



DISSERTATION

Konzeptionierung und Validierung eines nationalen Bezugsnormals zur Darstellung der physikalischen Einheit Newton

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaften - Maschinenbau
unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dipl. Ing. Dr. Friedrich Bleicher

E311, Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Dipl. Ing. (FH) Christian Buchner M.Sc.

Matr.- Nr. 84 06512

Wien, im Oktober 2015

Christian Buchner

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

DISSERTATION

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiter an Eides statt, dass ich meine Dissertation nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrundegelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich diese Dissertation bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin / einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Oktober . 2015

Christian Buchner

DANKSAGUNG

Im Zuge umfangreicher Modernisierungen im Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen um das Jahr 2010 wurde für die Gruppe Eichwesen ein Laborgebäude neu errichtet und nach den Bedürfnissen einer modernen Metrologie dem Stand der Technik angepasst. Der seitens des BEV für den Neubau Beauftragte und jetzige Leiter der Gruppe Eichwesen, Mag. Robert Edelmaier, hat dabei die Möglichkeit ergriffen, den Austausch der nicht mehr zeitgemäßen Anlage zur Darstellung der Kraft des BEVs zu projektieren. Kollege Mag. Edelmaier hat mich nicht nur mit diesem Projekt betraut, sondern er hat auch auf meine Kompetenz und die erfolgreiche Umsetzung vertraut. Dafür möchte ich an dieser Stelle ihm und auch meinen mir zur Seite stehenden Kollegen im BEV meinen Dank ausdrücken.

Mein Dank gilt aber auch meinen Kollegen vom Institut für Fertigungstechnik unter der Leitung von Dipl. Ing. (FH) Thomas Mikats, Dipl. Ing. Johannes Bernreiter, Dipl. Ing. Christoph Einspieler und Univ. Prof. Dr. Friedrich Bleicher, die alle in unzähligen Stunden zur Entwicklung und Realisierung einer Kraftnormalanlage und somit zum Gelingen dieses Projektes beigetragen haben.

An gleicher Stelle möchte ich meine Dankbarkeit auch meinen Kollegen von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig, dem ehemaligen Leiter der Abteilung Mechanik und Akustik und jetzigen Vizepräsident der PTB, Prof. Dr. Ing. Roman Schwartz und der Arbeitsgruppe Kraft unter der Leitung von Dr. Rolf Kümme ausdrücken. Das gesamte Team stand mir immer, oft auch mit erheblichem Aufwand, mit Rat und Tat zur Seite und hat somit entscheidend zur internationalen Anerkennung dieser Anlage beigetragen.

Ganz herzlich möchte ich mich auch bei den Betreuern und Begutachtern meiner Dissertation, Univ. Prof. Dr. Friedrich Bleicher und Univ.-Prof. Dr. Franz Josef Maringer bedanken. Beide haben mir ihre Unterstützung in der Fortsetzung meiner akademischen Karriere zugesagt und waren daher wesentlich an meinem persönlichen Erfolg bei diesem Projekt beteiligt.

Den größten Beitrag zum Gelingen dieses Projektes hat aber meine gesamte Familie, voran meine Frau und meine Kinder geleistet. Sie zeigten nicht nur Verständnis für meine allgegenwärtige Arbeit und die viele Zeit, die ich für dieses Projekt aufbringen musste, sondern hatten mich auch stets motiviert, alle zur Verfügung stehenden Möglichkeiten zur erfolgreichen Beendigung des Vorhabens auszuschöpfen und mich direkt und indirekt unterstützt, wo es ihnen nur möglich war.

Oktober, 2015
Christian Buchner

Zusammenfassung

Jedes Nationale Metrologieinstitut (NMI) ist verpflichtet, für die gesetzlichen Maßeinheiten (entsprechend der SI-Einheiten) den nationalen Etalon der Messnormale bereit zu halten, dessen internationale Vergleichbarkeit und Anerkennung sicherzustellen und die Maßeinheiten durch Kalibrierungen von Bezugs- und Arbeitsnormalen für Wirtschaft und Industrie weiterzugeben. Dazu wurde für die Realisierung der Maßeinheit Newton eine Anlage entwickelt und umgesetzt, die die Einheit der Kraft direkt aus der Masse ableitet und realisiert.

In dieser Arbeit werden zuerst allgemeine und spezielle Vorgaben und Rahmenbedingungen beschrieben, die für die Schaffung einer Totlastanlage im Bereich weniger N bis MN als primäre Kraftnormalanlage und nationales Normal der Kraft notwendig sind. Ein Vergleich der Vorgaben mit bestehenden Anlagen zeigt eine Reihe von zunächst unvereinbaren Problemstellungen. Es erfolgt daraus Schritt für Schritt die Analyse der Vorgaben und mittels grundlegender Betrachtung der Messunsicherheit die Erstellung eines detaillierten Anforderungskataloges. Zur Lösung der Diskrepanzen wurde zum Teil auf Methoden zurückgegriffen bzw. wurden Lösungen ausgearbeitet, die, verglichen mit bestehenden Realisierungsmöglichkeiten der Kraft, Modifikationen enthalten und Weiterentwicklungen darstellen. Dabei wurden vor allem systematisch alle Beiträge zur Messunsicherheit betrachtet und daraus die Grenze des technisch Möglichen ausgelotet.

Basierend auf der Umsetzung des entwickelten Leistungskataloges wurde ein Konzept zur Realisierung einer derartigen Anlage erstellt. Dabei wurden Lösungsansätze analysiert, weiterentwickelt und daraus dieses Konzept zur Umsetzung abgeleitet. Damit ist, bezogen auf die Größe der Anlage, eine beachtenswerte Verbesserung im Messumfang und auch der erzielten Genauigkeit der Messergebnisse erreicht worden.

In Kooperation zwischen dem Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) und dem Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik (IFT) der Technischen Universität Wien konnte das entstandene Konzept umgesetzt und für das BEV als österreichisches nationales Metrologieinstitut eine primäre Kraftnormalanlage zur Darstellung der Kraft realisiert werden. Als primäres Bezugsnormale kann diese Anlage aber nur dann herangezogen werden, wenn für die internationale Anerkennung der Messergebnisse gesorgt wird. In dieser Dissertation wurde eine auf den Bedarf abgestimmte Methode definiert, verfolgt und dokumentiert, die für diese internationale Anerkennung die notwendigen Grundlagen liefert.

