je kleiner das Verhältnis vorher war. Große Verhältnis- s_0 -Werte gelten also als gefährlich. War der Wert vor der Korrektur größer als 1, also ungefährlich, da s_0 im letzten Iterationsschritt kleiner geworden ist, bedeutet das einen negativen Wert nach der Korrektur. Werte bis etwa 5 haben sich als im normalen Bereich erwiesen, bei korrigierten Verhältnis- s_0 -Werten größer 5 sollte abgebrochen werden.

4.4.3 Eingangsvariablen 'Verhältnis-e1' und 'Verhältnis-e2'

Das Verhältnis der Halbachsenbeträge e_1 und e_2 der Verzerrungsellipse zwischen dem vorangegangenen und dem aktuellen Iterationsschritt wird untersucht. Liegt der Wert nahe bei 1, ist die jeweilige Halbachse im letzten Schritt etwa gleich groß geblieben; ist der Wert sehr viel kleiner als 1, bedeutet das, dass der Strainparameter stark zugenommen und der Verzerrungszustand sich somit stark verändert hat. Es ist also zu vermuten, dass der neu hinzugenommene Punkt nicht zum untersuchten Block passt und verworfen werden sollte.

4.4.4 EingangsvARIABLE 'Verhältnis-iqr'

Auch bei dieser Variablen gilt, dass das Verhältnis zweier in den Iterationen aufeinanderfolgender Werte einen Einblick in die Entwicklung des Blocks gibt. Es ist unmittelbar einleuchtend, dass die Bewertung umso schlechter ausfällt, je kleiner das Verhältnis dieser Werte ist. Um den Wert 1 ist die Situation unverändert, ist 'Verhältnis-iqr' hingegen groß, ist die Qualität des Blocks durch die Hinzunahme des letzten Punktes sogar besser geworden.

4.4.5 EingangsvARIABLE 'Verhältnis-F'

Diese Variable ist einer Methode der statistischen Deformationsanalyse entnommen. Es soll statistisch untersucht werden, ob sich die Güteindikatoren s_0 zweier aufeinanderfolgender Iterationsschritte signifikant unterscheiden. In diesem Fall wäre auf eine deutliche Verschlechterung der Situation zu schließen, was einen Abbruch des Blocks zur Folge hätte.

Die Nullhypothese beschreibt also die Identität beider Varianzen:

$$H_0: E\{s_{0,1}^2\} = E\{s_{0,2}^2\}.$$

Die Testgröße lautet: $T_F = \frac{s_{0,1}^2}{s_{0,2}^2}$, wobei darauf zu achten ist, dass $s_{0,1}^2 > s_{0,2}^2$ ist.

Gegebenenfalls müssen Zähler und Nenner vertauscht werden. Die zugehörigen Freiheitsgrade sollen f_1 und f_2 sein.

Die Testgröße kann gegen das Fisher-Quantil $F_{f_1, f_2, 1-\alpha}$ getestet werden. Ist $T_F > F_{f_1, f_2, 1-\alpha}$, muß die Nullhypothese verworfen werden.

Um diesen Test in einem Fuzzy System auswerten zu können, wird der Quotient

Verhältnis-F = $\frac{T_F}{F_{f_1, f_2, 1-\alpha}}$ gebildet. Ein klassischer statistischer Test würde die

Hypothese akzeptieren, wenn der Quotient Verhältnis-F < 1 ist; übersteigt er diese scharfe Grenze, wird die Nullhypothese abgelehnt und die beiden Werte von s_0 gelten als nicht identisch. Hier wird bei der Nachbildung dieses Tests statt der scharfen Grenze ein weicher Übergang definiert. Das bedeutet, dass ein Abbruch in Frage kommt, wenn die Variable 'Verhältnis-F' groß bzw. sehr groß wird.

4.4.6 Ähnlichkeit der Richtungen

Analog der Vorgehensweise in den Systemen 1 und 2 wird untersucht, ob das Azimut des zuletzt hinzugenommenen Punktes ähnlich dem Durchschnittsazimut des

bisherigen Blockes ist. Hier wird also die Analyse aus dem System 2, „Auswahl Iteration“ übernommen; sowohl die Zuordnung der Wertebereiche zu den linguistischen Termen als auch die Regeln sind ident.

4.4.7 Ähnlichkeit der Beträge

Auch hier wird die Struktur des vorigen Systems übernommen. Ist der Vektor des neuen Punktes zu groß bzw. zu klein, weicht das Verhältnis der durchschnittlichen Vektorlänge zum Betrag des neuen Punktes von 1 ab. Diese Eigenschaft wird durch drei Terme und die dazugehörigen Regeln beschrieben.

4.5 Fuzzy System „Abbruch“

Das letzte Fuzzy System im Ablauf des Algorithmus trifft die endgültige Entscheidung, ob der untersuchte Punkt beim aktuellen Block verbleiben oder ob der Block beendet werden soll. Dazu wird die Bewertung der Situation aus System 3 sowie die Änderung dieses Wertes im Vergleich zum vorigen Iterationsschritt untersucht. Denn wieder enthält die Änderung der Bewertung mehr Informationen als der absolute Wert alleine.

Die Struktur dieses einfachsten Fuzzy Systems zeigt Abbildung 4.25.

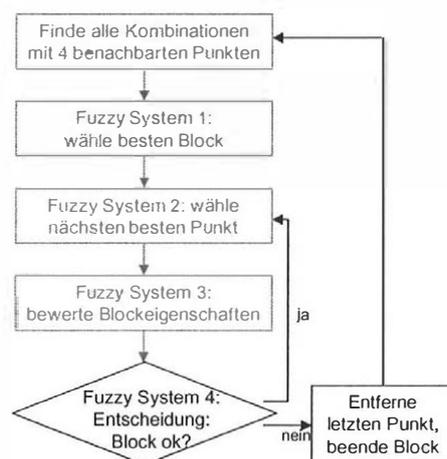


Abbildung 4.24: Position des letzten Fuzzy Systems im Algorithmus.

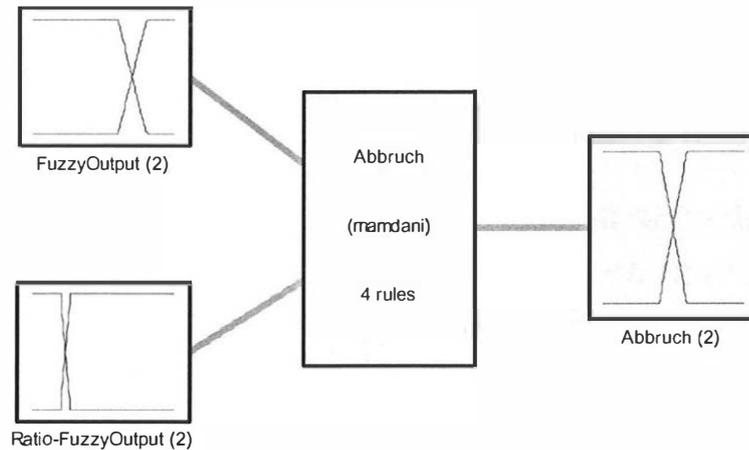


Abbildung 4.25: Struktur des vierten Fuzzy Systems.

4.5.1 Outputvariable 'Abbruch'

Der Ausgangswert 'Abbruch' entspricht einer ja/nein-Entscheidung, ob der Block beendet werden soll. Der Wertebereich umfaßt $[0, 1]$, und wie beim menschlichen Denken ist die Grenze zwischen ja und nein bei 0.5 zu finden.

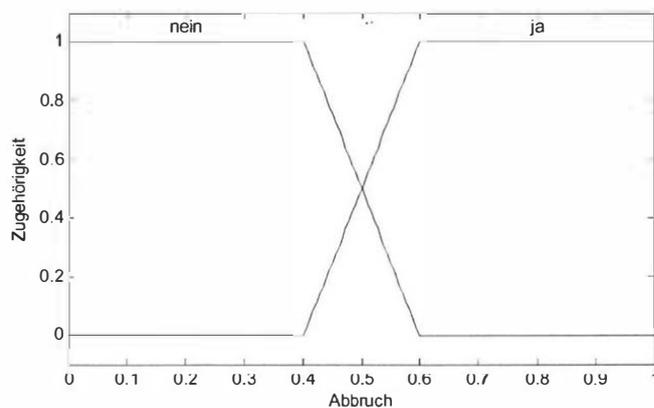


Abbildung 4.26: Ausgangsvariable Abbruch.

4.5.2 Eingangsvariable 'Bewertung'

Diese Eingangsvariable entspricht der Bewertung des dritten Fuzzy Systems aus dem aktuellen Iterationsschritt. Je höher dieser Wert ist, desto eher soll der Block abgebrochen werden.

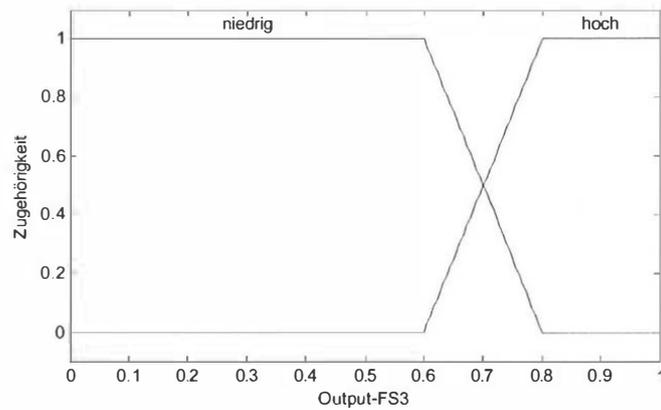


Abbildung 4.27: Modellierung des Outputs des dritten Fuzzy Systems 'Bewertung'.

4.5.3 Eingangsvariable 'Änderung der Bewertung'

Die Abbruchsentscheidung kann jedoch nur in Kombination mit der Änderung des Bewertungswertes getroffen werden. Abbildung 4.28 und die darauf folgenden Inferenzregeln zeigen, dass ein Abbruch umso gerechtfertigter ist, je höher die Bewertung und je kleiner das Verhältnis $\frac{Bewertung_{i-1}}{Bewertung_i}$ der letzten beiden

Iterationsschritte (i-1) und i ist. Wird die Bewertung im Gegensatz zur letzten Iteration größer, sollte unbedingt ein Abbruch erfolgen (Regel 1 und 3).

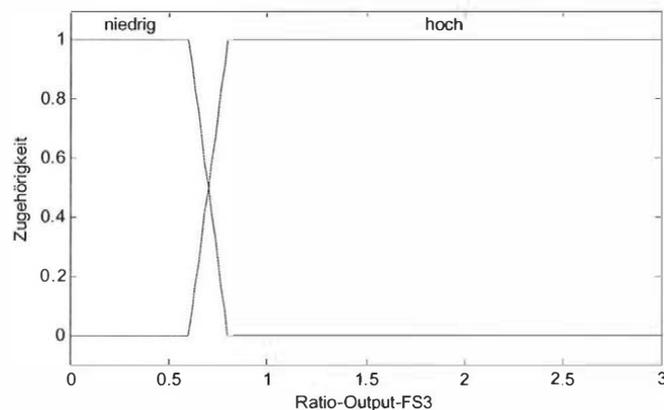


Abbildung 4.28: Beschreibung der Änderung der Ergebnisse des dritten Fuzzy Systems.

```
IF (Output-FS3 IS hoch) AND (Ratio-Output-FS3 IS niedrig) THEN (Abbruch IS ja) (1)
IF (Output-FS3 IS niedrig) AND (Ratio-Output-FS3 IS hoch) THEN (Abbruch IS nein) (1)
IF (Output-FS3 IS niedrig) AND (Ratio-Output-FS3 IS niedrig) THEN (Abbruch IS ja) (0.5)
IF (Output-FS3 IS hoch) AND (Ratio-Output-FS3 IS hoch) THEN (Abbruch IS ja) (0.5)
```

Nach der Defuzzifizierung liegt ein scharfer Ausgangswert vor, der über den Abbruch dieses Iterationsschrittes und somit des gesuchten Blocks entscheidet. An

dieser Stelle muß eine scharfe Grenze gezogen werden; ist die Entscheidung 'ja', d.h. ist der Ausgangswert > 0.5 , wird der Block beendet.

4.5.4 Demonstration der Auswertung durch das Fuzzy System

Analog dem ersten Fuzzy System soll auch hier die Auswertung konkreter Eingangswerte exemplarisch demonstriert werden (Abbildung 4.29):

Das Fuzzy System „Abbruch“ enthält zwei Eingangsvariablen, dargestellt durch die ersten beiden Spalten. Die soeben besprochene Regelbasis bestehend aus vier Regeln wird durch die vier Zeilen repräsentiert. Für die konkreten Eingangswerte $FuzzyOutput=0.81$ und $Ratio-FuzzyOutput=0.62$ ergibt sich folgendes Bild (Abbildung 4.29):

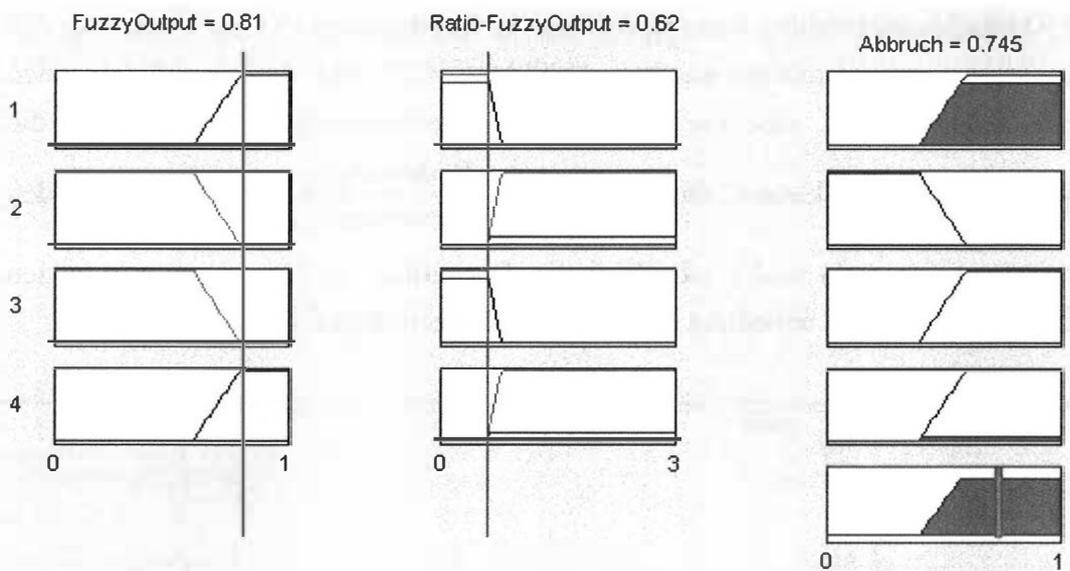


Abbildung 4.29: Beispiel einer Auswertung für das vierte Fuzzy System.

Die Zugehörigkeit der Eingangswerte zu den einzelnen Termen ist hell angegeben (Fuzzifizierung). Da die beiden Eingangsvariablen in den Regeln mit einem logischen UND verknüpft sind (siehe Kapitel 4.5.3), kann eine Regel nur soweit als erfüllt gelten wie das Minimum der Zugehörigkeiten der beiden Eingangswerte (Max-Min-Inferenz lt. Kapitel 3.4.2). In Abbildung 4.29 ist deshalb die dunkle Ergebnismenge (rechts in jeder Zeile) auf der Höhe des Minimums der beiden zugehörigen hellen Mengen „geköpft“.

Der Schritt der Aggregation fasst alle Ergebnismengen der einzelnen Regeln bzw. Zeilen zusammen; der defuzzifizierte Ausgangswert dieser Aggregationsmenge (0.745, rechts unten in Abbildung 4.29) ist wieder durch die vertikale Linie dargestellt.

4.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die implementierten Fuzzy Systeme vorgestellt, die es ermöglichen, die Vorteile der geodätisch „exakten“ Berechnungen mit der Unschärfe des menschlichen Denkens zu verbinden, um so Punkte mit ähnlichem Bewegungsmuster automatisch zu gruppieren.

Einige Anmerkungen sind an dieser Stelle notwendig:

1. Da für den Algorithmus aufgrund der physikalischen Komplexität kein geschlossenes Formelwerk gefunden werden kann, bieten sich Fuzzy Methoden für die Steuerung des Ablaufs an. Die Wertebereiche der einzelnen Terme und die verwendeten Regeln sind daher Erfahrungswerte und können meist nicht theoretisch begründet werden. Da die Fuzzy Methoden eine recht robuste Theorie darstellen, bleiben kleine Änderungen in den Zugehörigkeitsfunktionen oder den Regeln meist ohne größere Wirkung.

2. Einer der Vorteile ist, dass mehrere Parameter und ihre Einflüsse gleichzeitig verarbeitet werden können. Erst die Kombination mehrerer Parameter kann eine genauere und zuverlässigere Einteilung und Untersuchung bewirken. Ein Parameter allein könnte diese Aufgabe nicht lösen. Es kann z.B. vorkommen, dass eine Punktkombination mit sehr kleinem s_0 bewertet wird, der menschliche Betrachter aber würde diese Situation klar verwerfen, weil das Bewegungsmuster nicht übereinstimmt, siehe z.B. Abbildung 4.30.

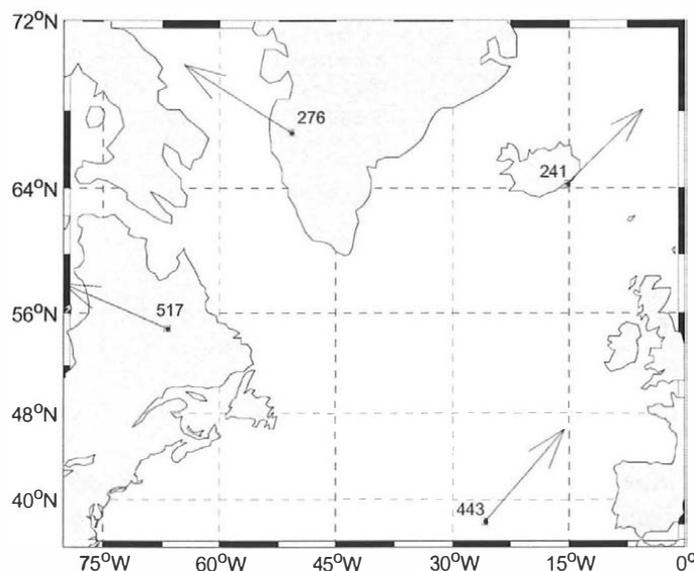


Abbildung 4.30: Vier Verschiebungsvektoren mit verschiedenem Bewegungsmuster, die mittels einer Affintransformation gut aufeinander abgebildet werden können.