Durch gezielte Untersuchungen und deren Dokumentationen werden die entwickelten Erweiterungen und Lösungen beschrieben und messtechnisch belegt. Die Verifizierung des erstellten Pflichtenheftes, dessen Validierung zur Einsatztauglichkeit und die messtechnische Beweisführung der Prozessbeherrschung sind Basis dieser Arbeit. Es wird detailliert gezeigt, wie die bei herkömmlichen und gleichwertigen Anlagen auftretenden Störgrößen kompensiert worden sind, so dass man auf die Berücksichtigung dieser Störgrößen, wie sie durch internationale Kalibrierrichtlinien geregelt sind, bei der Auswertung und der dazugehörigen Messunsicherheitsbetrachtung verzichten kann. Mittels systematischer Testreihen wurde diese Methodik der Vergleiche dargelegt und veranschaulicht. Somit wurde jene Nachweisführung erbracht, die in der Metrologie anerkannt ist.

Kernteil dieser Beweisführung sind die im Rahmen einer wissenschaftlichen Zusammenarbeit mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) durchgeführten Vergleichsmessungen. Dabei wurde durch Transfer-Normale auf die nationalen Normale der Kraft der PTB zurückgegriffen. Diese Messungen bilden eine der Grundlagen der Validierung dieser Anlage und des gesamten Prozesses zur Realisierung der Kraft im BEV und sind somit die notwendige Beweisführung über die Prozessbeherrschung. Durch Zusammenführung und Interpretation der Messergebnisse wird die Prozessfähigkeit und Eignung der neuen Anlage belegt und ihre Einsatzfähigkeit nachgewiesen. Mit der Darlegung dieser Nachweisführung wurde die Grundlage für die im Rahmen des CIPM-MRA-Abkommens internationale Anerkennung der Messergebnisse und der vom BEV ausgestellten Zertifikate erbracht. Somit konnte durch die Arbeit aufgezeigt werden, dass durch eine methodische Vorgehensweise zur Analyse von Kraftnormalanlagen über einen alternativen Lösungsweg ein Konzept entwickelt und die Tauglichkeit der Umsetzung durch die Validierung bestätigt werden kann.

ABSTRACT

Every National Metrology Institute (NMI) is obliged to keep the national etalon of measurement standards for the legal units of measurement according to the SI units, to ensure its international comparability and recognition, and to make the units of measurement available for business and industry by calibration of reference and working standards.

For the purpose of the realization of the unit “Newton” a system has been developed and implemented in several comprehensive projects, which derives the unit of force directly from the mass.

In the beginning of this dissertation general and specific requirements and conditions are described, which are necessary for the creation of a Deadloadmachine in the range from N to MN as a primary system and national standard. A comparison of the requirements with existing systems shows a series of contradictory problems. An analysis of the requirements enables gradually the preparation of a detailed catalogue of requirements. To resolve the discrepancies in the requirements, methods and solutions have been developed, which, compared to existing realization possibilities, contain modifications and represent further developments. Based on the conversion of the developed catalogue of requirements a concept for the realization of such a system has been prepared. Systematically all contributions to the measurement uncertainty have been regarded and analysed. From this point of view the limit of the technical possibility has been detected. These possibilities have been analysed, developed and a concept for the implementation has been derived from these solutions. Thus, related to the size of the machine, a remarkable improvement in the measurement range and also the obtained accuracy of the results of measurement was reached.

In cooperation between the Federal Office of Metrology and Surveying (BEV) and the Institute for Production Engineering (IFT) of the University of Technology in Vienna, the final concept has been realized as a primary force standard for the BEV as the Austrian National Metrology Institute. Based on this primary force standard and with the necessity to provide the international recognition of the measurement results, in this dissertation a method has been defined, the procedure has been carried out and has been documented, which provides the necessary basis for this international recognition.

The developed extensions and solutions are described in an extensive documentation and they are proved by a series of measurements. The verification of provided product requirement specifications, its validation to the operational fitness and the proof of the well controlled process carried out by measurements are the basis of this paper. It is shown in detail, how in conventional and equivalent systems occurring disturbances are compensated, so that it is possible to work without considering these disturbances, as they are regulated by international calibration guidelines for the evaluation and the associated measurement uncertainty analysis. By means of numerous tests this methodology of comparisons was presented and demonstrated. Thus the furnishing proof verification was performed, which is accepted in Metrology.

The central part of this argumentation consists of comparative measurements carried out within the framework of a scientific cooperation with the Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB). By measuring the transfer standards of the PTB the traceability of the system has been achieved by resorting to the national standard of the force of the PTB. These measurements form the base of the validation of this system and the entire

process for the realization of the force in the BEV, and are thus the necessary evidence of the process control. By compilation and interpretation of the measurement results the process capability and suitability of the new system are documented and its measurement capabilities are proved. This proof is the basis of the international acknowledgment of the measurement results as given by the CIPM MRA (CIPM Mutual Recognition Arrangement) and the certificates issued by the BEV, and thus the purpose of the thesis has been achieved by proving that this method of validation is correct.

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG	V
ABSTRACT	VII
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	XI
FORMELZEICHEN BENENNUNG	XII
1 EINLEITUNG	1
2 ZIELSETZUNG	5
3 STAND DER TECHNIK BEI DER KRAFTREALISIERUNG.....	9
3.1 NORMIERUNG IM BEREICH KRAFTMESSUNG	9
3.2 KRAFTMESSGERÄTE UND KRAFTNORMALANLAGEN	11
3.3 MESSTECHNISCHER VERGLEICH VON KRAFTNORMALANLAGEN.....	17
3.4 BETRACHTUNG DER MESSUNSICHERHEIT.....	19
3.4.1 <i>Grundlagen und Begriffe</i>	19
3.4.2 <i>Systematische und zufällige Messabweichungen</i>	20
3.4.3 <i>Angabe der Messunsicherheit</i>	21
3.4.4 <i>Darstellung der Messunsicherheit mittels GUM-Work-Bench</i>	22
3.5 MODELLIERUNG ZUR KRAFTREALISIERUNG	23
3.6 BEWERTUNG EINER KRAFTMESSUNG	31
3.6.1 <i>Messablauf einer Kraftmessung nach ISO</i>	32
3.6.2 <i>Beurteilung des Kraftmessgerätes und dessen Messergebnis</i>	34
3.6.3 <i>Alternativer Messablauf bei der Kraftmessung nach DAkKS</i>	36
3.6.4 <i>Einflussfaktor Übergangselemente</i>	37
3.6.5 <i>Betrachtung der Unsicherheitsfaktoren von Kraftaufnehmern</i>	38
4 METHODENBASIERTE MESSANLAGENGESTALTUNG	41
4.1 KOMPONENTEN DER KRAFTEINFLÜSSE	41
4.1.1 <i>Messunsicherheitsbeiträge der realisierten Kraft</i>	42
4.1.2 <i>Messunsicherheitsbeiträge der gemessenen Kraft</i>	43
4.2 KOMPENSATION KRITISCHER MASSESSEN	45
4.3 GRENZEN DES MESSBEREICHES EINES KRAFTNORMALANLAGENSYSTEMS.....	53
4.4 DEFORMATIONSAUSWIRKUNG	55
4.5 VORAUSSETZUNG EINES PRIMÄREN KRAFTNORMALANLAGENSYSTEMS.....	57
4.6 KONZEPTIONIERUNG EINES KRAFTNORMALANLAGENSYSTEMS	61
4.6.1 <i>Innovatives Arbeitsprinzip der 2 kN-Totlastanlage</i>	65
4.6.2 <i>Gewichtskompensation der Tragekonstruktion</i>	66
5 UMSETZUNG EINES ANLAGENSYSTEMS ZUR REALISIERUNG DER KRAFT	69
5.1 RÜCKFÜHRUNG DER KRAFTREALISIERUNG AUF SI-EINHEITEN	69
5.1.1 <i>Rückführung auf die Masse</i>	69
5.1.2 <i>Rückführung auf die lokale Erdbeschleunigung (Erdschwere)</i>	73
5.1.3 <i>Rückführung der Sensoren</i>	74
5.2 BEURTEILUNG DER MASENkompensation	74
5.2.1 <i>Abhängigkeit von der Luftdichte</i>	77
5.2.2 <i>Dichteaussgleich bei der Gewichtskompensation</i>	81
5.2.3 <i>Voraussetzung der Kalibrierbarkeit der Massescheiben</i>	84
5.2.4 <i>Sensitivität des Waagensystems</i>	85
5.3 AUFBAU EINES KRAFTNORMALANLAGENSYSTEMS	89
6 VERIFIZIERUNG DES KRAFTNORMALANLAGENSYSTEMS	94
6.1 VERIFIZIERUNG TECHNISCHER KONSTRUKTIONSLÖSUNGEN.....	94
6.1.1 <i>Messtechnischer Arbeitsraum</i>	94
6.1.2 <i>Einspannung Zug 2 kN-Anlage</i>	95
6.1.3 <i>Einhausung und thermische Entkopplung</i>	96
6.1.4 <i>Gehängeschwingung und Gehängedämpfung</i>	98
6.1.5 <i>Pendeln der Gewichte</i>	100
6.1.6 <i>Impulsdämpfung</i>	101

6.1.7	<i>Verformung von Kernbauteilen</i>	102
6.1.8	<i>Verformung der Transfornormale</i>	109
6.2	VERIFIZIERUNG VERFAHRENSTECHNISCHER LÖSUNGEN.....	110
6.2.1	<i>Kompensation der Rückstellkraft im Waagensystem</i>	110
6.2.2	<i>Wirksamkeitsprüfung der Deformationskorrektur</i>	118
6.2.3	<i>Interner Vergleich der Gewichtsscheiben</i>	121
7	VALIDIERUNG DES REALISIERTEN KRAFTANLAGESYSTEMS	126
7.1	INTENTION DER VALIDIERUNG.....	126
7.2	AUSGEWIESENES MESSUNSIKERHEITSBUDGET.....	127
7.2.1	<i>Modellgleichungen im Guide of the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)</i>	128
7.2.2	<i>Verteilung der Messunsicherheitskomponenten</i>	130
7.2.3	<i>Kalkulation der Messunsicherheit mit GUM-Work-Bench</i>	132
7.2.4	<i>Trend bei den Einflussgrößen der Unsicherheitsbeiträge</i>	136
7.2.5	<i>Analyse erzielter Unsicherheitsbeiträge</i>	138
7.3	UNSIKERHEITSBETRACHTUNG DER VERGLEICHSMESSUNG	139
7.4	VALIDIERUNG DER VERWENDBARKEIT.....	142
7.5	INTERNATIONALE ANERKENNUNG.....	148
7.5.1	<i>Messverfahren</i>	150
7.5.2	<i>Vergleich der Ergebnisse</i>	154
7.5.3	<i>Schlussfolgerung aus den bilateralen Vergleichsmessungen</i>	156
7.6	INTERNATIONALE AKZEPTANZ DES QM-SYSTEMS UND DER TECHNISCHEN VERFAHREN.....	156
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	157
	LITERATURVERZEICHNIS	161
9	ANHANG	165
9.1	UNSIKERHEITSFAKTOREN VON KRAFTAUFNEHMERN ZU 3.6.5	165
9.2	ANFORDERUNGEN AN DIE ÖSTERREICHISCHE KRAFTNORMALANLAGE	168
9.2.1	<i>Anforderungen an die Konstruktion</i>	168
9.2.2	<i>Anforderung Verfahrenstechnik</i>	173
9.2.3	<i>Maschineninterne Reaktion der Kraftaufbringung</i>	176
9.2.4	<i>Umgebungsbedingungen</i>	178
9.3	ERGEBNISSE DER VERGLEICHSMESSUNGEN BEV – PTB ZU 7.5.....	181

Abkürzungsverzeichnis

BEV	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen; nationales Metrologieinstitut Österreich
BIPM	Bureau international des poids et mesures; International Bureau of Weights and Measures (Internationales Büro für Maß und Gewicht)
CCM	Consultative Committee for Mass and Related Quantities des CIPM (Konsultatives Komitee für Maß und Gewicht)
CGPM	Conférence générale des poids et mesures, General Conference on Weights and Measures (Generalkonferenz für Maß und Gewicht)
CIPM	Comité international des poids et mesures; International Committee of Weights and Measures (Internationales Komitee für Maß und Gewicht)
CIPM-MRA	Mutual Recognition Arrangement of national Measurement Standards and of Calibration and Measurement certificates issued by National Metrology Institutes; Arrangement drawn up by the International Committee of Weights and Measures under the authority given to it in the Metre Convention
CMC	Calibration and Measurement Capabilities
CODATA	Committee on Data for Science and Technology
EFG	Eichfehlergrenze
EURAMET	European Association of National Metrology Institutes
GUM	Guide of the expression of Uncertainty in Measurement
IFT	Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik, Technische Universität Wien
IMEKO	International Measurement Confederation
ISO	International Organization for Standardization
KCDB	BIPM Key Comparison Database
MEG	Maß- und Eichgesetz BGBl. Nr. 152/1950 i.d.g.F.
NMI	Nationales Metrologieinstitut
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt; nationales Metrologieinstitut der BRD, Braunschweig
PTP	Physikalisch-Technischer Prüfdienst des BEV
SI	International System of Units (SI)
TCM	Technical Committee of Mass and Related Quantities der EURAMET
VIM	International Vocabulary of Metrology JCGM 200:2008. International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM).
VFG	Verkehrsfehlergrenze