Zu erklären ist diese Situation durch die Eigenschaften der Affintransformation. In den Abbildungen Abbildung 4.31 und Abbildung 4.32 sind zwei Objekte bestehend aus 4 Punkten dargestellt (Rechteck), die mittels einer schrägen Parallelprojektion abgebildet werden. Das linke Objekt (in blau) wird durch die Schnittgerade g (in rot) der Ebenen π und π' geschnitten, das rechte Objekt (in grün) liegt vollkommen auf einer Seite der Schnittgeraden g . Abbildung 4.31 zeigt eine räumliche Ansicht der Situation, in Abbildung 4.32 sind die Verschiebungsvektoren dargestellt, die bedingt durch die aus dem Ausgleich bestimmte Affintransformation entstehen. Deutlich ist zu erkennen, dass das linke Objekt, das durch die Gerade g geschnitten wird, Vektoren aufweist, die voneinander wegweisen, während das rechte Objekt gleichgerichtete Vektoren erhält. Beide Gruppen von Verschiebungsvektoren sind jedoch aus derselben Affintransformation entstanden. Dies ist ein Grund, warum die geodätischen Parameter wie s_0 sowie die Halbachsen der Strainellipse e_1 und e_2 alleine nicht als Indikatoren für die Bewertung des Bewegungsmusters ausreichen.

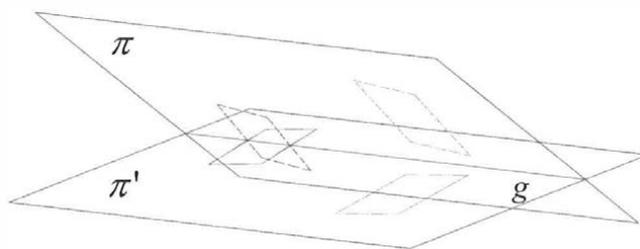


Abbildung 4.31: Schrägansicht einer affinen Abbildung. 2 Objekte werden von π auf π' abgebildet.

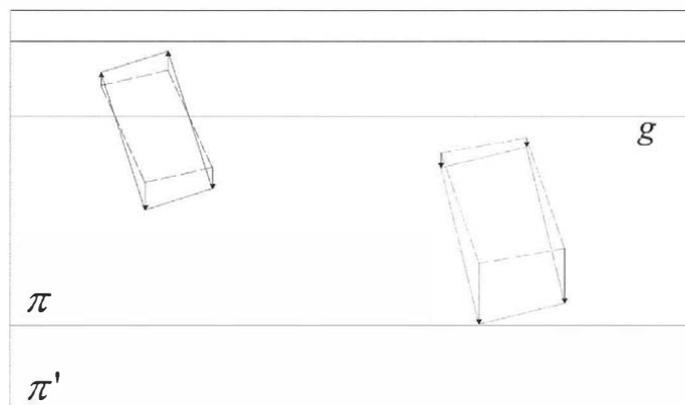


Abbildung 4.32: Grundriß der Situation aus Abbildung 4.31. Aus der Affintransformation ergeben sich zwei Gruppen von Verschiebungsvektoren.

3. Das folgende Kapitel 5 zeigt drei Beispiele für die Anwendung der Fuzzy Systeme. Das Anwendungsspektrum reicht von lokalen Hangrutschungsdaten über regionale Verwerfungszonen bis zur globalen Plattentektonik.

Dazu ist anzumerken, dass für das globale Beispiel die Fuzzy Systeme ein wenig modifiziert werden mussten. Konkret wurden die Wertebereiche der Parameter e_1 und e_2 geändert, denn die Strainparameter und somit die Halbachsen der Verzerrungsellipse hängen von der Größe des untersuchten Gebiets sowie der Bewegung ab. Für lokale Anwendungen liegen die Werte von e_1 und e_2 üblicherweise bei wenigen ppm (siehe auch die Beschreibungen von e_1 und e_2 in den vorigen Abschnitten); für das globale Beispiel sind die Werte bis zu einem Faktor 10 kleiner, da die Bewegung im Verhältnis zur Ausdehnung des Netzes kleiner ist. Dem muß natürlich in den Fuzzy Systemen 1 und 2 Rechnung getragen werden, indem die Wertebereiche der Zugehörigkeitsfunktionen entsprechend geändert wurden, um sinnvolle Ergebnisse zu erzeugen.

5 Anwendungsbeispiele

Es werden drei Beispiele für die Anwendung des Algorithmus zur Blockdetektion gegeben: Kapitel 5.1 zeigt ein regionales Netz zur Überwachung einer tektonischen Verwerfungszone, danach folgt ein lokales Beispiel einer Hangrutschung, und den Abschluß bildet das globale Beispiel der Plattentektonik.

5.1 Testnetz Delft

5.1.1 Datenmaterial

Für das „Seminar Deformationsanalysen '83“ (WELSCH, 1983) wurden simulierte Messdaten (Richtungen und Strecken) in mehreren Epochen vorab veröffentlicht; alle Beiträge des Seminars behandeln diese Testdaten mit den Methoden der jeweiligen Schule. So wird versucht, durch verschiedene Methoden der Deformationsanalyse die Verschiebung der Punkte aufzudecken. In einigen Fällen wird auch die Blockbewegung untersucht. Dabei werden allerdings vom Auswerter vermutete Blöcke vorgegeben und ihre statistische Signifikanz untersucht. Wird der statistische Test zurückgewiesen, muß eine andere Blockeinteilung untersucht werden. Diese Standard-Vorgehensweise hat den großen Nachteil, dass sie nicht automatisiert ist.

Als einführendes Beispiel werden hier die Epochen '1' und '3b' der veröffentlichten Daten untersucht. Die Messdaten (Richtungen und Distanzen) wurden einer zweistufigen Deformationsanalyse mit dem Programm PANDA (PANDA, 2000) unterzogen, um die Verschiebungsvektoren zu erhalten. Dabei wurden die 9 Punkte des westlichen Blocks als Stützpunkte erkannt und somit als datumsgebende Punkte verwendet. Die 5 Punkte des östlichen Bereiches (3, 5, 11, 39, 41) wurden als verschobene Einzelpunkte markiert. Das Ergebnis kann folgendermaßen graphisch dargestellt werden (Abbildung 5.1):

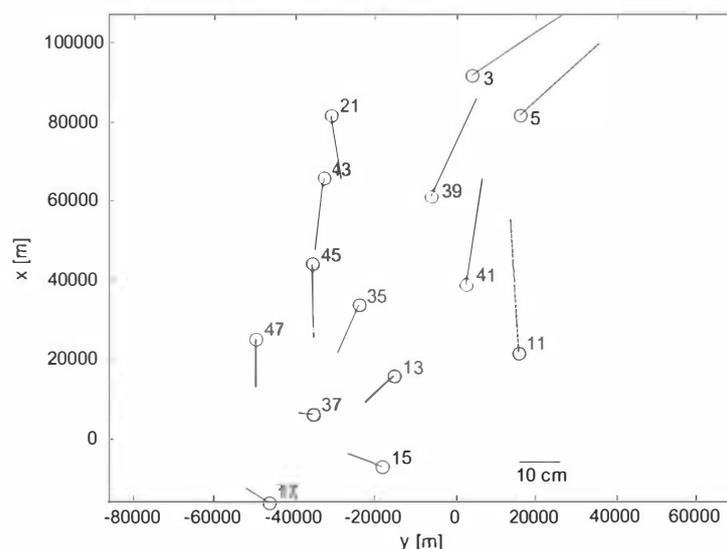


Abbildung 5.1: Verschiebungsvektoren für das Testnetz Delft.

5.1.2 Auswertung

Die soeben erhaltenen Verschiebungsvektoren dienen als Eingangsparameter für den Algorithmus zur Blockdetektion. Für das menschliche Auge ist sofort erkennbar, dass es sich hier offenbar um zwei Blöcke handelt, die durch eine Verwerfungszone getrennt sind. Auch in der ursprünglichen Literatur sind diese zwei Blöcke als Ziel der Auswertungen angegeben. Allerdings stimmt das Bewegungsmuster der Punkte 15, 17 und 37 nicht gut mit dem des westlichen Blocks überein; eventuell könnte hier ein dritter Block gebildet werden.

Anmerkung: Die Schritte der Auswertung sollen für dieses kleine Beispiel genauer erklärt werden; für die beiden anderen Anwendungsfälle ist dies nicht mehr möglich. Dort werden nur die wichtigsten Entscheidungen und Ergebnisse aufgezeigt.

Nach Start des Algorithmus werden die beiden „besten“ Möglichkeiten im Protokoll ausgegeben:

```

Kombination 1 aus Fuzzy System 1:
Punkte
  3      5      11      39
s0[mm] iqr  e1[ppm]  e2[ppm]  cosdiffAzimut  ratioBetrag  output (FS)
2.67   0.02   1.018    3.306    0.80           1.048        0.7932

Kombination 2 aus Fuzzy System 1:
Punkte
  13     35     43     47
s0[mm] iqr  e1[ppm]  e2[ppm]  cosdiffAzimut  ratioBetrag  output (FS)
6.26   0.03   1.308    2.641    0.87           1.051        0.7678

Kombination 1 oder 2 wählen oder selbst 4 Punkte eingeben? (1/2/3) [1]:1

```

Der Anwender hat die Möglichkeit, eine der beiden Kombinationen als Startblock zu verwenden oder selbst vier Punktnummern einzugeben, die den ersten Block bilden sollen. In diesem Fall wird die erste Kombination mit den Punkten 3, 5, 11 und 39 gewählt.

Danach werden im Fuzzy System 2 („Auswahl-Iteration“) alle benachbarten Punkte bewertet. Das Protokoll bietet einen vollständigen Überblick über die Indikatorwerte aller möglichen Punkte. Der in diesem Fall am besten passende Punkt, 41, mit einem Outputwert von 0.68 ist fett gedruckt. Man beachte, dass alle weiteren Punkte weit niedrigere Bewertungen um 0.30 besitzen. Das resultiert aus der Fülle der einzelnen Indikatoren, wie z.B. dass der Qualitätsindikator s_0 bei Punkt 41 um einen Faktor 7-8 kleiner ist als bei allen übrigen Punkten. Auch die Halbachsen der Verzerrungsellipse e_1 und e_2 sind bedeutend kleiner als bei den anderen Punkten. Weiters liegt bei der Untersuchung der Ähnlichkeit der Richtung und des Betrags der Vektoren nur Punkt 41 in einem für die Blockbildung sinnvollen Bereich.

Input und Output von Auswahl-Iteration.fis:

Punkt	s0[mm]	iqr	e1[ppm]	e2[ppm]	DiffAz[gon]	RatioBetrag	OutputFS2
13	0.1066	0.2704	6.1470	5.6281	183.2943	2.9180	0.2960
15	0.0821	0.4531	4.1647	5.1051	111.8747	3.1336	0.3398
21	0.0854	1.0000	6.7685	5.5888	-155.8161	-1.7308	0.3119
35	0.1001	0.4434	6.7463	6.0442	-192.1596	2.1955	0.2960
41	0.0128	0.0720	1.1289	3.2938	24.7003	1.0611	0.6772
43	0.0906	0.7074	7.0828	5.8628	-171.9686	1.5917	0.3050
45	0.0900	0.2620	6.0752	6.3929	-164.7560	1.5572	0.3069

Als nächster Schritt muß in den Systemen 3 und 4, („Bewertung“ und „Abbruch“), bestätigt werden, ob Punkt 41 wirklich auf Block 1 liegt. Der nächste Protokollauszug zeigt, dass „Bewertung“ einen Wert von 0.51 liefert; je niedriger der Wert, desto eher gehört der Punkt zum untersuchten Block. 0.51 ist ein Wert im normalen Bereich, und auch „Abbruch“ liefert, dass Punkt 41 zum Block hinzugenommen werden soll, da der Wert von 0.25 klar im Akzeptanzbereich liegt.

Output von Bewertung.fis: 0.5101

Input und Output von Entscheidung.fis:

Output FS3 letzter Schritt	Output FS3 aktueller Schritt	Ratio
0.5000	0.5101	0.9802

Output: **0.2508**

Der nächste Iterationsschritt von Fuzzy System 2 liefert folgende Kandidaten als mögliche Punkte des Blocks:

```

Input und Output von Auswahl-Iteration.fis:
Punkt  s0[mm]    iqr    el[ppm]  e2[ppm]  DiffAz[gon]  RatioBetrag  OutputFS2
 13    0.0944    0.4833    6.1037    5.8493    178.3542    2.8844    0.2960
 15   0.0723   0.6691   4.1898   5.2748   106.9347   3.0975   0.3522
 21    0.0713    1.0000    6.5329    5.6343   -160.7562    1.7108    0.3332
 35    0.0869    0.4711    6.7088    6.3008   -197.0996    2.1702    0.3055
 43    0.0764    0.9431    6.9135    5.9791   -176.9086    1.5734    0.3352
 45    0.0767    0.4547    6.0166    6.6193   -169.6960    1.5393    0.3368
    
```

Punkt 15 wird als bestmöglicher Punkt des Blocks ausgewählt, Fuzzy System 3 liefert allerdings einen Outputwert von 0.82, d.h. dass es eher unwahrscheinlich ist, dass Punkt 15 zum Block gehört. Die letzte Entscheidung liegt bei Fuzzy System 4, wo aus der starken Änderung der Outputwerte von FS 3 der letzten beiden Iterationsschritte (von 0.51 auf 0.82) mit einem eher hohen Indikatorwert von 0.74 geschlossen wird, dass der aktuell untersuchte Punkt zu verwerfen ist. Der Block wird also beendet.

```

Output von Bewertung.fis:      0.8176

Input und Output von Entscheidung.fis:
Output FS3      Output FS3      Ratio
letzter Schritt aktueller Schritt
 0.5101         0.8176         0.6239

Output:      0.7441

Block beendet!
    
```

Daraufhin startet der nächste Durchlauf, und aus den verbleibenden Punkten werden folgende zwei 4-Punkt-Kombinationen am besten bewertet:

```

Kombination 1 aus Fuzzy System 1:
Punkte
 13    35    43    45
s0[mm] iqr    el[ppm]  e2[ppm]  cosdiffAzimut  ratioBetrag  output(FS)
6.73   0.06   0.704    5.414    0.87            0.954        0.7200

Kombination 2 aus Fuzzy System 1:
Punkte
 13    35    43    47
s0[mm] iqr    el[ppm]  e2[ppm]  cosdiffAzimut  ratioBetrag  output(FS)
6.26   0.13   1.308    2.641    0.87            1.051        0.7021

Kombination 1 oder 2 wählen oder selbst 4 Punkte eingeben? (1/2/3) [1]:1
    
```

Als Startblock wird wieder Kombination 1 gewählt, darauf aufbauend werden die nächsten möglichen Nachbarpunkte untersucht:

5 ANWENDUNGSBEISPIELE

Input und Output von Auswahl-Iteration.fis:

Punkt	s0[mm]	iqr	e1[ppm]	e2[ppm]	DiffAz[gon]	RatioBetrag	OutputFS2
15	0.0280	0.9288	1.8146	4.0730	-101.7278	1.6205	0.3971
21	0.0153	0.4667	2.2307	4.4845	30.5814	0.8951	0.6098
37	0.0313	1.0000	2.4525	3.3337	-85.8699	4.2240	0.3996
47	0.0208	0.7527	1.3083	2.9232	21.6875	1.2134	0.6231

Zuerst wird Punkt 47 hinzugenommen, auch die Bewertung in den Systemen 3 und 4 wird akzeptiert.

Output von Bewertung.fis: 0.5250

Input und Output von Entscheidung.fis:

Output FS3 letzter Schritt	Output FS3 aktueller Schritt	Ratio
0.5000	0.5250	0.9525

Output: **0.2508**

Der nächste Iterationsschritt fügt Punkt 21 dem Block hinzu:

Input und Output von Auswahl-Iteration.fis:

Punkt	s0[mm]	iqr	e1[ppm]	e2[ppm]	DiffAz[gon]	RatioBetrag	OutputFS2
15	0.0234	0.7734	1.4647	3.4919	-106.0653	1.5635	0.4080
17	0.0249	1.0000	1.5156	3.1849	-116.0766	2.1578	0.3944
21	0.0245	0.8858	0.4543	2.8745	26.2439	0.8636	0.6552
37	0.0292	0.8021	1.9122	3.2606	-90.2074	4.0755	0.3980

Auch hier liefern die Systeme 3 und 4 die Entscheidung, dass Punkt 21 zu Block 2 paßt, da der Outputwert von FS 3 mit 0.39 sehr niedrig liegt; auch die endgültige Entscheidung liegt bei 0.25, d.h. der Block ist noch korrekt.