Formelzeichen Benennung

Zeichen	Einheit	Erläuterung
A	kg	Luftauftrieb
α_v	1/°C	Ausdehnungskoeffizient Stahl
b	mm	Abstand des Auflagepunkts der Massen zur Mittellinie des Kraftmessgerätes
b'	%	Relative Wiederholpräzision in gleicher Einbaustellung des Kraftmessgerätes
b	in %	Relative erweiterte Vergleichspräzision in verschiedenen Einbaustellungen des Kraftmessgerätes
c	%	Relative Kriechabweichung des Kraftmessgerätes
ΔA	kg	Änderung des Luftauftriebes
ΔF_{stat}	N	Abweichung der Kraftmittelwerte gleicher Laststufen bei statischer Belastung
ΔL	mV/V	Deformation, dem Verformungswert zugeordnet
Δx	mm	Horizontalabstand der Gehängeachse von der Kraftmessgerätachse
Δz	mm	Höhe des Dreieckes, das sich bei Schrägstellung der Masseauflagefläche zur Sensorauflagefläche ergibt
E_n		Faktor der Messunsicherheitsbereichsüberlappung
F	N	Resultierende Kraft / dargestellte Kraft / realisierte Kraft
F'	N	Kraftmessgerätinterne Reaktionskraft, der resultierenden Kraft / dargestellten Kraft / realisierten Kraft entgegengestellt
f_0	%	Relative Nullpunktabweichung des Kraftmessgerätes
F_A	N	Kraft durch Luftauftrieb
F_{BM}	N	Aufgebrachte Kraft der Bezugskraftnormalmaschine
f_c	%	Relative Interpolationsabweichung des Kraftmessgerätes
$F\Delta A$	N	Differenzkraft durch Änderung des Luftauftriebes
F_{Def}	N	Resultierende Kraft, die einer Längendeformation zugeordnet wird
F_f	N	Nennkraft des Kraftmessgerätes
F_N	N	Höchstkraft der Kalibrierung
F_Q	N	Normal gerichtete Querkraft zur Kraft F
$F_{Q\ a,b; C,D}$	N	Örtlich vorherrschende Querkräfte
F_{Qi}	N	Normal gerichtete Querkraft zur Kraft F mit Index i
F_{QS}	N	Querkraft im Kraftmessgerät
F_R	N	Rückstellkraft im Kraftsystem
F_{RS}	N	Reibkraft im Kraftmessgerät
F_{Rv}	N	Vertikale Rückstellkraft im Waagensystem
F_{St}	N	Störkraft in annähernd vertikaler Richtung

Zeichen	Einheit	Erläuterung
$F_{St\ a,b; C,D}$	N	Örtlich vorherrschende Störkräfte
F_{Sti}	N	Störkraft in annähernd vertikaler Richtung mit Index i
$F_{Sys\ i}$	N	Ausgleichskraft des Waagensystems zum Zeitpunkt i
g	m/s ²	Erdschwere
$g_{1,2,i}$	m/s ²	Örtlich vorherrschende, korrigierte Erdschwere
h	mm	Höhe vom Auflagepunkt des Gehängesystems zum tatsächlichen Schwerpunkt der Massescheiben
i_0	mV/V	Anzeige (Anzeigewert des zugehörigen Verformungsmesswerts) des Anzeigeegerätes vor der Belastung
i_{30}	mV/V	Anzeige (Anzeigewert des zugehörigen Verformungsmesswerts) des Anzeigeegerätes 30 s nach Aufbringung oder Wegnahme der Höchstkraft der Kalibrierung
i_{300}	mV/V	Anzeige (Anzeigewert des zugehörigen Verformungsmesswerts) des Anzeigeegerätes 300 s nach Aufbringung oder Wegnahme der Höchstkraft der Kalibrierung
i_f	mV/V	Anzeige (Anzeigewert des zugehörigen Verformungsmesswerts) des Anzeigeegerätes nach der Entlastung
φ	°	Auslenkungswinkel des Waagensystems
k		Konstante, Erweiterungsfaktor
κ	1/Ps	Kompressibilität der Gewichte
K_{ts}	N	Kalibrierkoeffizient des Krafttransferrnormales
m	kg	Masse
m_{GeGew}	kg	Masse des Systemgegengewichtes
$m_{Gehä}$	kg	Masse des Systemgehänges
m_{kG}	kg	Konventionelle Masse der Gewichtscheiben
p	Pa	Luftdruck
p_0	Pa	Bezugsluftdruck
r	N	Auflösung des Anzeigeegerätes
ρ_0	kg/m ³	Konventionelle Luftdichte (Bezugsluftdichte)
ρ_{G20}	kg/m ³	Bezugsmaterialdichte der Gewichtscheiben bei 20°C
ρ_k	kg/m ³	Konventionelle Materialdichte der Gewichtscheiben
ρ_L	kg/m ³	Luftdichte
$\rho_{L\ i}$	kg/m ³	Luftdichte zum Zeitpunkt i
ρ_m	kg/m ³	Materialdichte Gewichtscheiben
σ		Standardabweichung
s		Empirische Standardabweichung
σ^2		Varianz
s^2		Empirische Varianz