Output von Bewertung.fis: 0.3863

Input und Output von Entscheidung.fis:

Output FS3 letzter Schritt	Output FS3 aktueller Schritt	Ratio
0.5250	0.3863	1.3590

Output: **0.2508**

Die letzten verfügbaren Punkte werden im nächsten Iterationsschritt untersucht; Punkt 15 scheint davon der bestpassendste zu sein, obwohl die Outputwerte allgemein schon sehr niedrig (um 0.40) liegen:

Input und Output von Auswahl-Iteration.fis:

Punkt	s0[mm]	iqr	e1[ppm]	e2[ppm]	DiffAz[gon]	RatioBetrag	OutputFS2
15	0.0299	1.0000	0.5183	3.4018	-110.4393	1.6047	0.4311
17	0.0327	0.6277	1.3631	2.6535	-120.4506	2.2146	0.3941
37	0.0348	0.8355	1.2436	2.8974	-94.5813	4.1828	0.3961

Punkt 15 wird also versuchsweise dem Block 2 hinzugefügt; das Fuzzy System 3 liefert einen eher neutralen Outputwert von 0.54. Da der korrespondierende Wert im letzten Iterationsschritt aber mit 0.39 deutlich niedriger gelegen ist, erkennt das letzte Fuzzy System 4 zwar einen signifikanten Anstieg des Outputwerts von FS 3, da der Outputwert mit 0.54 aber nicht sehr hoch liegt, wird Punkt 15 doch akzeptiert.

```
Output von Bewertung.fis:      0.5397

Input und Output von Entscheidung.fis:

  Output FS3      Output FS3      Ratio
letzter Schritt  aktueller Schritt
  0.3863          0.5397          0.7157

Output:      0.3851
```

Nun stehen die Punkte 17 und 37 zur Auswahl, wovon 37 dem Block hinzugefügt wird.

```
Input und Output von Auswahl-Iteration.fis:

Punkt  s0[mm]    iqr    e1[ppm]  e2[ppm]  DiffAz[gon]RatioBetrag  OutputFS2
  17    0.0317    1.0000  1.0859   3.0572  -104.6736    2.0954    0.4014
  37    0.0329    0.9019  1.1271   3.2571  -78.8043    3.9576    0.4078
```

Da Punkt 15 die durchschnittlichen Werte wie Azimut oder Betrag stark beeinflusst hat, ergeben sich hier kaum Änderungen in den Bewertungen, sodaß auch Punkt 37 akzeptiert wird.

```
Output von Bewertung.fis:      0.5436

Input und Output von Entscheidung.fis:

  Output FS3      Output FS3      Ratio
letzter Schritt  aktueller Schritt
  0.5397          0.5436          0.9929

Output:      0.2508
```

Nur Punkt 17 steht noch zur Verfügung:

```
Input und Output von Auswahl-Iteration.fis:

Punkt  s0[mm]    iqr    e1[ppm]  e2[ppm]  DiffAz[gon]RatioBetrag  OutputFS2
  17    0.0316    1.0000  1.2302   3.0716  -94.8230    1.8997    0.3961
```

Auch dieser Punkt wird akzeptiert. Danach terminiert der Algorithmus, weil keine Punkte mehr vorhanden sind.

```

Output von Bewertung.fis:      0.5201

Input und Output von Entscheidung.fis:

  Output FS3      Output FS3      Ratio
letzter Schritt  aktueller Schritt
  0.5436          0.5201          1.0453

Output:      0.2508

Nicht verwendete Punkte:
  0

```

5.1.3 Interpretation

Die Bewegung des ersten Startblocks, bestehend aus den Punkten 3, 5, 11, 39, kann durch einen Rotationsparameter beschrieben werden. Das Bewegungsmuster von Punkt 41 paßt ebenfalls gut zu diesem Block. Für den menschlichen Betrachter scheint es klar, dass daraufhin der Block als abgeschlossen gelten muß. Der Abbruch bei Hinzunahme von Punkt 15 ist durch die hohen Output-Indikatorwerte von Fuzzy System 3 und 4 mehr als gerechtfertigt.

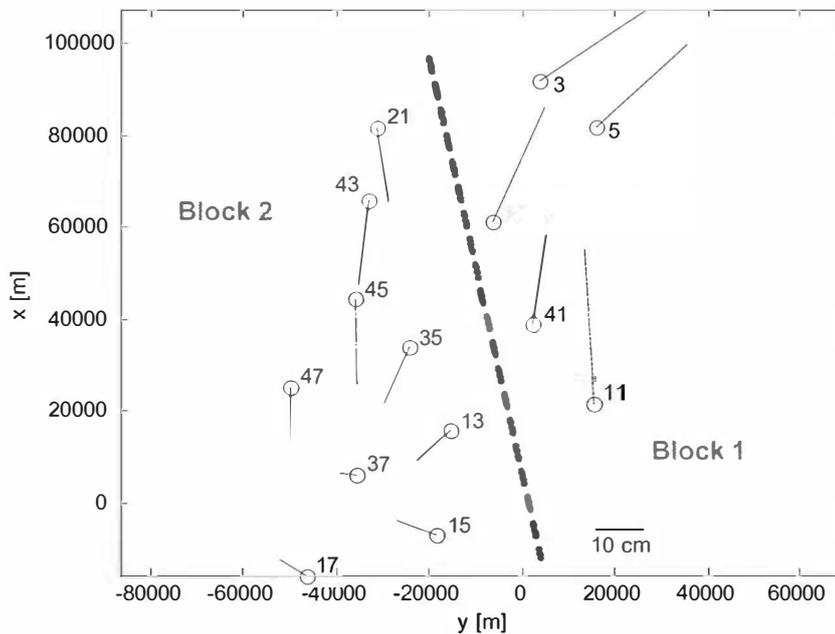


Abbildung 5.2: Übersicht über die beiden detektierten Blöcke. Die trennende Verwerfungszone ist durch eine strichlierte Linie dargestellt.

Block 2 wird zunächst ebenfalls in Übereinstimmung mit dem menschlichen Denken aus den Punkten 13, 35, 43, 45 gebildet. Nach Hinzunahme von 47 und 21 sollte eventuell auch hier der Abbruch durch Überprüfen von Punkt 15 erfolgen. Allerdings sind die Werte von Fuzzy System 3 und 4 nicht so hoch wie bei Block 1, der Abbruch ist also laut dem System nicht gerechtfertigt, und die letzten Punkte 15, 17

und 37 werden in Übereinstimmung mit der Simulation in Block 2 aufgenommen (siehe Abbildung 5.2).

Man könnte aber meinen, dass die Bewegung der Punkte 15, 17, 37 zu verschieden erscheint, um zum zweiten Block zu passen. Sie sollten eher als Einzelpunkte klassiert und nicht verwendet werden.

Am Ende von Kapitel 4 wurde bereits auf die leichten Modifikationen der Fuzzy Systeme für regionale und globale Anwendungen hingewiesen. Es wird so auf die kleineren Strainwerte bei ausgedehnten Netzen Rücksicht genommen. Das Testnetz Delft umfasst ein Gebiet von 140 x 100 km; werden dieselben Daten mit dem globalen Algorithmus nochmals analysiert, beendet tatsächlich Punkt 15 den zweiten Block, da das gesamte System durch die Änderungen bei e_1 und e_2 sensibler reagiert. Die Punkte 15, 17 und 37 bleiben daher als Einzelpunkte am Ende des Algorithmus übrig.

5.2 Lokales Verschiebungsfeld – Hangrutschung

5.2.1 Datenmaterial

Bei diesem Beispiel handelt es sich um ein lokales Überwachungsnetz in Varna, (Bulgarien), das der Überwachung eines Steilhanges nahe der Schwarzmeerküste dient. In (PELZER, MILEV, 1984) wird ausführlich über Netzaufbau, Messungen und Ergebnisse berichtet. Die Verschiebungen zwischen 1981 und 1982 wurden als nicht signifikant bestimmt; daher wurde für die Blockdetektion nur die Struktur des Netzes übernommen und signifikante Verschiebungen angenommen. Das Netz besteht aus stabilen Punkten auf einem Plateau (nördlicher Netzteil, Punkte 2, 7, 8, 9, 10, 13, 15, 16, 17, 19); die Bewegungen liegen mit maximal 3mm innerhalb der Messgenauigkeit. Der südliche Netzteil besteht aus Punkten auf dem bewegten Steilhang. Die Bewegungen wurden hier mit ca. 1cm zwischen den Messepochen angenommen.

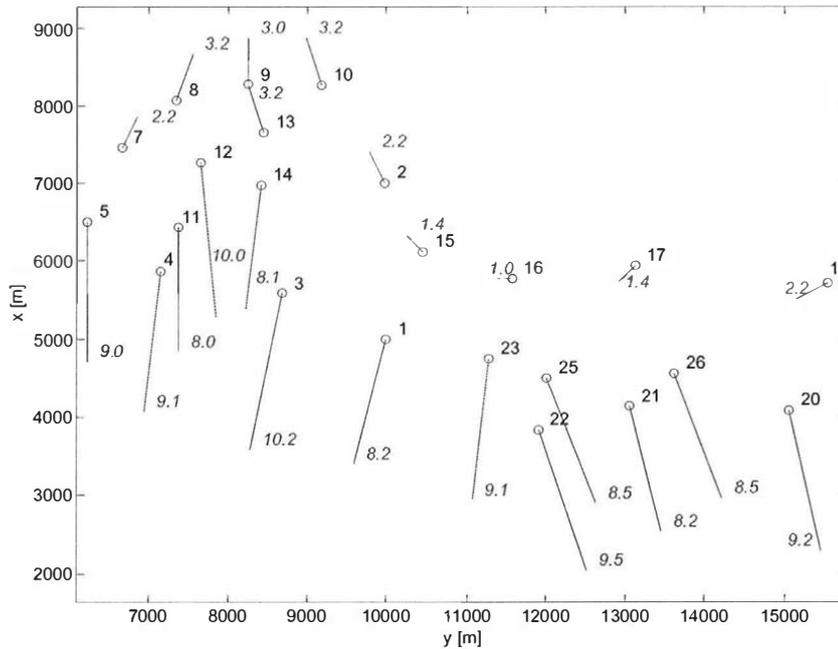


Abbildung 5.3: Verschiebungsvektoren für das Hangrutschungsgebiet Varna. Die Größe der Verschiebungen in mm ist am Ende des jeweiligen Vektors angegeben.

5.2.2 Auswertung

Mit freiem Auge ist klar die Abgrenzung der beiden Blöcke erkennbar. Der Algorithmus zur Blockdetektion startet mit der Berechnung der bestmöglichen 4-Punkt-Kombinationen.

```

Kombination 1 aus Fuzzy System:
Punkte
    2    10    13    15
s0[mm] iqr  e1[ppm]  e2[ppm]  cosdiffAzimut  ratioBetrag  output(FS)
0.12  0.01  0.724    0.071    0.95           0.924       0.8403

Kombination 2 aus Fuzzy System:
Punkte
    2    10    15    16
s0[mm] iqr  e1[ppm]  e2[ppm]  cosdiffAzimut  ratioBetrag  output(FS)
0.13  0.01  0.684    0.235    0.90           1.070       0.8399
    
```

Die Punkte 2, 10, 13, 15 werden als optimaler Startblock identifiziert. Diese 4 Vektoren weisen eine sehr große Ähnlichkeit in der Richtung auf; die minimalen Unterschiede in der Länge der Vektoren können durch Maßstabsfaktoren in der Affintransformation bzw. in der Strainanalyse erklärt werden.

Nun werden iterativ die Nachbarpunkte hinzugefügt und bewertet; nach 6 Iterationsschritten ergibt sich folgendes Bild (Abbildung 5.4):

```

Block 1:    2    10    13    15    9    8    7    19    16    17
    
```

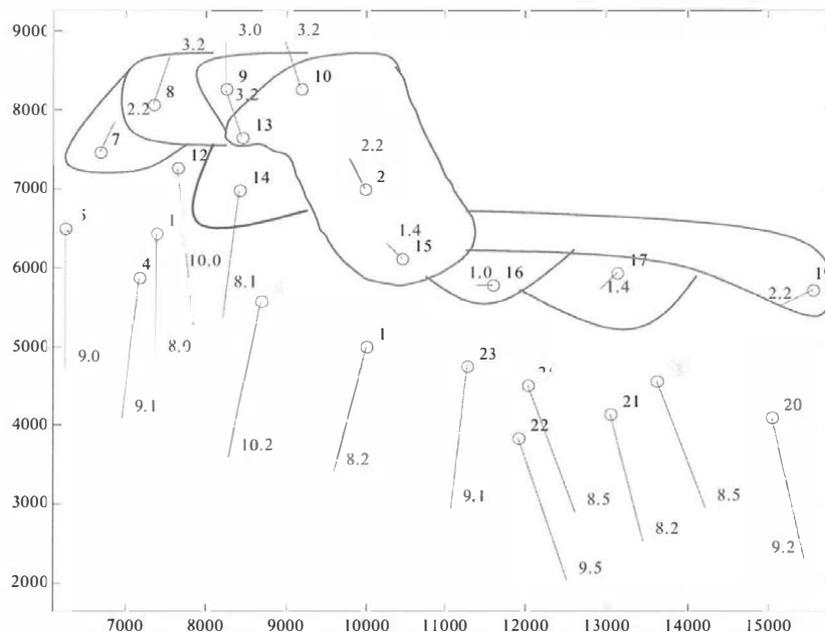


Abbildung 5.4: Iterative Hinzunahme von Netzpunkten zum Startblock (in grün). Der Abbruchpunkt ist in rot dargestellt.

Man erkennt, dass alle stabilen Netzpunkte erkannt wurden. Die Vektoren sind zwar in der Richtung nicht sehr ähnlich, aber die kleinen Werte der Vektorlänge sind vergleichbar.

Im nächsten Schritt muß nun der Abbruch erfolgen. Die in diesem Schritt zur Verfügung stehenden Punkte sind mit ihren Parametern aufgelistet. Punkt 14 scheint der beste Kandidat zu sein:

Input und Output von Auswahl-Iteration.fis:

Punkt	s0 [mm]	iqr	e1 [ppm]	e2 [ppm]	DiffAz [gon]	RatioBetrag	OutputFS2
1	0.0013	0.8190	3.0225	0.2375	139.4042	0.2792	0.4879
3	0.0018	0.9033	3.7956	0.2307	142.4334	0.2258	0.4807
5	0.0019	0.8613	3.6385	0.3170	155.0000	0.2558	0.4831
11	0.0018	0.7439	3.3254	0.3359	155.0000	0.2878	0.4862
12	0.0028	1.0000	2.5877	0.4195	161.3451	0.2291	0.4882
14	0.0023	0.6770	2.4225	0.3037	147.0833	0.2856	0.4884
20	0.0014	0.7968	2.4321	0.5539	168.9209	0.2497	0.4869
21	0.0012	0.7517	2.5556	0.5982	170.5958	0.2792	0.4862
23	0.0014	0.4908	3.1014	0.3288	147.9553	0.2543	0.4879
25	0.0014	0.8085	2.7673	0.6836	177.8401	0.2695	0.4844
26	0.0015	0.8171	2.5229	0.6474	177.8401	0.2695	0.4852

Fuzzy System 3 bewertet nun die Situation inklusive Punkt 14. Lagen die Werte bei den ersten Iterationen um 0.5, liefert das System bei Hinzunahme von Punkt 14 einen Outputwert von 0.75. Dieser Wert ist an und für sich sehr hoch; ein noch wichtiger Indikator ist allerdings der Anstieg der Outputwerte von ca 0.5 auf 0.74 (siehe

Tabelle 5.1). Das Programm kann daran erkennen, dass ein Abbruch notwendig ist. Punkt 14 wird aus dem Block entfernt.

Nächster Punkt	Output FS 3
9	0.55
8	0.49
7	0.45
19	0.52
16	0.50
17	0.54
14	0.74

Tabelle 5.1: Output der verschiedenen Iterationen von Fuzzy System 3.

Im nächsten Schritt werden aus den Restpunkten alle gültigen 4-Punkte-Blöcke berechnet:

Kombination 1 aus Fuzzy System:

```
Punkte
  20  22  25  26
s0[mm] iqr  e1[ppm]  e2[ppm]  cosdiffAzimut  ratioBetrag  output(FS)
0.25  0.10  1.633    0.309    1.00            1.008        0.7942
```

Kombination 2 aus Fuzzy System:

```
Punkte
  1   4   5  11
s0[mm] iqr  e1[ppm]  e2[ppm]  cosdiffAzimut  ratioBetrag  output(FS)
0.10  0.05  2.222    0.615    0.99            0.994        0.7941
```

Bei der Wahl von 20, 22, 25, 26 als Startblock werden die Punkte in folgender Reihenfolge zu Block 2 hinzugefügt:

```
Block 2:  20  22  25  26  21  4  5  11  12  14  23  1  3
```

Tabelle 5.2 zeigt die zugehörigen Outputwerte von Fuzzy System 3; demnach gehören alle Punkte zum selben Block. Der Algorithmus endet hier, da keine weiteren Netzpunkte vorhanden sind.

Nächster Punkt	Output FS 3
21	0.44
4	0.45
5	0.33
11	0.31
12	0.41
14	0.35
23	0.34
1	0.39
3	0.37

Tabelle 5.2: Output der verschiedenen Iterationen von Fuzzy System 3 für den zweiten Block.

5.2.3 Interpretation

Bei genauer Betrachtung des Netzbildes erscheint es nicht korrekt, dass ausgehend von den Punkten 20, 21, 22, 25, 26 als nächster Nachbarpunkt 4 gewählt wird. Dies liegt an den Eigenschaften der Delaunay-Triangulation, die einen „konvexen“ Dreiecksraster erzeugt und somit Punkt 22 mit Punkt 4 verbindet.

Weiters scheinen die Richtungen der Vektoren zu zwei verschiedenen südlichen Blöcken zu gehören. Die Richtungen sind jedoch in diesem Fall nicht unterschiedlich genug, um eine weitere Unterteilung in einen Block 20, 21, 22, 25, 26 sowie in einen Block mit den südlichen Restpunkten zu gewährleisten. Durch entsprechende Modifikationen der Zugehörigkeitsfunktionen bzw. der Regeln kann aber natürlich auch ein solches, strengeres Ergebnis erzielt werden.

5.3 Globales Verschiebungsfeld – Plattentektonik

5.3.1 Datenmaterial

Die verwendeten Bewegungsvektoren basieren auf den Ergebnissen des IGS-Analysezentrams am JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) und damit ausschließlich auf den Beobachtungen eines global verteilten GPS Referenzstationsnetzes (siehe Abbildung 5.5). Eine Auswahl (max. 99 für ITRF2000) dieser Stationen mit höchst stabilem Koordinatenverhalten über zumindest 3 Jahre können als datumsgebende Punkte angesehen werden. Die Anbindung der reinen JPL-GPS Lösung an den ITRF-Rahmen erfolgt über eine räumliche Ähnlichkeitstransformation. Das Datumsproblem des im Prinzip frei ausgeglichenen GPS Netzes wird durch Vorgabe kleiner Standardabweichungen („minimum constraint“-Ansatz) für die 7 bzw. 14 (zeitliche Änderung) Parameter gelöst. Während in alten ITRF Lösungen die

Bewegungsvektoren noch an ein geophysikalisch bestimmtes Plattenmodell (NUVEL-1A) gebunden waren, entsprechen sie heute fast voraussetzungslos den integrierten Ergebnissen aller modernen Raumtechniken (VLBI, GPS, SLR, DORIS). Die horizontale Bewegung der Stationen im Referenzrahmen wird allerdings durch eine Zusatzbedingung (no-net rotation-Bedingung) begrenzt, welche globale Rotationen des Netzes (dies würde einer Änderung der Orientierung des Koordinatensystems entsprechen) ausschließt.

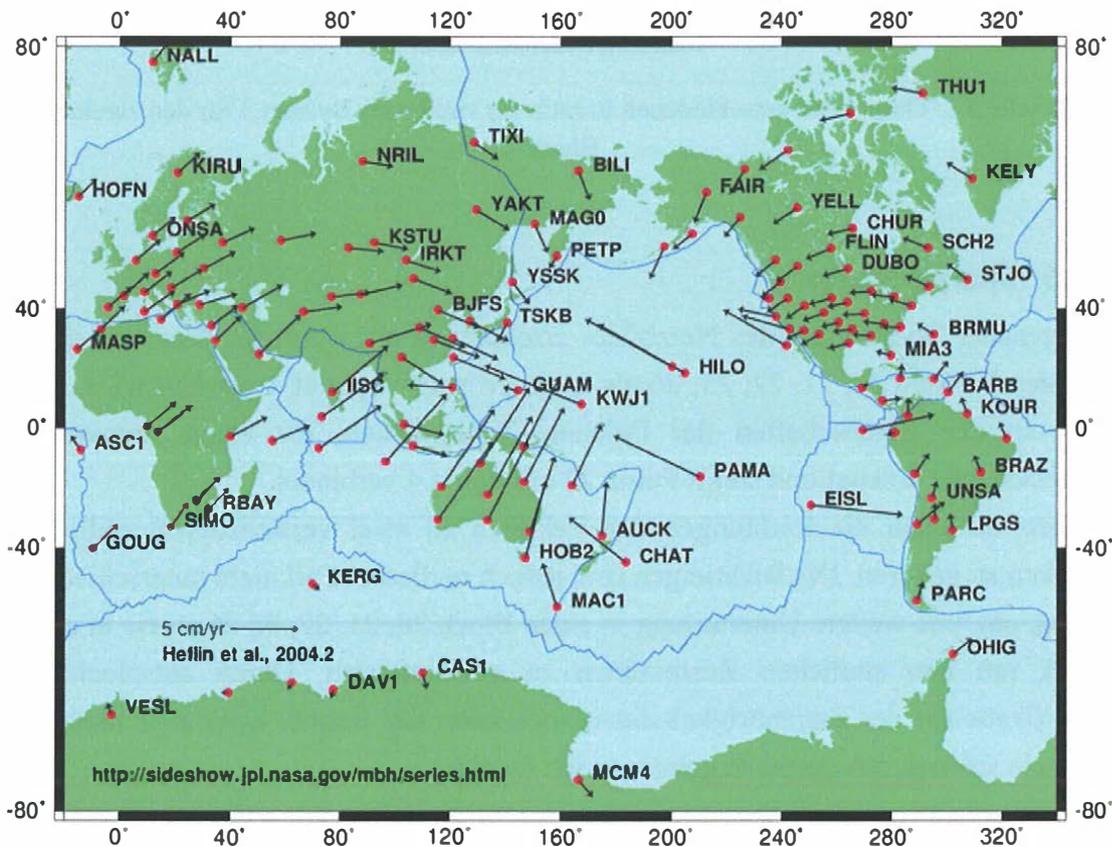


Abbildung 5.5: Globale Verschiebungsvektoren des JPL mit den Plattengrenzen (in dunkelblau).

Filtered		LAT	LON	HEIGHT			
AGMT POS	34.594281875	-116.429378197	1337838.60	0.05	0.05	0.20	
AGMT VEL		-0.95	-20.22	0.22	0.02	0.09	
ALAM POS	37.357958369	-115.158458171	1090011.00	0.11	0.13	0.41	
ALAM VEL		-10.56	-16.12	-0.32	0.04	0.15	
ALPP POS	34.824490482	-118.694798623	918092.30	0.36	0.37	1.39	
ALPP VEL		3.37	-28.48	-0.32	0.59	2.30	
ANA1 POS	34.015004428	-119.363467738	22453.60	0.07	0.08	0.30	
ANA1 VEL		11.41	-46.92	-25.31	0.24	0.97	
AOA1 POS	34.157442955	-118.830315788	246562.20	0.04	0.04	0.17	
AOA1 VEL		18.17	-40.54	0.56	0.01	0.04	

Abbildung 5.6: Auszug aus dem Stationsfile von JPL.

Abbildung 5.6 zeigt einen Auszug aus dem Stationsfile von JPL mit Angabe des vierstelligen Stationsnamens, der Position in der ersten Zeile sowie der

Geschwindigkeiten der Stationen in der zweiten Zeile, denen die Verschiebungsvektoren entnommen wurden.

Die verwendeten Daten liegen im Referenzrahmen ITRF2000, zur Epoche 1. Juli 2003, vor. Das Referenzellipsoid für Länge, Breite und Höhe ist WGS84, Länge und Breite sind in Grad angegeben, die Höhe in mm. Auch die letzten drei Spalten, der Breiten-, Längen- und Höhenfehler, sind in mm gegeben. Die Geschwindigkeiten und ihre Fehler sind in mm/Jahr angegeben.

Abbildung 5.7 zeigt die Auswahl der 186 für die Analyse verwendeten Stationen aus 681 verfügbaren; diese Reduktion war notwendig, da

1. an manchen Stationen mehrere GPS-Empfänger in Betrieb sind, wovon nur ein Punkt übernommen wurde,
2. eine gleichmäßige Verteilung der Punkte weltweit angestrebt wurde. Vor allem in Nordamerika und Europa wurde die Punktmenge stark reduziert.

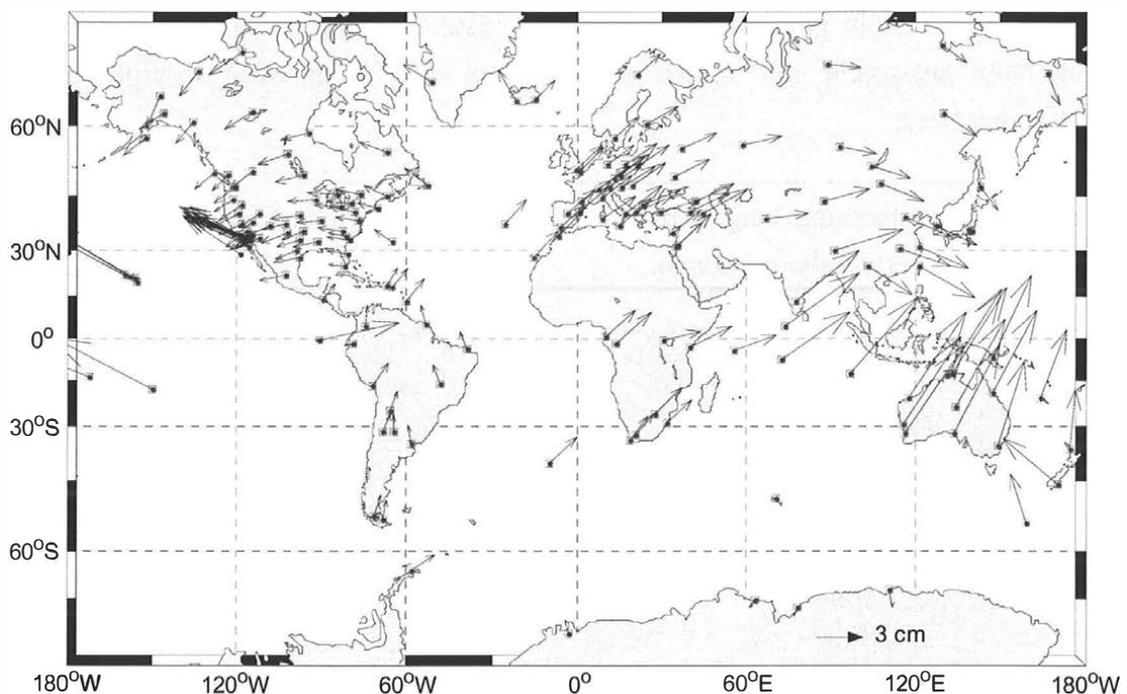


Abbildung 5.7: Netzbild der 186 für die Analyse verwendeten Verschiebungsvektoren aus den JPL-Daten.

Die Stationen sind also mittels Länge und Breite angegeben; der Analysealgorithmus arbeitet hingegen mit ebenen Abbildungskordinaten. Dazu war es notwendig, die globalen Koordinaten der Stationen zu verebnen. Dies ist natürlich nicht verzerrungsfrei möglich.

Es wurde eine möglichst einfache Abbildung gewählt. Punkte gleicher Länge sollten gleiche y-Werte erhalten, die x-Werte wurden mit demselben Faktor gewichtet. Es

entsteht also ein abstandstreuer Zylinderentwurf, d.h. der Äquator wird unverzerrt abgebildet.

$$y = \frac{\text{Länge} \cdot 111000}{200}$$

$$x = \frac{\text{Breite} \cdot 111000}{200}$$

Die Koordinaten y', x' der 2. Epoche ergaben sich durch Addition der gegebenen Verschiebungen zu y, x .

Anmerkung: Bei einer Angabe von y, x in m (d.h. Faktor 111 km pro Grad Länge bzw. Breite) wären sehr große Koordinaten aufgetreten (bis zu $\pm 19\,000\,000$ in y und bis zu $\pm 9\,000\,000$ in x). Da dies numerisch Probleme bereiten kann, wurde implizit ein Maßstab von 1:200 angenommen, sodaß die Koordinaten in einem Bereich von $\pm 97\,000$ in y und $\pm 44\,000$ in x liegen. Das bedeutet weiters, daß die Verschiebungen einem Zeitintervall zwischen den Epochen von 200 Jahren entsprechen, was in geologischen Maßstäben eine recht kurze Zeitspanne darstellt. Das Netz entspricht mit diesen Proportionen also mehr oder weniger einem regionalen Netz.

Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 5.8 die tektonische Plattenverteilung mit Subduktions- und Kollisionszonen.

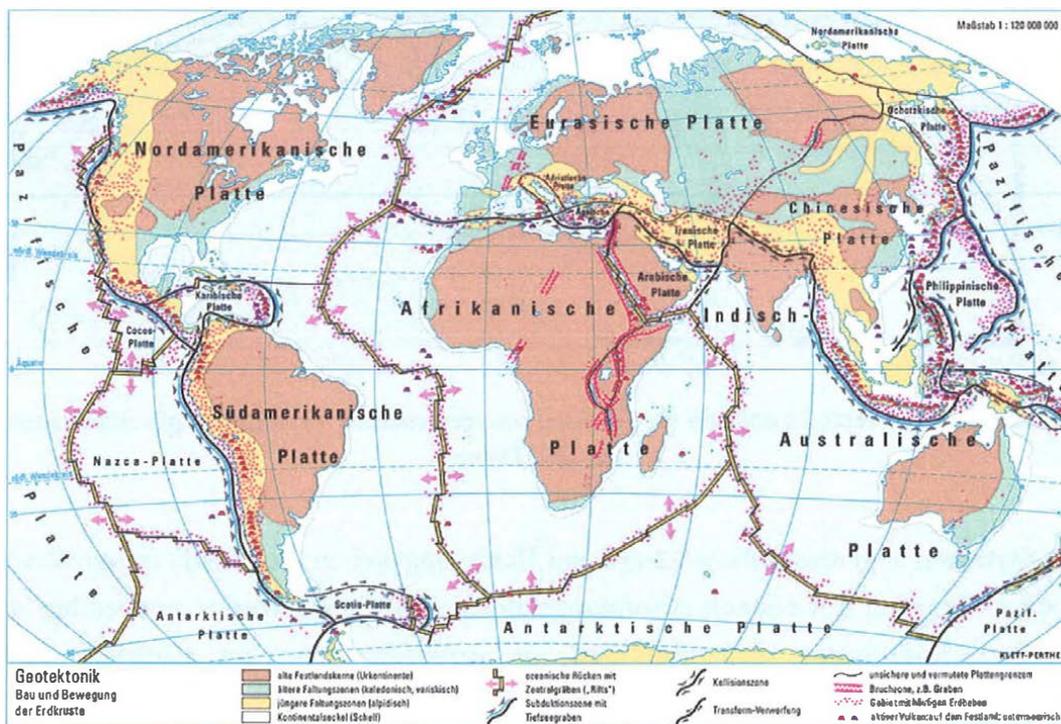


Abbildung 5.8: Tektonik der Erde, aus (KLETT, 2004).

5.3.2 Auswertung

Die Auswertung erfolgt mit den für große Netze modifizierten Fuzzy Systemen (siehe Ende Kapitel 4).

Nach dem Start des Matlab-Programmes ergeben sich knapp 8500 4-Punkt-Kombinationen aus dem ersten Fuzzy System. Die „besten“ zwei Lösungen werden dem User angezeigt. Möglichkeit 1 betrifft Punkte aus Europa bzw. Afrika, die Punkte von Lösung 2 liegen in Nordamerika.

```
Kombination 1 aus Fuzzy System 1:
Punkte
    394    398    486    537
s0[mm] iqr   e1[ppm]   e2[ppm] cosdiffAzimut ratioBetrag  output(FS)
2.62   0.03   0.077   0.022   0.99           0.991       0.8601

Kombination 2 aus Fuzzy System 1:
Punkte
    144    474    558    559
s0[mm] iqr   e1[ppm]   e2[ppm] cosdiffAzimut ratioBetrag  output(FS)
0.26   0.00   0.012   0.097   0.98           0.998       0.8601

Kombination 1 oder 2 wählen oder selbst 4 Punkte eingeben? (1/2/3) [1]:1
```

Die beiden Kombinationen sind gleichwertig, da beide den maximalen Outputwert von 0.8601 erreicht haben. Nach Wahl der ersten Lösung wird der erste Block in folgender Reihenfolge erweitert:

```
Block 1:
  394   398   486   537   250   392   483   484   214   338   158   627
  584   680   401   232   665   231   212   216   199   444   268   65
    48   354   282   443   475   529   553   149   342   377   462   547
  336   681   591   429   679   527   263   405   346   18   611   283
  419   241   293   404   261   565   605   670   566   41
```

Bei genauer Analyse der verwendeten Punkte fällt auf, dass außer korrekten europäischen, asiatischen und afrikanischen Punkten auch Punkt 419 der Antarktis (Station O'Higgins) zu diesem Block gerechnet wird. Abbildung 5.16 bestätigt diese Entscheidung, da der Verschiebungsvektor von 419 genau dem europäischen Bewegungsmuster entspricht.

Der nächste Kandidat ist Punkt 312 (Lhasa), die Abbildung 5.9 und der folgende Ausschnitt aus dem Protokoll zeigen aber deutlich, dass dieses Muster nicht zum gesamten europäischen Bewegungsmuster passt, da der Vektor zu lang ist (RatioBetrag von 0.54).

5 ANWENDUNGSBEISPIELE

Kombination 1 aus Fuzzy System 2:

Punkte	394	398	486	537	250	392	483	484	214	338	158	627	584
	680	401	232	665	231	212	216	199	444	268	65	48	354
	282	443	475	529	553	149	342	377	462	547	336	681	591
	429	679	527	263	405	346	18	611	283	419	241	293	404
	261	565	605	670	566	41	312						

s0[mm] iqr e1[ppm] e2[ppm] DiffAzimut[gon] RatioBetrag Output FS2
 4.63 0.81 0.262 0.110 -12.23 0.540 **0.6112**

Fuzzy System 3 liefert eine Bewertung von 0.68, woraufhin der Block mit einer Abbruchsentscheidung von 0.58 eher knapp abgebrochen wird.

Output von Bewertung.fis: 0.6792

Input und Output von Entscheidung.fis:

Output FS3	Output FS3	Ratio
letzter Schritt	aktueller Schritt	
0.6302	0.6792	0.9279

Output: **0.5818**

Block beendet!

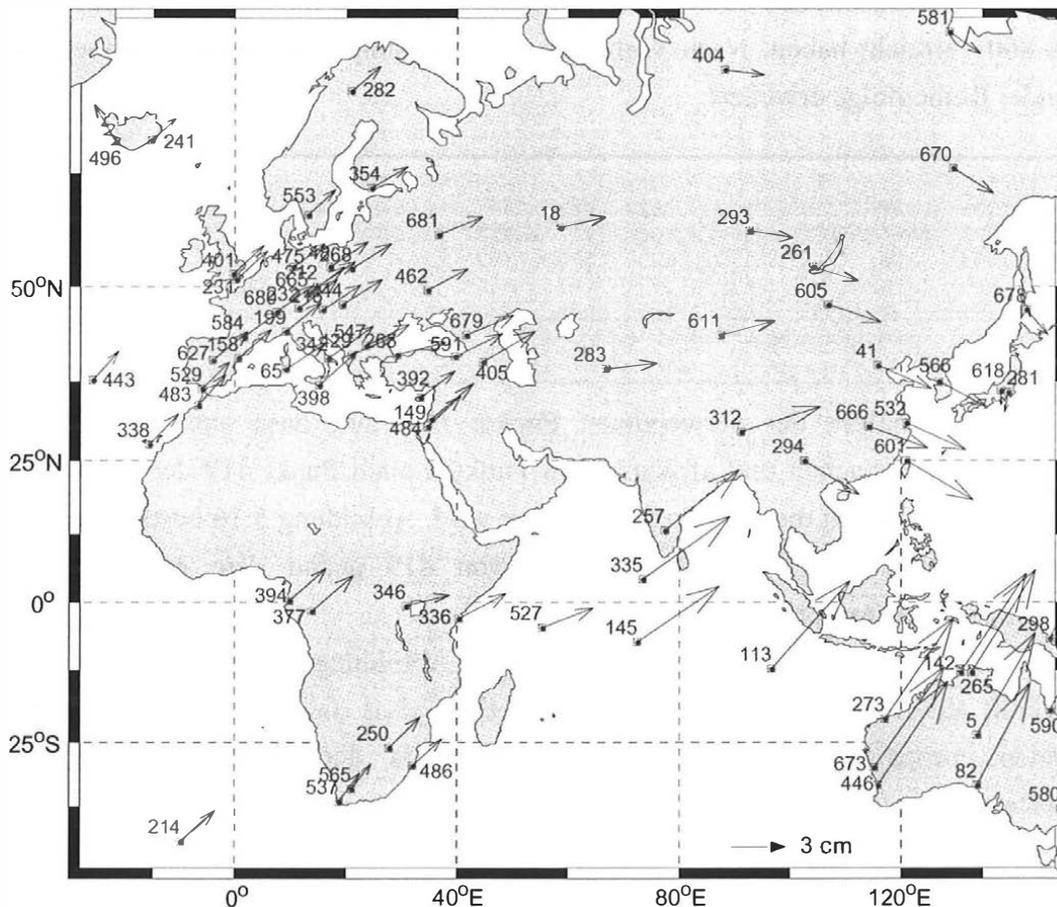


Abbildung 5.9: Verschiebungsvektoren für Eurasien und Afrika.