Zeichen	Einheit	Erläuterung
σ_x		Standardabweichung der Variable x
t	°C	Temperatur
t_0	°C	Bezugstemperatur
U		Erweiterte Messunsicherheit
$u(\delta F_{drift})$	N	Unsicherheit der Langzeitdrift des TransfERNORMALS
$u(\Delta F_{stat})$	N	Unsicherheit der Abweichung der Kraftmittelwerte bei statischer Belastung
$U(\Delta F_{stat})$	N	Erweiterte Unsicherheit der Abweichung der Kraftmittelwerte bei statischer Belastung
$u(\bar{F}_{BNME})$	N	Unsicherheit der Mittelwerte der Kraftanzeige des TransfERNORMALS in der Bezugsmesseinrichtung
$u(\bar{F}_{NME})$	N	Unsicherheit der Mittelwerte der Kraftanzeige des TransfERNORMALS in der Vergleichsmesseinrichtung
u_c		kombinierte Standardabweichung / kombinierte Unsicherheit
u_i		Einfache Unsicherheit der Variable i
v	%	Relative Umkehrspanne des Kraftmessgerätes
V_0	m ³	Volumen der Gewichtscheiben bei der Bezugstemperatur
V_G	m ³	Volumen der Gewichtscheiben
$V_{GeGew\ i}$	m ³	Volumen des Systemgegengewichtes zum Zeitpunkt i
$V_{Gehä\ i}$	m ³	Volumen des Systemgehänges zum Zeitpunkt i
W	kg	Wägewert (Anzeigewert der Waage)
W		Erweiterte relative Messunsicherheit
W_A	kg	Wägewert des Luftauftriebes (berechnet)
W_{rv}		Erweiterte relative Unsicherheit des Referenzwertes
X	mV/V	Verformungsmesswert bei zunehmender Prüfkraft
X'	mV/V	Verformungsmesswert bei abnehmender Prüfkraft
x_0		arithmetischer Mittelwert
$X_{1...6}$	mV/V	Messreihe mit Index entsprechend der Reihenfolge
X_a	mV/V	Berechneter Verformungsmesswert
X_i	mV/V	Verformungsmesswert i
\bar{X}_i	mV/V	Mittelwert der Verformungsmesswerte X je Laststufe in verschiedenen Einbaustellungen
X_{max}	mV/V	Größter Verformungsmesswert der Messreihen X1, X3 und X5
X_{min}	mV/V	Kleinster Verformungsmesswert der Messreihen X1, X3 und X5
X_N	mV/V	Verformungsmesswert entsprechend der Höchstkraft der Kalibrierung
x_w		Wahrer Wert
\bar{X}_{wr}	mV/V	Mittelwert des Verformungsmesswertes in gleicher Einbaustellung

1 Einleitung

Ein gemeinsames, allgemein gültiges Einheitensystem zu etablieren, aufrecht zu erhalten und der Allgemeinheit zur Verfügung zu stellen, Messergebnisse vergleichbar zu machen und diese weltweit gegenseitig anzuerkennen, das ist die Welt der metrologischen Institute. Im Grundgedanken der Methode dieses Vergleiches der Messungen, steht dabei die Wissenschaft der Metrologie, der Physik und der Mathematik genauso nahe als auch der Philosophie.

Am 20. Mai 1875 wurde ein internationaler Vertrag geschlossen, bekannt als die Meterkonvention, in der die 17 Erstunterzeichner-Staaten (darunter auch Österreich) die internationale Einigung und die Vervollkommnung des metrischen Systems zu sichern vereinbarten. Die Meterkonvention ist ein Staatsvertrag zur internationalen Einführung und dauernden wissenschaftlichen Überwachung des metrischen Maßsystems.

Heute sind 51 Staaten Vertragspartei der Meterkonvention. Daneben hat die Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM) noch 26 „assoziierte Mitgliedsstaaten“ (nicht Vollmitglieder). Erst 85 Jahre nach der Meterkonvention, 1960, wurde das Internationale Einheitensystem (SI) eingeführt und hat weltweit eine große Verbreitung gefunden.

Als Organe etablierte die Meterkonvention drei Institutionen:

- Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM):
Bezeichnet ein Treffen der entsendeten Delegierten aller Unterzeichnerstaaten im Abstand von vier bis sechs Jahren. Die Generalkonferenz ist das Beschlussorgan der Meterkonvention.
- Internationales Komitee für Maß und Gewicht (CIPM):
Bezeichnet das Verwaltungskomitee, das jährlich im BIPM zusammentrifft. Dazu gibt es zehn beratende Komitees, die CCs (z.B. aus dem Bereich Masse das CCM: Consultative Committee for Mass and Related Quantities). Es handelt sich dabei um die Zusammenarbeit von anerkannten, beratenden Fachexperten, die von den Mitgliedsinstituten entsendet werden. Sie erbringen die Beschlussvorbereitungen aufgrund wissenschaftlicher Arbeiten.
- Internationales Büro für Maß und Gewicht (BIPM):
Ist das internationale Büro für Maßeinheiten in Sèvres bei Paris.

Ständiger Vertreter vor der Meterkonvention aus Österreich ist das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV); es ist somit das nationale Metrologieinstitut (NMI) von Österreich.

Den nationalen metrologischen Instituten kommen dabei folgende Aufgaben zu:

- Die verbindlichen nationalen Messnormale (Etalons) bereitzuhalten oder bereithalten zu lassen und an die internationalen Etalons anzuschließen oder anschließen zu lassen (z.B. im BEV das 1 kg Iridium-Platin-Bezugsnormal Nr. 49). Somit hat ein NMI für die internationale Anerkennung der nationalen Etalons zu sorgen.
- Sicherstellung der internationalen Vergleichbarkeit und Anerkennung durch Schaffung entsprechender Messmöglichkeiten und Teilnahme an Vergleichsprojekten (z.B. Schlüsselvergleiche).

Einleitung

- Weitergabe der Maßeinheiten durch Kalibrierungen von Bezugs- und Arbeitsnormalen für Wirtschaft und Industrie.

Nach dem Maß- und Eichgesetz [1] hat in Österreich das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen die gesetzlichen Maßeinheiten sicherzustellen. Der Gruppe "Eichwesen" des BEV wird dabei noch das Aufgabengebiet als Eichbehörde zugeordnet, um das gesetzliche Messwesen zu vollziehen. Diese Aufgabe beinhaltet die Wahrung der gesetzlichen Eichpflicht, die Erlassung von Eichvorschriften, die Erstellung von Zulassungen zur Eichung, die Durchführung von Eichungen (komplementär zu Eichstellen), die Eichpolizeiliche Revision und die Überwachung von Eichstellen.

Als Zeichen der gegenseitigen Anerkennung berufen sich die Unterzeichner-NMIs der Meterkonvention auf das Mutual Recognition Arrangement CIPM-MRA [2], das internationale Abkommen zwischen den NMIs bezüglich der gegenseitigen Anerkennung der nationalen Etalons und der Kalibrierscheine der NMIs. Bei der Erstellung solcher Kalibrierscheine verweist man auf die Übereinstimmung mit den Kalibrier- und Messmöglichkeiten (CMCs), wie sie im Anhang C des gegenseitigen Abkommens (MRA) des Internationalen Komitees für Maße und Gewichte (CIPM) enthalten sind. Im Rahmen des MRA wird die Gültigkeit der Kalibrier- und Prüfscheine von allen teilnehmenden Instituten für die im Anhang C spezifizierten Messgrößen, Messbereiche und Messunsicherheiten gegenseitig anerkannt. Basis für diese Anerkennung ist der von der Gemeinschaft akzeptierte, veröffentlichte Nachweis über die Messmöglichkeiten in den CMCs.