Punkt 312 wird also nicht in Block 1 aufgenommen, und der Algorithmus startet von Neuem mit der Suche nach 4 passenden Punkten. Natürlich steht wiederum der vorhin schon angezeigte Block in Nordamerika zur Auswahl, auch die gleichwertige zweite Kombination liegt auf der nordamerikanischen Platte. Hier soll allerdings gezeigt werden, dass sich der Benutzer für eine beliebige (sinnvolle) 4-Punkt-Kombination entscheiden kann.

Kombination 1 aus Fuzzy System 1:

```
Punkte
  144  474  558  559
s0[mm] iqr  e1[ppm]  e2[ppm]  cosdiffAzimut  ratioBetrag  output (FS)
0.26  0.00  0.012  0.097  0.98  0.998  0.8601
```

Kombination 2 aus Fuzzy System 1:

```
Punkte
  20  114  558  559
s0[mm] iqr  e1[ppm]  e2[ppm]  cosdiffAzimut  ratioBetrag  output (FS)
2.21  0.01  0.022  0.046  0.97  0.960  0.8601
```

Kombination 1 oder 2 wählen oder selbst 4 Punkte eingeben? (1/2/3) [1]: 3

```
Punkt 1 eingeben: 50
Punkt 2 eingeben: 188
Punkt 3 eingeben: 290
Punkt 4 eingeben: 326
```

In diesem Fall wurden also manuell vier Punkte in Südamerika gewählt. Die folgenden korrekten Punkte werden Block 2 iterativ zugeordnet:

```
Block 2:
  50  188  290  326  47  118  499  438  607  84  476  555
 128  14  29
```

Die Arbeitsweise des Algorithmus ist hier besonders schön zu interpretieren (siehe Abbildung 5.10): Die Vektoren Südamerikas sind alle in etwa gleich lang; das vorherrschende Kriterium ist also die Richtung der Vektoren. Die vier Startvektoren zeigen leicht nach Nordwesten, mit den Punkten 47, 118 und 499 dreht das durchschnittliche Azimut langsam Richtung Norden bzw. Nordosten. Daraufhin können 438, 607 und 84 dem Block angefügt werden. Nun entsprechen die Punkte der Karibischen Platte genau dem Bewegungsmuster, und 476, 555 und 128 werden hinzugenommen. So ist langsam auch die durchschnittliche Vektorlänge gestiegen, sodaß auch die Punkte 14 und 29 als passend erkannt werden.

Kombination 1 aus Fuzzy System 2:

```
Punkte
  50  188  290  326  47  118  499  438  607  84  476  555  128
 14  29  53
s0[mm] iqr  e1[ppm]  e2[ppm]  DiffAzimut[gon]  RatioBetrag  Output FS2
4.44  0.55  0.033  0.558  76.38  0.965  0.6106
```

Der nächste Punkt, 53, befindet sich allerdings auf der nordamerikanischen Platte und weist eine völlig andere Vektorrichtung auf (DiffAzimut von 76 gon). Der Block wird hier also beendet, wobei die Entscheidung der Systeme 3 und 4 deutlicher ausfällt als beim ersten Block, da das Verhältnis der Outputwerte von Fuzzy System 3 (Ratio im Protokoll) kleiner ist als beim europäischen Block und daher der entscheidende Abbruchwert bei 0.69 liegt.

```
Output von Bewertung.fis:      0.6876

Input und Output von Entscheidung.fis:

Output FS3      Output FS3      Ratio
letzter Schritt aktueller Schritt
0.4952          0.6876          0.7201

Output:      0.6891

Block beendet!
```

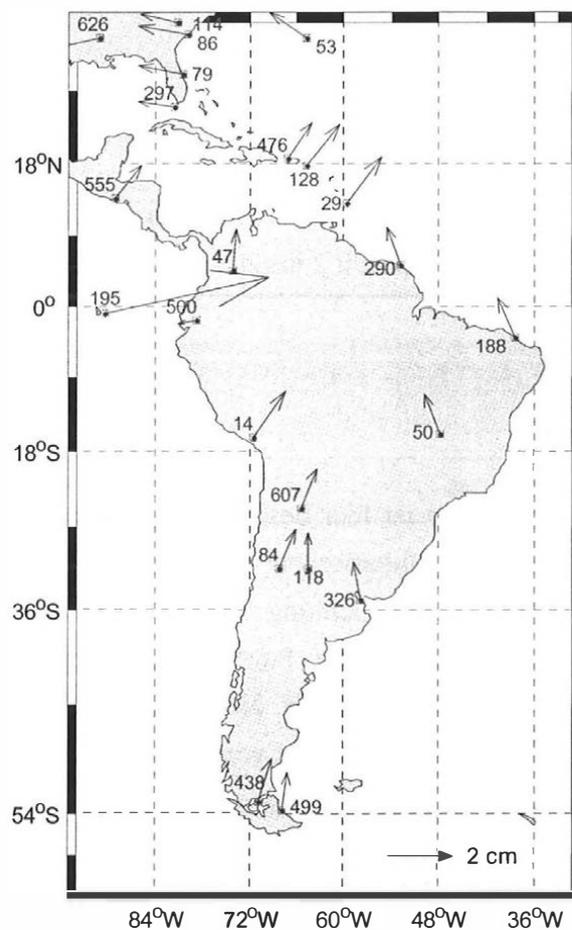


Abbildung 5.10: Südamerika und die Karibik.

Dieselben zwei 4-Punkt-Lösungen stehen also weiterhin zur Auswahl; nun soll die nordamerikanische Platte untersucht werden.

```

Kombination 1 aus Fuzzy System 1:
Punkte
    144  474  558  559
s0[mm] iqr  e1[ppm]  e2[ppm] cosdiffAzimut ratioBetrag  output(FS)
0.26  0.00  0.012  0.097  0.98  0.998  0.8601

Kombination 2 aus Fuzzy System 1:
Punkte
    20  114  558  559
s0[mm] iqr  e1[ppm]  e2[ppm] cosdiffAzimut ratioBetrag  output(FS)
2.21  0.01  0.022  0.046  0.97  0.960  0.8601

Kombination 1 oder 2 wählen oder selbst 4 Punkte eingeben? (1/2/3) [1]: 1
    
```

Block 3 wird nun iterativ aus folgenden Punkten aufgebaut (siehe Abbildung 5.11):

```

Block 3:
 144  474  558  559  89  66  677  179  626  20  198  15
 79  86  548  17  259  97  11  153  235  182  8  24
230  60  156  197  161  42  258  494  314  471  676  244
285  207  121  208  660  643  260  205  517  169  246  557
 53  95  276  176
    
```

Der Abbruchpunkt ist in diesem Fall 581 (Nordostasien, siehe Abbildung 5.16); dieser Punkt gilt durch die Lage am Rande des Gebiets als benachbart zu Punkt 246 im Norden Kanadas, siehe Abbildung 5.11. Dies liegt an der Definition der Delaunay-Triangulation, wie bereits mehrfach erwähnt.

```

Kombination 1 aus Fuzzy System 2:
Punkte
 144  474  558  559  89  66  677  179  626  20  198  15  79
 86  548  17  259  97  11  153  235  182  8  24  230  60
156  197  161  42  258  494  314  471  676  244  285  207  121
208  660  643  260  205  517  169  246  557  53  95  276  176
581
s0[mm] iqr  e1[ppm]  e2[ppm] DiffAzimut[gon] RatioBetrag Output FS2
5.21  1.00  0.167  0.441  143.74  0.833  0.5793
    
```

Das Bewegungsmuster von 581 ist tatsächlich völlig vom nordamerikanischen Verhalten verschieden, was sich auch in der deutlichen Ablehnung des Punktes durch die Systeme 3 und 4 zeigt:

```

Output von Bewertung.fis: 0.7546

Input und Output von Entscheidung.fis:

  Output FS3      Output FS3      Ratio
letzter Schritt  aktueller Schritt
  0.6680          0.7546          0.8852

Output: 0.7140

Block beendet!
    
```

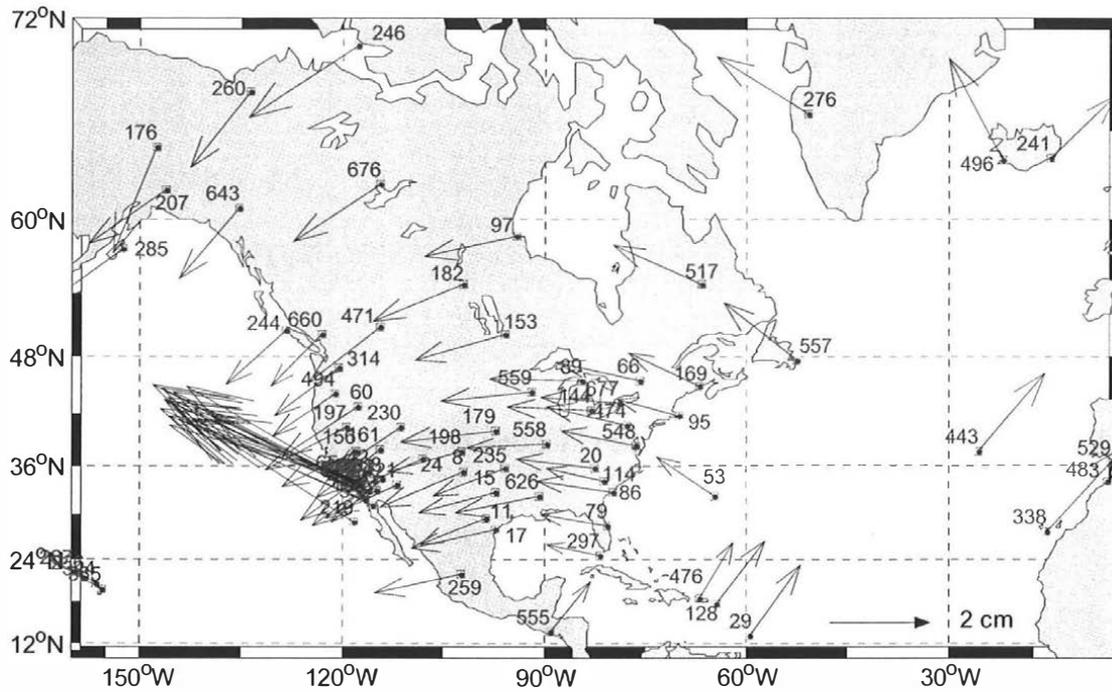


Abbildung 5.11: Nordamerikanische Platte.

Als nächster Block wird Australien bzw. die indo-australische Platte vorgeschlagen:

```

Kombination 1 aus Fuzzy System 1:
Punkte
    142  273  446  673
s0[mm] iqr  e1[ppm]  e2[ppm]  cosdiffAzimut  ratioBetrag  output(FS)
0.61  0.01  0.123   0.185    1.00           1.000       0.8385

Kombination 2 aus Fuzzy System 1:
Punkte
    236  287  365  576
s0[mm] iqr  e1[ppm]  e2[ppm]  cosdiffAzimut  ratioBetrag  output(FS)
1.41  0.02  0.025   0.425    1.00           1.009       0.8304

Kombination 1 oder 2 wählen oder selbst 4 Punkte eingeben? (1/2/3) [1]: 1
    
```

Die australischen Punkte werden zu Block 4 gruppiert, danach folgen die Punkte 335, 257, 145 nahe bzw. in Indien.

```

Block 4:
    142  273  446  673  113  265  82  5  580  590  298
    335  257  145
    
```

Punkt 289 gehört zwar zur indo-australischen Platte, der Vektor ist allerdings etwas kürzer (RatioBetrag von 1.33). Das System ist so sensibel, dass auch hier abgebrochen wird.

5 ANWENDUNGSBEISPIELE

Kombination 1 aus Fuzzy System 2:

```

Punkte
  142  273  446  673  113  265  82  5  580  590  298  335  257
  145  289

s0[mm]  iqr  e1[ppm]  e2[ppm]  DiffAzimut[gon]  RatioBetrag  Output FS2
5.14  0.33  0.519  0.676  15.95  1.332  0.6034
    
```

Allerdings ist dieser Abbruch, wie zu erwarten, nicht sehr deutlich ausgeprägt; der entscheidende Outputwert liegt nur bei 0.56.

```

Output von Bewertung.fis: 0.6117
    
```

```

Input und Output von Entscheidung.fis:
    
```

```

  Output FS3      Output FS3      Ratio
letzter Schritt  aktueller Schritt
  0.4144          0.6117          0.6774
    
```

```

Output: 0.5561
    
```

Block beendet!

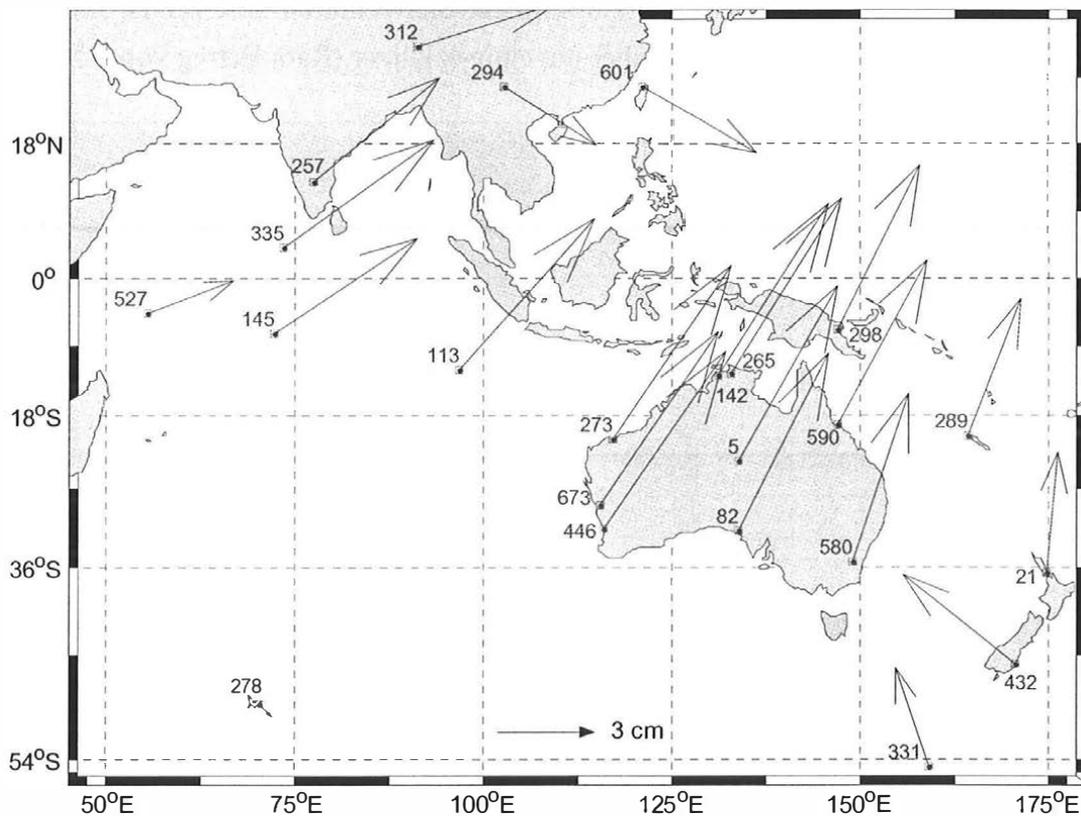


Abbildung 5.12: Indo-australische Platte.

Nun folgt ein Block im Ostpazifik:

```

Kombination 1 aus Fuzzy System 1:
Punkte
    177   236   287   576
s0[mm] iqr  e1[ppm]  e2[ppm] cosdiffAzimut ratioBetrag  output(FS)
1.02  0.03  0.371   0.135    1.00           1.001         0.8234

Kombination 2 aus Fuzzy System 1:
Punkte
    177   287   365   576
s0[mm] iqr  e1[ppm]  e2[ppm] cosdiffAzimut ratioBetrag  output(FS)
0.56  0.02  0.294   0.140    1.00           0.998         0.8229

Kombination 1 oder 2 wählen oder selbst 4 Punkte eingeben? (1/2/3) [1]: 1
    
```

Punkte auf Hawaii, Tahiti und Samoa bilden den Block:

```

Block 5:
    177   236   287   576   365   344
    
```

Punkt 219 liegt nahe der Küste bei Kalifornien, die Vektoren dort zeigen zwar in dieselbe Richtung, die Beträge sind aber um einiges kürzer (RatioBetrag von 1.54).

```

Kombination 1 aus Fuzzy System 2:
Punkte
    177   236   287   576   365   344   219
s0[mm] iqr  e1[ppm]  e2[ppm] DiffAzimut[gon] RatioBetrag Output FS2
3.41  0.57  0.813   0.098    -5.41           1.538         0.6068
    
```

Somit führt die Hinzunahme von Punkt 219 zum Abbruch.

```

Output von Bewertung.fis:      0.6640

Input und Output von Entscheidung.fis:

  Output FS3      Output FS3      Ratio
letzter Schritt  aktueller Schritt
  0.4286          0.6640          0.6455

Output:      0.6477

Block beendet!
    
```

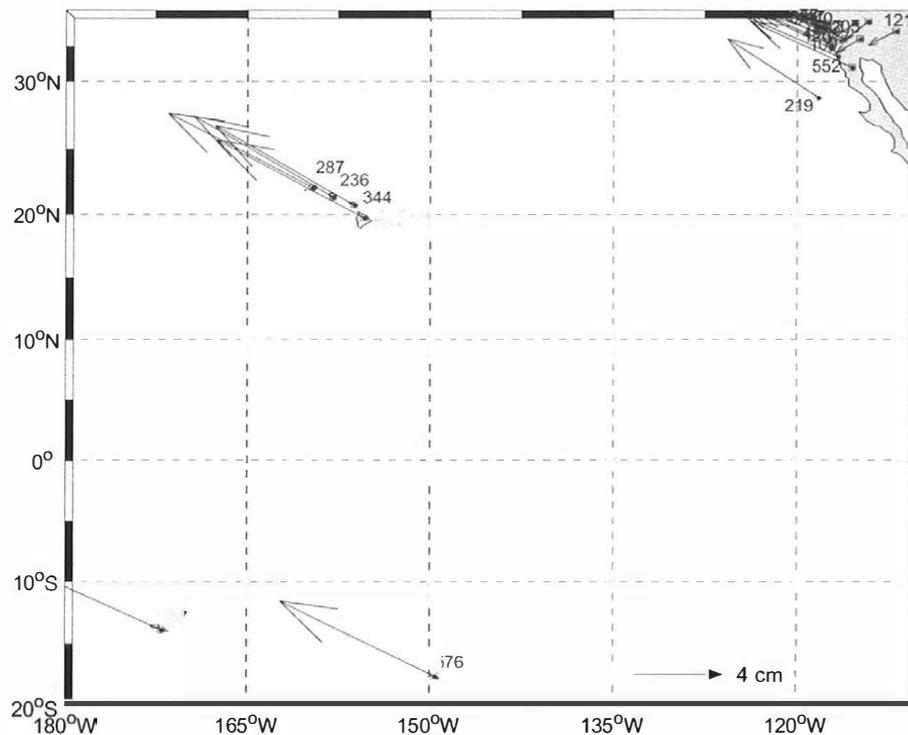


Abbildung 5.13: Hawaii und Pazifik-Punkte.

Die Zone von Nordost-Asien bis nach Japan und weiter im Westpazifik bis zur Antarktis ist bekanntlich ein tektonisch sehr aktives Gebiet. Gerade hier geben die offiziellen Stationsinformationen selten eine genaue Plattenzugehörigkeit an. Der Algorithmus zur Blockdetektion orientiert sich nur am Bewegungsmuster; das Muster des folgenden Blocks kann durch eine Rotation und einen größeren Maßstabsfaktor erklärt werden:

Kombination 1 aus Fuzzy System 1:

Punkte

	39	281	581	618			
s0[mm]	1.20	0.04	0.107	0.515	cosdiffAzimut	ratioBetrag	output (FS)
iqr					0.76	0.976	0.7792

Kombination 2 aus Fuzzy System 1:

Punkte

	100	120	456	613			
s0[mm]	0.52	0.01	8.179	0.095	cosdiffAzimut	ratioBetrag	output (FS)
iqr					1.00	0.961	0.7659

Kombination 1 oder 2 wählen oder selbst 4 Punkte eingeben? (1/2/3) [1]: 1

Block 6:

	39	281	581	618	678

Nur mehr Punkt 678 wird Block 6 zugerechnet, Punkt 601 führt zum begründeten und klaren Abbruch (Outputwert von 0.72), siehe Abbildung 5.14.

5 ANWENDUNGSBEISPIELE

Kombination 1 aus Fuzzy System 2:

Punkte

39 281 581 618 678 601

s0[mm]	iqr	e1[ppm]	e2[ppm]	DiffAzimut[gon]	RatioBetrag	Output FS2
11.59	0.88	0.025	1.016	41.04	0.378	0.4483

Output von Bewertung.fis: 0.7675

Input und Output von Entscheidung.fis:

Output FS3 letzter Schritt	Output FS3 aktueller Schritt	Ratio
0.6245	0.7675	0.8136

Output: 0.7208

Block beendet!

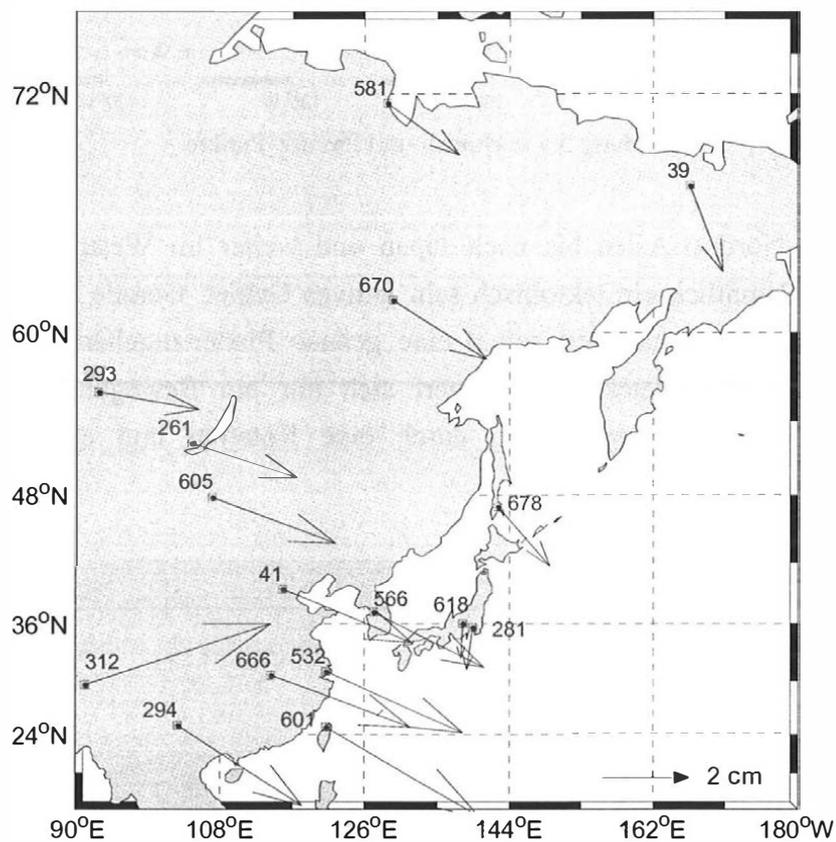


Abbildung 5.14: China und Ostasien.

Nun wird das dichte Stationsnetz des SCIGN (*Southern California Integrated GPS Network*) in Kalifornien untersucht:

5 ANWENDUNGSBEISPIELE

Kombination 1 aus Fuzzy System 1:

Punkte

100	120	456	613				
s0[mm]	iqr	e1[ppm]	e2[ppm]	cosdiffAzimut	ratioBetrag	output(FS)	
0.52	0.02	8.179	0.095	1.00	0.961	0.7659	

Kombination 2 aus Fuzzy System 1:

Punkte

73	120	219	552				
s0[mm]	iqr	e1[ppm]	e2[ppm]	cosdiffAzimut	ratioBetrag	output(FS)	
1.04	0.04	0.184	3.331	1.00	0.996	0.7441	

Kombination 1 oder 2 wählen oder selbst 4 Punkte eingeben? (1/2/3) [1]: 1

Block 7:

100	120	456	613	417	373	73	634	219	552	77	104
397	26	40									

Kombination 1 aus Fuzzy System 2:

Punkte

100	120	456	613	417	373	73	634	219	552	77	104
397	26	40	651	201							

s0[mm]	iqr	e1[ppm]	e2[ppm]	DiffAzimut[gon]	RatioBetrag	Output FS2	
3.17	1.00	0.152	4.187	8.02	1.355	0.6020	

Der letzte hinzugefügte Punkt ist 201, die Fuzzy Systeme 3 und 4 befinden diesen Punkt auch für gut passend (Abbruch nur 0.297). Allerdings sind danach keine benachbarten Punkte mehr verfügbar, und so muß der Block inklusive 201 beendet werden, siehe Abbildung 5.15.

Output von Bewertung.fis: 0.5028

Input und Output von Entscheidung.fis:

Output FS3	Output FS3	Ratio
letzter Schritt	aktueller Schritt	
0.4365	0.5028	0.8681

Output: **0.2972**

Keine benachbarten Punkte verfügbar!!
Block beendet!

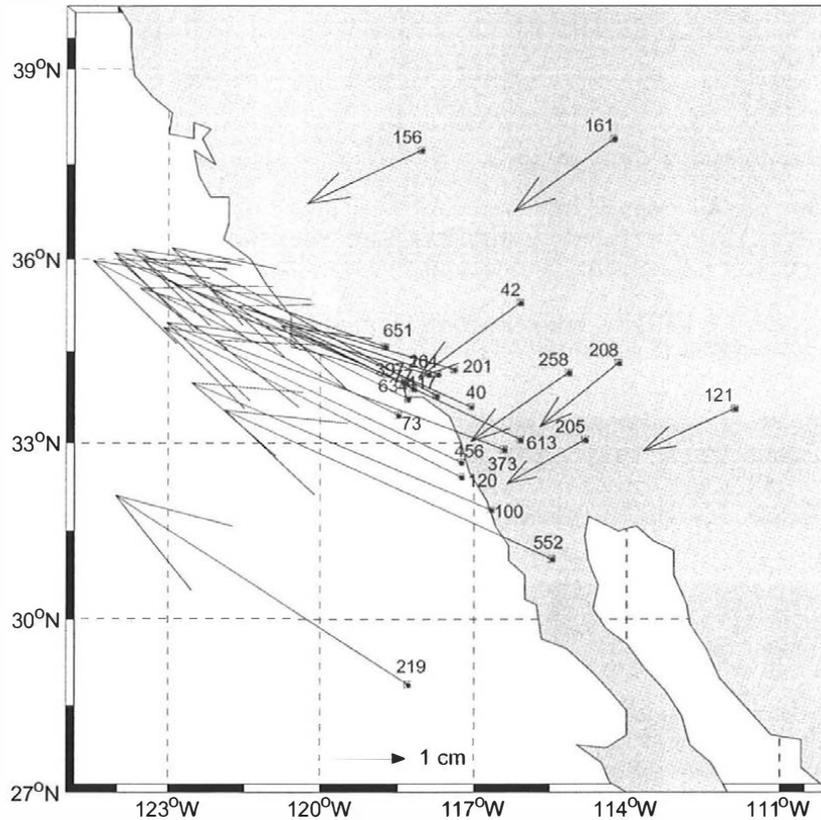


Abbildung 5.15: Pazifikküste, Grenze zur nordamerikanischen Platte (Kalifornien).

Einer der letzten Blöcke wird aus den Punkten der Antarktis gebildet. 5 Punkte dieser Platte stehen noch zur Verfügung, die auch zusammengefasst werden.

```

Kombination 1 aus Fuzzy System 1:
Punkte
    70  143  278  625
s0[mm] iqr  e1[ppm]  e2[ppm]  cosdiffAzimut  ratioBetrag  output(FS)
1.22  0.04  0.099   0.043   -0.07           1.118         0.6972

Kombination 2 aus Fuzzy System 1:
Punkte
    143  278  345  625
s0[mm] iqr  e1[ppm]  e2[ppm]  cosdiffAzimut  ratioBetrag  output(FS)
1.49  0.09  0.187   0.062   -0.11           1.095         0.6762

Kombination 1 oder 2 wählen oder selbst 4 Punkte eingeben? (1/2/3) [1]: 2

Block 8:
    143  278  345  625  70
    
```

Als Folgepunkt soll 331 aufgenommen werden, dieser wird aber wegen des enormen Unterschieds in der Länge der Vektoren (RatioBetrag von 0.229) klar verworfen (Abbruchsentscheidung mit 0.74).

5 ANWENDUNGSBEISPIELE

Kombination 1 aus Fuzzy System 2:

```
Punkte
  143  278  345  625   70  331
s0[mm] iqr  e1[ppm]  e2[ppm] DiffAzimut[gon] RatioBetrag Output FS2
13.94 1.00  0.693   0.135   10.72           0.229       0.5727
```

Output von Bewertung.fis: 0.7785

Input und Output von Entscheidung.fis:

```
Output FS3          Output FS3          Ratio
letzter Schritt    aktueller Schritt
  0.4871             0.7785             0.6257
```

Output: 0.7382

Block beendet!

Bei Betrachtung des Bewegungsmusters von Eurasien fällt auf, dass es in China einige Vektoren gibt, die eine etwas größere Bewegungsrate aufweisen. Tatsächlich existieren in China als einer tektonisch hochaktiven Zone einige kleinere Platten. Diese Punkte wurden nicht dem eurasischen Block zu Beginn zugeteilt. Sie bilden nun einen eigenen Block (siehe Abbildung 5.14):

Kombination 1 aus Fuzzy System 1:

```
Punkte
  294  532  601  666
s0[mm] iqr  e1[ppm]  e2[ppm] cosdiffAzimut ratioBetrag  output (FS)
1.60  0.14  2.592   0.424   0.99           1.039       0.6736
```

Kombination 2 aus Fuzzy System 1:

```
Punkte
  294  312  532  666
s0[mm] iqr  e1[ppm]  e2[ppm] cosdiffAzimut ratioBetrag  output (FS)
1.91  0.14  7.390   0.977   0.86           1.073       0.6423
```

Kombination 1 oder 2 wählen oder selbst 4 Punkte eingeben? (1/2/3) [1]: 1

Block 9:

```
294  532  601  666
```

Kombination 1 aus Fuzzy System 2:

```
Punkte
  294  532  601  666  312
s0[mm] iqr  e1[ppm]  e2[ppm] DiffAzimut[gon] RatioBetrag Output FS2
7.11  1.00  4.218   0.491   49.26           0.791       0.5046
```

Hier steht nur mehr Punkt 312 (Lhasa) zur Verfügung, um diesen Block zu erweitern; dieser Punkt wird bei Betrachtung der Vektoren aus verständlichen Gründen deutlich abgelehnt.

```

Output von Bewertung.fis:      0.7722

Input und Output von Entscheidung.fis:

  Output FS3          Output FS3          Ratio
letzter Schritt      aktueller Schritt
  0.5000              0.7722              0.6475

Output:      0.7362

Block beendet!

```

Nun folgt ein Block, der aus den Restpunkten der australischen Zone gebildet wird, siehe Abbildung 5.12.

```

Kombination 1 aus Fuzzy System 1:
Punkte
  21   289   331   432
s0[mm] iqr   e1[ppm]   e2[ppm] cosdiffAzimut ratioBetrag  output(FS)
17.18  1.00   1.106     2.215     0.73           0.969       0.5572

Kombination 1 oder 2 wählen oder selbst 4 Punkte eingeben? (1/2/3) [1]: 1

Keine benachbarten Punkte verfügbar!!
Block beendet!

```

Da diese Punkte am Rande des Gebietes liegen, stehen nun keine benachbarten Punkte mehr zur Verfügung; der Block wird beendet. Aus den bis jetzt nicht verwendeten Punkten kann kein weiterer 4-Punkt-Block gebildet werden, da diese Punkte nicht benachbart sind. Der Algorithmus endet also hier und gibt die nicht verwendeten Einzelpunkte aus.

```

Keine weitere 4-Punkte-Lösung vorhanden!

Algorithmus terminiert...

Nicht verwendete Einzelpunkte:
  114   195   297   312   496   500

```

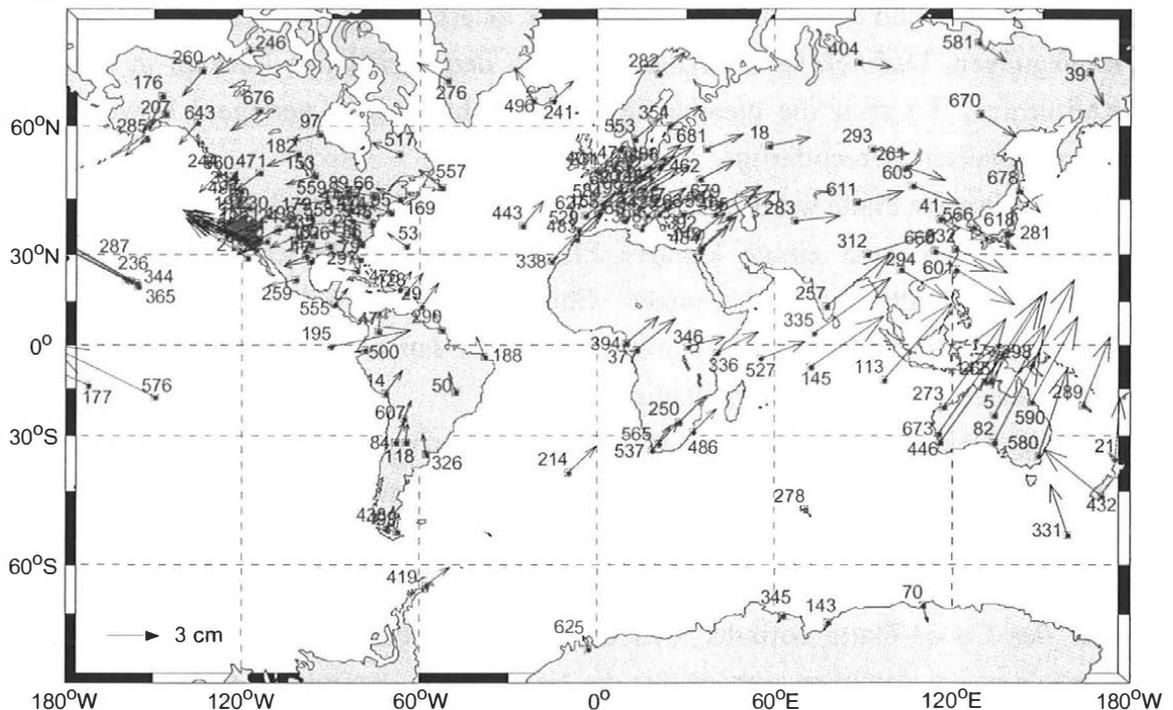


Abbildung 5.16: Globaler Überblick über die 186 verwendeten Punkte und Verschiebungsvektoren. Diese Darstellung entspricht Abbildung 5.7; für die Interpretation wurden die Punktnummern hinzugefügt.