In der internationalen Gemeinschaft der Metrologie haben sich die nationalen metrologischen Institute zur „Regional Metrology Organisation“ (RMO) mit dem Ziel einer koordinierten Forschung und Entwicklung mit gemeinsamer Finanzierung und Nutzung von Forschungsprogrammen zusammengeschlossen. Die Wahrnehmung der Aufgaben einer RMO in Europa kommt der *EURAMET e.V. (European Association of National Metrology Institutes)* zu.

Die Aufgaben sind dabei:

- Förderung von Wissenschaft und Forschung sowie der europäischen Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Metrologie.
- Effiziente Nutzung der vorhandenen Ressourcen, Sicherstellung der Rückführbarkeit der nationalen Normale.
- Gemeinsame Nutzung spezieller technischer Mess- und Infrastruktureinrichtungen.
- Förderung und Koordinierung des wissenschaftlichen Wissens- und Informationstransfers.
- Entwicklung, regelmäßige Fortschreibung und Implementierung eines europäischen Forschungsprogramms auf dem Gebiet der Metrologie:
 - European Metrology Program for Innovation and Research,
 - EMPIR; Implementing of the European Research Area in Metrology, IMERA).
- Abschluss von Verträgen über Forschungsförderung (z.B. mit der EC).

Neben den Organen der Meterkonvention etablierten sich im Bereich Messwesen weitere Organisationen, wie die:

Einleitung

- European Cooperation in Legal Metrology (WELMEC): betreibt die Harmonisierung der Vorgangsweisen im gesetzlichen Messwesen in der EU und erstellt Leitfäden als Empfehlungen für Behörden, benannte Stellen und Hersteller. Die WELMEC Committees bestehen aus neun Working Groups (WG´s).
- Organisation Internationale de Métrologie Légale (OIML): Organisation basierend auf dem Staatsvertrag von 1955. Die OIML hat das Ziel der Harmonisierung der Grundlagen des gesetzlichen Messwesens. Empfehlungen und Dokumente beziehen sich auf die Anforderungen an Messgeräte, ihre Prüfung und Überwachung sowie die gegenseitige Anerkennung von Prüfergebnissen und Prüfzertifikaten.
- European Cooperation for Accreditation (EA): ist die europaweite Zusammenarbeit der Akkreditierungsstellen zur Entwicklung und Harmonisierung der Akkreditierungsverfahren, der globalen Anerkennung von Prüf- und Kalibrierergebnissen und die Förderung der Anerkennung der Akkreditierung in der Industrie, bei Regulatoren und bei den Konsumenten.
- International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC): ist die internationale Zusammenarbeit der Akkreditierungsstellen analog zur EA. Zweck der ILAC und der EA ist es, zu einer gegenseitigen Anerkennung von Prüf- und Kalibrierergebnissen zu kommen, um damit technische Handelsbarrieren abzubauen.

Jedes Metrologieinstitut ist in diesen Gremien vertreten. Zum Beispiel ist der Fachbereich Kraft des BEV Mitglied in den technischen Komitees der "Masse und verwandte Größen" sowohl in der EURAMET (WGM) als auch im CCM des CIPM. In beiden wurden Arbeitsgruppen der Kraft etabliert (WGF-Working Groups on Force). Diese WGs koordinieren in erster Linie die internationale Zusammenarbeit und Forschung und kommunizieren die Ergebnisse.

In Österreich ist die gesetzliche Einheit der Kraft, das Newton, im §2, Abs. 2 des Maß- und Eichgesetzes als kohärent abgeleitete Einheit aus den Basiseinheiten der Masse, der Länge und der Zeit festgelegt und als verbindlich erklärt.

Die Kraft als eine gerichtete physikalische Größe spielt nicht nur in der klassischen Mechanik eine wichtige Rolle, sondern vor allem im täglichen Leben. Sie kann Körper beschleunigen oder verformen. Durch Kraftwirkung kann man Arbeit verrichten und die Energie eines Körpers verändern. Grundlegend ist nur, dass die Wirkung der Kraft beobachtbar bzw. messbar gemacht werden muss, um so auf die Kraft rückschließen zu können.

Bereits im grundlegenden Physikunterricht erfährt man, dass in erster Linie nur die durch die Kraft hervorgerufene Verformung bestimmt werden kann. In der Praxis der Messtechnik wird oft aus einem möglichst linearen Zusammenhang zwischen der wirkenden Kraft und einer leicht zu messenden Größe auf die Kraft geschlossen. Veranschaulicht wird dies durch die Verwendung von Federkraftmessern, die über die Längenänderung von Schraubenfedern Kräfte anzeigen. Dabei bedient man sich des Hooke´schen Gesetzes, demzufolge die Ausdehnung geeigneter Federn zur ausgeübten Kraft proportional ist; es gilt $F = D \cdot \Delta l$ wobei Δl die Längenänderung der Feder und D

Einleitung

die Federsteife oder Federkonstante bezeichnet. Gemessen wird dies etwa mittels der Längenmessung.

Wo Kräfte eine Beschleunigung verursachen, bedient man sich einer Weg-Zeit- Messung auf Basis des zweiten Newton'schen Gesetzes. Das zweite Newton'sche Gesetz besagt, dass für Körper mit gleichbleibender Masse m und konstanter Beschleunigung a gilt: Es besteht der Zusammenhang $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$. Dieser Zusammenhang spiegelt sich in der Festlegung der Maßeinheit Newton als abgeleitete Einheit der Masse [kg] wider; in: $N = kg \cdot \frac{m}{s^2}$ (eben $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$, mit der Kraft \vec{F} , der konstanten Masse m und der Beschleunigung \vec{a}).

In der Praxis der Messtechnik wird bei der Kraftmessung auf diesem Grundprinzip des linearen Zusammenhangs zwischen der wirkenden Kraft und einer leicht zu messenden Größe aufgebaut. In der Messtechnik lässt sich in der Regel diese Auswirkung der Kraft über die Verformung eines elastischen Materials nutzen, etwa direkt über Längenmessung oder über die Änderung des elektrischen Widerstands eines Dehnungsmessstreifens.

Zu Nutzen machen kann man sich auch das Hebelgesetz. Damit lässt sich eine unbekannte Kraft durch den Vergleich mit einer bekannten Kraft bestimmen.

Verwenden kann man hier zum Beispiel mittels einer Waage die Gewichtskraft eines Massestückes. Von der Anzeige der Waage kann man mit Hilfe der bekannten Schwerebeschleunigung g unter Berücksichtigung von verschiedenen Einflussfaktoren auf die wirkende Kraft umrechnen.

Als grundlegende Größe des täglichen Lebens wird die Kraftmessung in vielen Bereichen nicht realisiert bzw. ist man sich deren Bedeutung nicht bewusst. Von der einfachen Personenwaage bis hin zur hochpräzisen Industriewaage, von der Mikrowaage bis zur Brückenwaage sind heutzutage alle derartigen Geräte Kraftmesseinrichtungen. Wie in [4] und [6] illustriert, ist die Kraftmessung in der Materialprüfung, der Bauindustrie und im Verkehr nicht wegzudenken. Vor allem in Wirtschaft und Forschung ist die Kraft eine fundamentale Kenngröße zur Beurteilung von Materialien, Zuständen und Prozessen. Alle zur Verfügung stehenden Kraftmessgeräte können nur eine der Kraft zuordenbare Auswirkung anzeigen; meist in einer Verformung oder in einer Messung der Verformung. Ein absoluter Rückschluss auf die Größe der Kraft ist allerdings dadurch nicht möglich. Das bedeutet, dass Kraftmessgeräte Kräfte nur relativ, als Komparatoren (vergleichend) anzeigen können. Um in der Anwendung unbekannte Kräfte bestimmen zu können, ist es notwendig eine bekannte Kraft als Vergleichsmöglichkeit zur Verfügung zu haben. Das Zurverfügungstellen solcher bekannten Kräfte ist die Aufgabe der Realisierung von Kräften durch die Metrologieinstitute. Dabei bedient man sich einer Mischung der drei Messmethoden, um im Bereich von μN bis einigen MN Kräfte zu bestimmen oder darzustellen (zu realisieren). Realisieren bedeutet, dass für die Kalibrierung eines Kraftmessgerätes eine „genau bekannte Kraft“ durch ein physikalisches Experiment erzeugt und in den Kraftaufnehmer eingeleitet wird. Um eine derartige Kraft realisieren und somit das Newton als abgeleitete SI-Einheit darstellen zu können, bedienen sich die nationalen Metrologieinstitute sogenannter primärer Kraftnormalanlagen oder auch Totlastanlagen. Hier leitet man die Kraft über eine entsprechende Mechanik direkt aus der Gewichtskraft her, die von Gewichtstücken ausgeübt wird.

2 Zielsetzung

Zur Realisierung der Größe Kraft bzw. der SI-Einheit Newton sind die nationalen Metrologieinstitute dazu angehalten, sogenannte primäre Kraftnormalanlagen zu betreiben. Diese primären Kraftnormalanlagen realisieren Kräfte in direkter Ableitung aus der Masse. Kommerziell erwerbbar Kraftnormalanlagen mit entsprechender Genauigkeit, die als primäre Kraftnormalanlagen einsetzbar wären, haben abhängig vom Hersteller einen fix vorgegebenen Messbereich und sind auch in ihren Messmöglichkeiten ablaufmäßig begrenzt. Aus den Bedarfen der Industrie und der Wirtschaft ergibt sich ein Messbereich an darzustellenden Kräften, der von den Metrologieinstituten abzudecken ist. Die Abdeckung dieses in der Messtechnik benötigten Bereiches an darzustellenden Kräften bedeutet aber für die Metrologieinstitute, dass nicht nur Anlagensysteme von Kraftnormalanlagen mit entsprechenden Messmöglichkeiten, sondern auch die dafür notwendige Infrastruktur zur Verfügung zu stellen ist. Gerade hier haben viele kleinere Metrologieinstitute enge Rahmenbedingungen, sowohl aus wirtschaftlicher als auch aus technischer Sicht. Deshalb ist es notwendig, eine Möglichkeit zu schaffen, eine umfassende und moderne, sich am Stand der Wissenschaft orientierende Anlage zu entwickeln, die den äußerst hohen Ansprüchen eines nationalen Metrologieinstituts gerecht wird.

Aus wirtschaftlicher und metrologischer Sicht ist eine Realisierung der Kraft für ein Metrologieinstitut nur dann sinnvoll, wenn zur Abdeckung des Bedarfs aus der Industrie und von Kalibrierlaboratorien der volle Messbereich zur Verfügung steht und dabei eine Messgenauigkeit der primären Kraftnormalanlagen von besser als $2 \cdot 10^{-5}$ erreicht wird. Dieser Grenzwert ergibt sich aus normativen Vorgaben für die Kalibrierung von KrafttransfERNormalen höchster Genauigkeit. Aus technischer Sicht sinnvoll ist dabei auch die zusätzliche Vorgabe, möglichst eine flexible Verwendung dieser Anlagensysteme vorzusehen. Derartige Totlastanlagen sollten nicht nur für Kalibrierungen herangezogen werden können, sondern diese müssen auch für Forschungsprojekte und als Prüfeinrichtung in umfassenderen metrologischen Belangen (z.B. bei Zulassungsprüfungen) einsetzbar sein. Analysiert man die Summe der Anforderungen wie den geforderten Umfang des Messbereiches der Anlagensysteme, die zu erfüllende Messgenauigkeit, die Leistungserwartung und die Rahmenbedingungen sowie das vorhandene Raumangebot, so ergibt eine Gegenüberstellung der Anforderungen und der Bedingungen, dass diese einander fast ausschließen. Da es Metrologieinstituten oft nicht gelingt, diese Anforderungen und Bedingungen mit den zur Verfügung stehenden Möglichkeiten zu erfüllen, entscheiden die Betreiber dieser Institute oft den Fachbereich "Kraftmessung" und somit die Realisierung der Kraft teilweise oder ganz einzustellen und Kunden an andere NMIs zu verweisen.

Ausgehend von einem konkreten Bedarf des BEV unter all diesen Voraussetzungen wurde es zum Thema dieser Arbeit, eine Methodik zu entwickeln, um detaillierte Anforderungen für ein Kraftnormalanlagensystem abzuleiten und zu definieren, um damit eine Realisierung eines Kraftnormalanlagensystems zu ermöglichen. Als logische Folge ist daher auch eine Methode zu finden, eine solche signifikant modifizierte und damit einzigartige Gesamtanlage zu validieren und somit eine Methode zur messtechnischen Beweisführung über die Prozessfähigkeit dieses Anlagensystems festzulegen.