5.3.3 Interpretation

Die tektonischen Platten (siehe Abbildung 5.8) werden beinahe vollständig mit dem implementierten Algorithmus erkannt. Als erster Block wurde die eurasische gemeinsam mit der afrikanischen Platte erfasst. Trotz der Kontinent-Kontinent-Kollision von Europa und Afrika sind die Bewegungsmuster so ähnlich, dass die beiden Kontinente vom Algorithmus nicht getrennt werden können. Einziger Schwachpunkt ist, dass Punkt 419 der Antarktis zu Afrika gruppiert wurde, was aber anhand des Bewegungsmusters eindeutig zu erklären ist.

Südamerika und die karibische Platte bilden den zweiten gefundenen Block. Wiederum ist das Muster der Karibik nicht unterschiedlich genug, um von Südamerika getrennt zu werden. Der Abbruch durch einen Punkt in Nordamerika ist allerdings sehr deutlich.

Auch Nordamerika wird bis auf zwei Punkte (siehe Einzelpunkte später) vollständig erkannt. Wichtig ist, dass die Abgrenzung zur pazifischen Platte, die ja bereits Kalifornien umfasst, richtig erkannt wurde.

Die indisch-australische Platte weist besonders große Verschiebungen auf. Hier reagierte das System sehr sensibel, indem der Abbruch bereits beim letzten zum Block gehörenden Punkt (289) erfolgte.

Hawaii, Tahiti und Samoa bilden einen Block innerhalb des Pazifiks mit sehr großen Bewegungen. Dadurch ist die Abgrenzung zu den pazifischen Punkten in und bei Kalifornien, die zwar die gleiche Bewegungsrichtung aber geringere Bewegungsraten aufweisen, gerechtfertigt.

Die antarktische Platte wurde trotz weniger Punkte vollständig erkannt.

Abbildung 5.8 zeigt einige kleinere Platten, wie z.B. die chinesische und die ochotskische Platte. Die Punkte Chinas wurden richtig gruppiert. Das Bewegungsmuster der Punkte Nordostasiens und Japans ist aufgrund der aktiven tektonischen Situation nicht eindeutig.

Weitere kleine Platten wie die ägäische, arabische, adriatische, iranische und philippinische Platte unterscheiden sich in ihrem Bewegungsverhalten kaum von den umgebenden größeren Platten. Da sich zumeist auch wenig Punkte auf diesen kleinen Platten befinden, ist eine Separation nicht möglich.

Auf der Cocos-Platte befindet sich ebenfalls kein Punkt; die Platte kann daher genauso wenig detektiert werden wie die Nazca-Platte, wo nur die Galapagos-Inseln mit einer GPS-Station ausgerüstet sind (Punkt 195). Daher befindet sich Punkt 195 richtigerweise bei den Einzelpunkten, die nach Terminierung des Algorithmus die verbliebenen Restpunkte bilden.

Bei genauer Betrachtung der anderen Einzelpunkte erscheint es klar, dass die Punkte 500 (Südamerika), 312 (Lhasa, Asien) hier als Restpunkte aufscheinen. Punkt 496 (Reykjavik, Island) liegt zwar auf der nordamerikanischen Platte, die Richtung des Bewegungsvektors ist allerdings verschieden. Die Punkte 114 und 297 liegen an der Ostküste der USA bzw. nahe Florida; bei genauer Betrachtung von Abbildung 5.11 erkennt man, dass diese Vektoren kürzer sind als die umgebenden. Dadurch wurden diese Punkte nicht in den nordamerikanischen Block aufgenommen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Überwachungsmessungen sind nach wie vor ein wichtiges Aufgabengebiet in der Ingenieurgeodäsie. Zur Auswertung quasistatischer Netzmessungen steht die Deformationsanalyse zur Verfügung, eine Methodik, die seit über 20 Jahren existiert, und für die die wissenschaftliche Entwicklung als abgeschlossen galt. Gerade in den letzten Jahren beschäftigten sich einige Arbeiten aber wieder mit der Deformationsanalyse; es wird versucht, die Vorgehensweise mit Hilfe moderner Methoden aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz (wissensbasierende Systeme, künstliche neurale Netzwerke, Fuzzy Methoden) zu erweitern.

Hier setzt auch die vorliegende Arbeit an. Für Aufgabenstellungen wie z.B. bei Hangrutschungen ist es erforderlich, aus gegebenen Verschiebungsdaten Blöcke mit ähnlichem Bewegungsmuster zu extrahieren. Dies war bei der quasistatischen Deformationsanalyse nicht möglich; eine manuelle bzw. visuelle Einteilung durch einen Experten konnte zwar statistisch akzeptiert oder verworfen werden, eine automatische Blockdetektion als Weiterführung der Deformationsanalyse existierte jedoch nicht.

Gerade bei Krustenbewegungen (Hangrutschungen, tektonische Deformationen) ist es sinnvoll, die Situation mittels einer Strainanalyse zu beurteilen, die Aussagen über den Deformationszustand eines Objekts treffen kann. Die theoretischen Grundlagen dafür wurden in Kapitel 2 gezeigt. Die Bewegung eines Objekts kann also in eine Starrkörperbewegung (Translation und Rotation) sowie eine innere Deformation (Strain) zerlegt werden. Die daraus berechneten Parameter wie z.B. die Halbachse der Strainellipse können wertvolle Hinweise bezüglich eines einheitlichen Bewegungsmusters geben.

Sehr wichtig ist auch die visuelle Einschätzung der gegebenen Verschiebungsvektoren. Bis jetzt war sie sogar die dominierende Komponente bei der manuellen Blockseparation. Diese menschliche Denkweise, die der Experte unbewusst beim Betrachten eines Diagramms mit Verschiebungsvektoren anwendet, kann nicht direkt implementiert werden; mit Hilfe von Fuzzy Methoden konnte die intuitive Vorgehensweise jedoch nachgebildet werden. So konnte die Ähnlichkeit von Vektoren anhand der vergleichbaren Länge und des Azimuts beschrieben werden. Daß Fuzzy Methoden für die Modellierung von linguistischer Unschärfe, von Alltagsdenken und Expertenwissen gut geeignet ist, zeigte einerseits die dahinterliegende Theorie (Kapitel 3) sowie der Aufbau und die Ergebnisse des

implementierten Algorithmus zur Detektion konsistenter Punktbewegungen (Kapitel 4 und 5).

Kapitel 4 zeigte dabei die Kernkomponenten des Algorithmus, die vier verschiedenen Fuzzy Systeme, die notwendig sind, um aus den gegebenen Verschiebungsvektoren die aussagekräftigsten Parameter über den Verformungszustand zu extrahieren und zu beurteilen. Dabei wurden zunächst Strainanalysen verwendet, um die Starrkörperbewegung sowie den inneren Deformationszustand zu ermitteln. Zusammen mit den wichtigen Aussagen über die Ähnlichkeit der Vektoren, konnte diese rein geometrische Untersuchung eine Blockseparation bewirken.

Die ausführlich dargestellten Beispiele in Kapitel 5 belegen die Vorgehensweise. Anhand des in der Literatur oftmals diskutierten Beispiels des Testnetzes Delft wurden die einzelnen Schritte des Algorithmus dargestellt. Ein lokales Beispiel einer Hangrutschungsüberwachung und der globale Anwendungsfall der Analyse der Plattentektonik zeigen das breite Anwendungsspektrum des Algorithmus.

Der Algorithmus wurde prinzipiell für das in der Einleitung skizzierte EU-Projekt OASYS entwickelt. Für die Anwendung bei rutschungsgefährdeten Hängen muß in Zukunft bereits bei der Planung des Überwachungsnetzes auf eine genügend große Punktzahl geachtet werden, damit die Voraussetzung von mindestens vier Punkten pro Block erfüllt ist.

Der Algorithmus ist bewusst einfach und nur geometrisch gehalten worden. Dadurch ist ein breites Anwendungsspektrum, vor allem auch außerhalb der Analyse von Krustenbewegungen, denkbar. Untersuchungen an künstlichen Strukturen wie z.B. die Beurteilung des Deformationsverhaltens von Betonfertigteilen, z.B. aus Laserscannermessungen, wären somit (eventuell mit kleinen Korrekturen in den Wertebereichen von e_1 und e_2) vorstellbar.

Natürlich sind weitgreifendere Erweiterungen des Algorithmus möglich. Ein erster Ansatz wäre die Hinzunahme einer distanzabhängigen Nachbarschaftsberechnung. Dadurch könnten Randeffekte in der Delaunay-Triangulation vermieden werden.

Weiters kann die rein geometrische Untersuchung erweitert werden: beispielsweise helfen geologische Parameter wie Hangneigung, Untergrundeigenschaften usw., die Bedingungen im Untergrund zu erfassen. Ein Beispiel für eine nicht geodätische Anwendung zeigen (BRAUNER, GANAHL, 1999), wo Einflüsse der Geohydrologie, der Topographie sowie der Geologie auf oberflächennahe Hangbewegungen in Wildbacheinzugsgebieten untersucht werden.

Es soll zum Schluß angemerkt werden, dass die Verwendung von Fuzzy Methoden und anderen Verfahren der Künstlichen Intelligenz keine Revolution in der Geodäsie auslösen soll und wird. Funktionierende, bewährte Methoden und Formelwerke sollten sich behaupten können; wo allerdings bis heute keine Lösung für ein bestimmtes Problem gefunden werden konnte, wie z.B. bei der an die quasistatische Deformationsanalyse anschließenden Blockdetektion, ist es sinnvoll, einen Einsatz der modernen Methoden zu versuchen. Zahlreiche Arbeiten der letzten Jahre, die den erfolgreichen Einsatz belegen, wurden bereits in Kapitel 1 dargestellt.

Literaturverzeichnis

- ANTONOPOULOS A. (1985): *Zur Formulierung und Überprüfung von Deformationsmodellen*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 138.
- BANDEMER H., NÄTHER W. (1992): *Fuzzy Data Analysis*. Theory and Decision Library, Series B: Mathematical and Statistical Methods, Volume 20. Kluwer Verlag, Dordrecht, Boston, London.
- BANDEMER H., GOTTWALD S. (1993): *Einführung in Fuzzy-Methoden*. 4. Auflage, Akademie Verlag, Berlin.
- BANDEMER H. (1997): *Ratschläge zum mathematischen Umgang mit Ungewißheit*. Teubner Verlag, Stuttgart.
- BECKER E., BÜRGER W. (1975): *Kontinuumsmechanik*. Verlag Teubner, Stuttgart.
- BOL G. (1993): *Deskriptive Statistik*. Odenbourg Verlag, München.
- BOLJEN J. (1983): *Ein dynamisches Modell zur Analyse und Interpretation von Deformationen*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 122.
- BORRE K., WELSCH W. (Hrsg.) (1982): *Proceedings Survey Control Networks*. Schriftenreihe Wissenschaftlicher Studiengang Vermessungswesen Hochschule der Bundeswehr München, Heft Nr. 7.
- BOUCHER C., ALTAMIMI Z., SILLARD P., FEISSEL-VERNIER M. (2004): *The ITRF2000*. IERS Technical Notes No. 31, in print.
- BRAUNER M. (2001): *Aufbau eines Expertensystems zur Erstellung einer ereignisbezogenen Feststoffbilanz in einem Wildbacheinzugsgebiet*. Dissertation, Institut für Forstliches Ingenieurwesen und Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien.
- BRAUNER M., GANAHL E. (1999): *GIS-basiertes Expertensystem zur Risikobewertung von Hanggleitungen in Wildbacheinzugsgebieten*. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), Heft 2+3/1999.
- BREZING A. (2000): *Entwicklung eines Expertensystems zur wissensbasierten Deformationsanalyse*. Veröffentlichung des Geodätischen Instituts der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Nr. 59.
- BRUNNER F.K. (1979): *On the Analysis of geodetic Networks for the Determination of the incremental Strain Tensor*. Survey Review, Vol. XXV, No. 192, pp 56-67.
- BRUNNER F.K., COLEMAN R., HIRSCH B. (1981): *A comparison of computation methods for crustal strains from geodetic measurements*. Tectonophysics, 71 (1981), pp 281-298.

- BRUNNER F.K., COLEMAN R. (1989): *Strain effects near Palmdale associated with the San Fernando Earthquake*. Journal of Geophysical Research, Vol. 94, No. B5, pp 5651-5658.
- CASPARY W., SCHWINTZER P. (1981): *Bestimmung von Einzelpunktbewegungen und von Relativbewegungen zweier Netzteile in geodätischen Deformationsnetzen*. Zeitschrift für Vermessungswesen, 106. Jahrgang, Heft 6.
- CASPARY W., WELSCH W. (Hrsg.) (1979): *Seminar über Deformationsanalysen*. Schriftenreihe Wissenschaftlicher Studiengang Vermessungswesen Hochschule der Bundeswehr München, Heft Nr. 4.
- CHRZANOWSKI A., CHEN Y.Q. (1986): *Report of the Ad Hoc Committee on the analysis of deformation surveys*. Proceedings of the XVIII th International FIG Congress, Toronto, June 1-11, Paper 608.1.
- CHRZANOWSKI A., DING X., ROBERTS G., WHITAKER C. (2003): *Goals and Achievements of FIG Working Group WG6.1 – Deformation Measurements and Analysis*. Proceedings of the 11th International FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece, May 25-28.
- FILZMOSE P. (2002): *Robuste Statistik*. Skriptum zur gleichnamigen Vorlesung an der Technischen Universität Wien.
- GRAUEL A. (1995): *Fuzzy-Logik*. BI-Wissenschaftsverlag, Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich.
- GUOHUA G., PRESCOTT W.H. (1986): *Discussion on Displacement Analysis: Detection of Crustal Deformation*. Journal of Geophysical Research, Vol. 91, No. B7, pp 7439 - 7446.
- HECK B., KUNTZ E., MEIER-HIRMER B. (1977): *Deformationsanalyse mittels relativer Fehlerellipsen*. Allgemeine Vermessungsnachrichten, Heft 3.
- HECK B. (1981): *Die Verwendung relativer Fehlerellipsen zur Analyse von Deformationsmessungen*. In: Proceedings of the II. International Symposium of Deformation Measurements by Geodetic Methods, Bonn/Germany, September 25 to 28, 1978, Wittwer Verlag, Stuttgart.
- HEINE K. (1999): *Beschreibung von Deformationsprozessen durch Volterra- und Fuzzy-Modelle sowie Neuronale Netze*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 516, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.
- HEUNECKE O. (1995): *Zur Identifikation und Verifikation von Deformationsprozessen mittels adaptiver KALMAN-Filterung (Hannoversches Filter)*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 208.
- JAEGER J.C. (1971): *Elasticity, Fracture and Flow: With Engineering and Geological Applications*. Science Paperbacks by Chapman and Hall, London.
- JIANG Zh., ZHANG Zh. (1999): *Identifying the deformation model by using topological constraints*. Selected Papers for English Edition of Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, pp 29-35.

- KAHLERT J., FRANK H. (1993): *Fuzzy-Logik und Fuzzy-Control*. Vieweg Verlag, Braunschweig, Wiesbaden.
- KAHMEN H., NIEMEIER W. (2003): *OASYS – Integrated Optimization of Landslide Alert Systems*. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 91. Jahrgang, Heft 1/2003.
- KANANI E. (2000): *Robust Estimators for Geodetic Transformations and GIS*. Mitteilungen Nr. 70, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Zürich.
- KERSTING N., WELSCH W. (Hrsg.) (1989): *Rezente Krustenbewegungen*. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Heft Nr. 39.
- KERSTING N. (1992): *Zur Analyse rezenter Krustenbewegungen bei Vorliegen seismotektonischer Dislokationen*. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Heft Nr. 42.
- KLETT (2004): Terra-Alexander-Datenbank, Klett-Perthes, www.klett-verlag.de
- KRAUTER E., PELZER H., SPELLAUGE R. (1996): *Ingenieurgeologische und ingenieurgeodätische Methoden zur Erfassung und Beschreibung von Hangrutschungen am Beispiel eines Großrutschareals nordöstlich von Quito*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 216.
- KRUSE R., GEBHARDT J., KLAWONN F. (1995): *Fuzzy Systeme*. Teubner Verlag, Stuttgart.
- KUTTERER H. (2002): *Zum Umgang mit Ungewissheit in der Geodäsie – Bausteine für eine neue Fehlertheorie*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 553, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.
- LEHMKÜHLER H. (1993): *Die geodätische Deformationsanalyse als Mustererkennungsaufgabe*. Veröffentlichung des Geodätischen Instituts der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Nr. 49.
- LEINEN S. (2001): *Fuzzy-Logic based GPS On-the-Fly Ambiguity Search*. In: Proceedings of the First International Symposium on Robust Statistics and Fuzzy Techniques in Geodesy and GIS. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Bericht Nr. 295, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- MATLAB (2003): *Matlab Online Hilfe*. Dokumentation zu Matlab 6.5.1, The MathWorks Inc.
- MAYER A., MECHLER B., SCHLINDWEIN A., WOLKE R. (1993): *Fuzzy Logic*. Addison-Wesley, Bonn.
- MIIMA J.-B. (2002): *Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic Techniques for the Reconstruction of Structural Deformations*. Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig, Nr. 18.

- MILEV G. (1973): *Ausgleichung, Analyse und Interpretation von Deformationsmessungen*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 192, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.
- MILEV I. (2001): *Integrierte Modelle zur physikalischen Interpretation geodätischer Deformationsuntersuchungen*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 540, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.
- NEITZEL F. (2004): *Identifizierung konsistenter Datengruppen am Beispiel der Kongruenzuntersuchung geodätischer Netze*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 565, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.
- NIEMEIER W. (1979): *Zur Kongruenz mehrfach beobachteter geodätischer Netze*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 88.
- NIEMEIER W. (1985): *Anlage von Überwachungsnetzen*. In: PELZER H. (Hrsg.): *Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II*. Wittwer Verlag, Stuttgart.
- NIEMEIER W. (2002): *Ausgleichsrechnung*. de Gruyter, Berlin, New York.
- NKUIE G. (1998): *Ausgleichung mit singulärer Varianzkovarianzmatrix am Beispiel der geometrischen Deformationsanalyse*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 501, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.
- OASYS (2004): Plattform zum Projekt OASYS. www.vce.at/oasys.
- PANDA (2000): Programm zur Ausgleichung von geodätischen Netzen und zur Deformationsanalyse. Geotec GmbH, Laatzen.
- PARISCH H. (2003): *Festkörper-Kontinuumsmechanik*. Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden.
- PELZER H. (1971): *Zur Analyse geodätischer Deformationsmessungen*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 164, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.
- PELZER H. (Hrsg.) (1980): *Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung*. Wittwer Verlag, Stuttgart.
- PELZER H., MILEV G. (Hrsg.) (1984): *Untersuchungen zur geodätischen Bestimmung von Rutschungserscheinungen und vertikalen Krustenbewegungen*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 133.
- PELZER H. (Hrsg.) (1985): *Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II*. Wittwer Verlag, Stuttgart.
- PELZER H. (Hrsg.) (1987): *Ingenieurvermessung: Deformationsmessungen, Massenberechnung*. Wittwer Verlag, Stuttgart.
- PRESCOTT W.H., SAVAGE J.C. (1976): *Strain Accumulation on the San Andreas Fault near Palmdale, California*. Journal of Geophysical Research, Vol. 81, No. 26, pp 4901 - 4908.

- PRESCOTT W.H. (1981): *The Determination of Displacement Fields From Geodetic Data Along a Strike Slip Fault*. Journal of Geophysical Research, Vol. 86, No. B7, pp 6067 - 6072.
- RAWIEL P. (2001): *Dreidimensionale kinematische Modelle zur Analyse von Deformationen an Hängen*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 533, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.
- RITTER B. (1982): *Untersuchungen geodätischer Netze in Island zur Analyse von Deformationen von 1965 bis 1977*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 271, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.
- SALBACH H. (2000): *Bestimmung und Analyse von Krustendeformationen im Bereich der antarktischen Halbinsel*. Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig, Nr. 15.
- SALER H. (1995): *Erweiterte Modellbildung zur Netzausgleichung für die Deformationsanalyse dargestellt am Beispiel der Geotraverse Venezolanische Anden*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 447, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.
- SCHNEIDER D. (1982): *Complex Crustal Strain Approximation*. Mitteilungen Nr. 33 des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.
- SEISING R. (Hrsg.) (1999): *Fuzzy Theorie und Stochastik*. Vieweg Verlag, Braunschweig, Wiesbaden.
- STRAUB Ch. (1996): *Recent Crustal Deformation and Strain Accumulation in the Marmara Sea Region, N.W. Anatolia, inferred from GPS Measurements*. Mitteilungen Nr. 58 des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.
- STRUBECKER K. (1966): *Einführung in die Höhere Mathematik*. Band 1: Grundlagen, R. Oldenbourg-Verlag, München.
- TILLI T. (1993): *Fuzzy-Logik*. Franzis-Verlag, München.
- TSENKOV T., GOSPODINOV S. (2002): *Determination of 2D-tectonic deformations using affine transformation*. Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 4.
- TUKEY J.W. (1977): *Box-and-Whisker Plots*. §2C in: Explanatory Data Analysis, Addison-Wesley, Reading.
- VAN KHOAN N. (1992): *Kinematische Modelle zur Erfassung von Hangrutschungen unter besonderer Berücksichtigung des erweiterten KALMAN-Filters*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 181.
- VOGEL M. (1995): *Analyse der GPS-Alpentraverse – Ein Beitrag zur geodätischen Erfassung rezenter Erdkrustenbewegungen in der Ostalpen*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 436, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.

- WEISSTEIN E. (2004): *Box-and-Whisker Plot*. From MathWorld – A Wolfram Web Resource. <http://mathworld.wolfram.com/Box-and-WhiskerPlot.html>.
- WELSCH W. (1981): *Gegenwärtiger Stand der geodätischen Analyse und Interpretation geometrischer Deformationen*. Allgemeine Vermessungsnachrichten, 88. Jahrgang, Heft 2.
- WELSCH W. (1982a): *Zur Beschreibung homogenen Strains oder Einige Betrachtungen zur affinen Transformation*. Zeitschrift für Vermessungswesen, 107. Jahrgang, Heft 5.
- WELSCH W. (1982b): *Description of homogeneous horizontal strains and some remarks to their analysis*. In: Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Heft 258/V, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.
- WELSCH W. (Hrsg.) (1983): *Deformationsanalysen '83*. Schriftenreihe Wissenschaftlicher Studiengang Vermessungswesen Hochschule der Bundeswehr München, Heft Nr. 9.
- WELSCH W. (1984): *Invarianzeigenschaften von Strainparametern*. In: Caspary W., Schödlbauer A., Welsch W. (Hrsg): Beiträge aus dem Institut für Geodäsie, Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Hochschule der Bundeswehr München, Heft 10.
- WELSCH W., HEUNECKE O., KUHLMANN H. (2000): *Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen*. Wichmann Verlag, Heidelberg.
- WIESER A. (2002): *Robust and fuzzy techniques for parameter estimation and quality assessment in GPS*. Shaker Verlag, Aachen.
- WOLFRUM O. (1978): *Die Verzerrungseigenschaften der affinen Transformation*. Allgemeine Vermessungsnachrichten, Heft 10.
- ZIMMERMANN J. (2004): *Konzeption und Umsetzung eines Informationssystems zur geodätischen Deformationsanalyse*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 574, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.

Lebenslauf

Name	Michaela Haberler
geboren am	17. September 1974 in Neunkirchen, NÖ
Vater	Johann Haberler, KFZ-Mechaniker
Mutter	Franziska Haberler, geb. Foidl, Angestellte
Geschwister	Andreas, geb. 1980
1980 – 1984	Besuch der Volksschule Wartmannstetten
1984 – 1992	Besuch des Bundesgymnasiums Neunkirchen
Juni 1992	Reifeprüfung mit ausgezeichnetem Erfolg
Oktober 1992	Inskription des Kurzstudiums der Datentechnik an der TU Wien
Oktober 1995	Inskription des Studiums Vermessungswesen an der TU Wien
16. Dezember 1997	1. Diplomprüfung mit ausgezeichnetem Erfolg
28. April 2000	2. Diplomprüfung mit ausgezeichnetem Erfolg
seit Juni 2000	Beschäftigung als Vertragsassistentin am Institut für Geodäsie und Geophysik, Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie, TU Wien
28. Oktober 2004	Rigorosum mit ausgezeichnetem Erfolg
ab Jänner 2005	Beschäftigung als Universitätsassistentin am Institut für Geodäsie und Geophysik, Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie, TU Wien

GEOWISSENSCHAFTLICHE MITTEILUNGEN

Bisher erschienen:

- Heft 1 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen. 1970-1973, Dezember 1976.
- Heft 2 EGGER-PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Taschenrechner HP 45 und HP 65, Programme und Anwendungen im Vermessungswesen. 1. Auflage, März 1974, Special Edition in English Juli 1974, 2. verbesserte Auflage, November 1974.
- Heft 3 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen. 1973-1974, September 1974.
- Heft 4 EGGER-PALFINGER-PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Tektronix-Tischrechner TEK 31, Programmbibliothek für den Einsatz im Vermessungswesen, November 1974.
- Heft 5 K. LEDERSTEGGER, Die horizontale Isostasie und das isostatische Geoid, Februar 1975.
- Heft 6 F. REINHART, Katalog von FK4 Horrebow-Paaren für Breiten von +30 bis +60, Oktober 1975.
- Heft 7 Arbeiten aus dem Institut für Höhere Geodäsie, Wien, Dezember 1975.
- Heft 8 Veröffentlichungen des Instituts für Photogrammetrie zum XIII. Internationalen Kongreß für Photogrammetrie in Helsinki 1976, Wien, Juli 1976.
- Heft 9 W. PILLEWIZER, Felsdarstellung aus Orthophotos, Wien, Juni 1976.
- Heft 10 PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Der Einsatz des programmierbaren Taschenrechners Texas Instruments SR-52 mit Drucker PC100 in der ingenieurgeodätischen Rechentechnik Wien, Mai 1976.
- Heft 11 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen. 1974-1976, November 1976.
- Heft 12 Kartographische Vorträge der Geodätischen Informationstage 1976, Wien, Mai 1976.
- Heft 13 Veröffentlichungen des Instituts für Photogrammetrie anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Dr. h.c. K. Neumaier, Wien, Januar 1978.
- Heft 14 L. MOLNAR, Self Checking Analytical Relative Orientation and Strip Formation, Wien, Dezember 1978.
- Heft 15 Veröffentlichungen des Instituts für Landesvermessung anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Dr. Alois Bavir, Wien, Januar 1979.
- Heft 16 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen. 1976-1978, November 1979.
- Heft 17 E. VOZIKIS, Die photographische Differentialumbildung gekrümmter Flächen mit Beispielen aus der Architekturbildmessung, Wien, Dezember 1979.
- Heft 18 Veröffentlichungen des Instituts für allgemeine Geodäsie anlässlich des 75. Geburtstages von Prof. Dipl.-Ing. Dr. F. Hauer, Die Höhe des Großglockners, Wien, 1981.
- Heft 19 H. KAGER, Bündeltriangulation mit indirekt beobachteten Kreiszentren, Wien, April 1981.
- Heft 20 Kartographische Vorträge der Geodätischen Informationstage 1980, Wien, Mai 1982.
- Heft 21 Veröffentlichungen des Instituts für Kartographie anlässlich des 70. Geburtstages von Prof. Dr. Wolfgang Pillewizer: Glaziologie und Kartographie, Wien, Dezember 1982.

- Heft 22 K. TEMPFLI, Genauigkeitsschätzung digitaler Höhenmodelle mittels Spektralanalyse, Wien, Mai 1982.
- Heft 23 E. CSAPLOVICS, Interpretation von Farbinfrarotbildern, Wien, November 1982.
- Heft 24 J. JANSKA, Rektifizierung von Multispektral-Scanneraufnahmen - Entwicklung und Erprobung eines EDV-Programms, Wien, Mai 1983.
- Heft 25 Zusammenfassung der Diplomarbeiten, Dissertationen und Habilitationen an den geodätischen Instituten der TU Wien, Wien, November 1984.
- Heft 26 T. WUNDERLICH, Die voraussetzungsfree Bestimmung von Refraktionswinkeln, Wien, August 1985.
- Heft 27 G. GERSTBACH (Hrsg.), Geowissenschaftliche/geotechnische Daten in Landinformationssystemen - Bedarf und Möglichkeiten in Österreich, Juni 1986.
- Heft 28 K. NOVAK, Orientierung von Amateuraufnahmen ohne Paßpunkte, Wien, August 1986.
- Heft 29 Veröffentlichungen des Instituts für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie, Abt. Ingenieurgeodäsie, anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Dipl.-Ing. Dr. F. Hauer, Wien, Oktober 1986.
- Heft 30 K.-H. ROCH, Über die Bedeutung dynamisch ermittelter Parameter für die Bestimmung von Gesteins- und Gebirgseigenschaften, Wien, Februar 1987.
- Heft 31 G. HE, Bildverbesserung mittels digitaler Filterung, Wien, April 1989.
- Heft 32 F. SCHLÖGELHOFER, Qualitäts- und Wirtschaftlichkeitsmodelle für die Ingenieurphotogrammetrie, Wien, April 1989.
- Heft 33 G. GERSTBACH (Hrsg.), Geowissenschaftliche/geotechnische Daten in Landinformationssystemen - Datenbestände und Datenaustausch in Österreich, Wien, Juni 1989.
- Heft 34 F. HOCHSTÖGER, Ein Beitrag zur Anwendung und Visualisierung digitaler Geländemodelle, Wien, Dezember 1989.
- Heft 35 R. WEBER, Lokale Schwerefeldmodellierung unter Berücksichtigung spektraler Methoden zur Geländereduktion, Wien, April 1990.
- Heft 36 o. Prof. Dr. Hans Schmid zum 70. Geburtstag. Veröffentlichung der Abteilung für Landesvermessung, Wien, Oktober 1990.
- Heft 37 G. GERSTBACH, H. P. HÖLLRIEGL und R. WEBER, Geowissenschaftliche Informationsbörse - Eine Nachlese zur GeoLIS II, Wien, Oktober 1990.
- Heft 38 R. ECKER, Rastergraphische Visualisierungen mittels digitaler Geländemodelle, Wien, August 1991.
- Heft 39 Kartographische Forschungen und anwendungsorientierte Entwicklungen, herausgegeben von W. Stams und F. Kelnhofer zum 80. Geburtstag von Prof. Dr. W. Pillewizer, Wien, Juli 1991.
- Heft 39a W. RIEGER, Hydrologische Anwendungen des digitalen Geländemodelles, Wien, Juli 1992.
- Heft 40 K. STEINNOCHER, Methodische Erweiterungen der Landnutzungs-klassifikation und Implementierung auf einem Transputernetzwerk, Wien, Juli 1994.
- Heft 41 G. FORKERT, Die Lösung photogrammetrischer Orientierungs- und Rekonstruktionsaufgaben mittels allgemeiner kurvenförmiger Elemente, Wien, Juli 1994.

- Heft 42 M. SCHÖNER, W. SCHÖNER, Photogrammetrische und glaziologische Untersuchungen am Gsbre (Ergebnisse der Spitzbergenexpedition 1991), Wien, Mai 1996.
- Heft 43 M. ROIC, Erfassung von nicht signalisierten 3D-Strukturen mit Videotheodoliten, Wien, April 1996.
- Heft 44 G. RETSCHER, 3D-Gleiserfassung mit einem Multisensorsystem und linearen Filterverfahren, Wien, April 1996.
- Heft 45 W. DAXINGER, Astrogravimetrische Geoidbestimmung für Ingenieurprojekte, Wien, Juli 1996.
- Heft 46 M. PLONER, CCD-Astrometrie von Objekten des geostationären Ringes, Wien, November 1996.
- Heft 47 Zum Gedenken an Karl Killian „Ingenieur“ und „Geodät“ 1903-1991, Veröffentlichung der Fachgruppe Geowissenschaften, Wien, Februar 1997.
- Heft 48 A. SINDHUBER, Ergänzung und Fortführung eines digitalen Landschaftsmodelles mit multispektralen und hochauflösenden Fernerkundungsaufnahmen, Wien, Mai 1998.
- Heft 49 W. WAGNER, Soil Moisture Retrieval from ERS Scatterometer Data, Wien, Dezember 1998.
- Heft 50 R. WEBER, E. FRAGNER (Editoren), Prof. Bretterbauer, Festschrift zum 70. Geburtstag, Wien, Juli 1999.
- Heft 51 Ch. ÖHRENER, A Similarity Measure for Global Image Matching Based on the Forward Modeling Principle, Wien, April 1999.
- Heft 52 M. LECHTHALER, G. GARTNER (Hrsg.), Per Aspera ad Astra, Festschrift für Fritz Kelnhofer zum 60. Geburtstag, Wien, Jänner 2000.
- Heft 53 F. KELNHOFER, M. LECHTHALER (Hrsg.), Interaktive Karten (Atlanten) und Multimedia-Applikationen, Wien, März 2000.
- Heft 54 A. MISCHKE, Entwicklung eines Videotheodolit-Meßsystems zur automatischen Richtungsmessung von nicht signalisierten Objektpunkten, Wien, Dezember 2000.
- Heft 55 Veröffentlichung des I.P.F. anlässlich der Emeritierung von Prof. Dr. Peter Waldhäusl, Wien, September 2001.
- Heft 56 F. ROTTENSTEINER, Semi-automatic Extraction of Buildings Based on Hybrid Adjustment Using 3D Surface Models and Management of Building Data in a TIS, Wien, Mai 2001.
- Heft 57 D. LEGENSTEIN, Objektrekonstruktion aus perspektiven Bildern unter Einbeziehung von Umrisslinien, Wien, Juli 2001.
- Heft 58 F. KELNHOFER, M. LECHTHALER und K. BRUNNER (Hrsg.), Telekartographie und Location Based Services, Wien, Jänner 2002.
- Heft 59 K. BRETTERBAUER, Die runde Erde eben dargestellt: Abbildungslehre und sphärische Kartennetzentwürfe, Wien, 2002.
- Heft 60 F. KELNHOFER und K. BRUNNER (Hrsg.), Maps and the Internet, Wien, 2002
- Heft 61 L. DORFFNER, Erzeugung von qualitativ hochwertigen 3D Photomodellen für internetbasierte Anwendungen mit besonderem Augenmerk auf Objekte der Nahbereichsphotogrammetrie, Wien, 2002
- Heft 62 K. CHMELINA, Wissensbasierte Analyse von Verschiebungsdaten im Tunnelbau, Wien, 2002
- Heft 63 A. NIESSNER, Qualitative Deformationsanalyse unter Ausnutzung der Farbinformation, Wien, 2003

- Heft 64 K. BRETTERBAUER, R. WEBER, A Primer of Geodesy for GIS Users, Second, revised and extended edition, Wien, 2003
- Heft 65 N. PFEIFER, 3D Terrain Models on the Basis of a Triangulation, Wien, 2002
- Heft 66 G. GARTNER (Hrsg), Location Based Services & Telecartography, Wien, 2004
- Heft 67 I. KABASHI, Gleichzeitig-gegenseitige Zenitwinkelmessung über größere Entfernungen mit automatischen Zielsystemen, Wien, 2004
- Heft 68 J.BÖHM, Troposphärische Laufzeitverzögerungen in der VLBI, Wien 2004
- Heft 69 R.WEBER, W.SCHLÜTER, U.SCHREIBER, O. TITOV, Evolving Space Geodesy Techniques (EGS XXVII General Assembly, Nice, France, 2002), Wien 2004
- Heft 70 G. WEINWURM, Amalthea's Gravity Field and its Impact on a Spacecraft Trajectory, Wien 2004
- Heft 71 Festschrift anlässlich des 65. Geburtstages von Herrn o. Univ. Prof. Dr.-Ing. Heribert Kahmen, Wien 2005
- Heft 72 A. REITERER, A Knowledge-Based Decision System for an On-Line Videotheodolite-Based Multisensor System, Wien 2005