Zielsetzung

Erstes Ziel der Arbeit war es, eine Methodik zur Ableitung des Anforderungsprofils an ein primäres Kraftnormalanlagensystem für die eingeschränkten Rahmenbedingungen im BEV zu entwickeln. Das Ziel, welches verfolgt wird, ist den Messbereichsumfang zu optimieren bei gleichzeitiger Reduktion der Messunsicherheit. Dabei soll auf alle bekannten, das Ergebnis beeinflussenden Faktoren Rücksicht genommen werden. Durch systematische Analyse der Technik und der Rahmenbedingungen sollen bis dato nicht berücksichtigte Einflussfaktoren aufgegriffen und in ihrer Größe abgeschätzt werden, um so nähere Erkenntnisse über das Verfahren zu erlangen. Unter dem Blickwinkel der zu erzielenden Messunsicherheit stehen dabei Überlegungen im Mittelpunkt, auf welche angesichts der zu erwartenden Einflüsse ein besonderes Augenmerk zu richten ist. Es ist zur Ermöglichung einer Realisierung eines Kraftnormalanlagensystems eine Auswahl zu treffen, in der auf bewährte Lösungen bei der Realisierung der Kraft gesetzt und auf Technologien zurückgegriffen wird, die bei einzelnen Kraftnormalanlagen bislang noch nicht umgesetzt worden sind. Diese innovativen Technologien ermöglichen aber einen alternativen Ansatz zur Lösung der Vorgaben. Diese betreffen in erster Linie messbereichserweiternde Maßnahmen an der Totlastanlage, z.B. Gewichtskompensationen, Alternativen in der Methodik der Aufnahme von Transfornormalen (Zug und Druck in einer Einspannung), aber auch die gezielten Kompensationen einzelner Einflüsse, wie z.B. Kraft- und Deformationskompensationen. Zur Verifizierung dieser Lösungsmethoden werden dabei grundlegende Analysen, messtechnische Beweisführungen und eine umfangreiche Betrachtung der zu erwartenden Messunsicherheit herangezogen. Das Ergebnis dieser Analysen hat die Definition von Anforderungen zu sein, bei denen geeignete und fundierte Maßnahmen den Rahmenbedingungen angepasst werden und somit deren Erfüllung garantieren.

Das zweite Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Vorgehensweise zur Validierung derartiger Kraftnormalanlagen, um nach erfolgter Realisierung die Grundlagen liefern zu können, die für eine internationale Anerkennung der Messergebnisse notwendig sind. Dabei ist spezielles Augenmerk auf die Validierung jener Elemente zu legen, die zur Erreichung der Vorgaben normativ abweichende und messtechnisch relevante Modifikationen beinhalten. Es ist zum Beispiel in den unteren Grenzbereichen des Messbereiches, den Grenzen der Auflösung der realisierbaren Laststufen oder bei der alternativen Einspannung der Kraftsensoren, eine Möglichkeit zu finden, die an dieser Kraftnormalanlage erzielten Messergebnisse mit jenen Messergebnissen vergleichbar zu machen, die mit herkömmlichen und erprobten Kraftnormalanlagen bestimmt werden können.

Schlussendlich ist es das Ziel, im Zuge der Validierung durch internationale Vergleichsmessungen den Beweis zu führen, der die Einsatztauglichkeit sowie die Prozessbeherrschung belegt.

Erst durch die Präsentation der gesamten Ergebnisse vor der internationalen Gemeinschaft der Fachexperten aus dem Fachbereich Kraft erfolgt bei Akzeptanz die Anerkennung der erzielten Messergebnisse durch die Unterzeichner des CIPM-MRA-Abkommens (CIPM, Mutual Recognition Arrangement) [1]. Mit dieser internationalen Anerkennung wird auch der Nachweis erbracht, dass sowohl die innovativen Lösungsmethoden als auch die Methodik der Validierung zielführend war.

Zielsetzung

In einem kooperativen Projekt zwischen dem BEV und dem IFT der TU Wien wurde das vom BEV erstellte Lastenheft als Grundlage zur Herleitung eines detaillierten Pflichtenheftes für eine Anlage zur Realisierung von Kräften genutzt. Darauf aufbauend erfolgte die Ausarbeitung eines Konzeptes, mit dem Ziel, ein System zur Darstellung der Kraft unter den gesetzten Bedingungen zu realisieren. Bei der Entwicklung wurde auch auf das Ergebnis eines Dissertationsprojekts zur Optimierung von Kraftmessmaschinen zurückgegriffen [36]. Ausgehend von der am IFT entstandenen Konstruktion wurde dieses Kraftnormalanlagensystem im BEV aufgebaut und so aus mehreren Kraftanlagen ein System als primäres Kraftnormal für das BEV geschaffen. Diese Anlage stellt somit die messtechnische Basis nicht nur für die Kalibrierung von Kraftmessgeräten der höchsten Genauigkeitsklasse (00) [4] dar, sondern soll auch für zukünftige wissenschaftliche Projekte im Bereich der Kraftmessung erweiterte Funktionen aufweisen. Beispielsweise soll es möglich sein, im vollen beabsichtigten Messbereich Messungen der Kraft auf nationale Normale des österreichischen Etalons der Masse, der Länge und der Zeit rückführen zu können.

In der Dissertation wird mittels eines Überblickes über die internationale Gemeinschaft der Metrologie im zweiten Kapitel das System der gegenseitigen internationalen Anerkennung nähergebracht.

In Kapitel 3 wird aufbauend auf den Grundlagen der Kraftmessung sowie der Kraftnormalanlagen ein Überblick über den aktuellen Stand der Technik aus dem Bereich der Kraftrealisierung gegeben. Dabei werden grundlegende Analysen und Vergleiche bestehender Systeme vorgenommen. Unter dem Blickwinkel der Grundlagen der Messunsicherheitsbetrachtung werden mechanische und mathematische Zusammenhänge beschrieben und normative Prüfabläufe aus dem Bereich der Kraftmessung vorgestellt. Somit können jene Bereiche definiert werden, bei denen herkömmliche Kraftanlagen an Grenzen stoßen.

Kapitel 4 behandelt eine Grundanalyse von Unsicherheitsfaktoren bei der Kraftmessung im Rahmen einer Messunsicherheitsbetrachtung. Dabei werden systematisch alle kritischen Faktoren analysiert und messtechnisch erfasst, die Einfluss auf die Realisierung der Kraft haben. Es werden grundlegende Anforderungen aufgezeigt und von der zu erwartenden Messunsicherheit der Kraft eine Abwägung von verschiedenen Einflüssen aus der Kraftmessung beschrieben. Ausgehend von der zu erzielenden Messgenauigkeit als Vorgabe wird dabei durch die Betrachtung der Dimension von bekannten Einflussgrößen versucht, die maximal erlaubte Messunsicherheit vorerst noch nicht abzuschätzender Einflüsse abzuleiten. Systematisch werden dabei jene Haupteinflüsse ausgearbeitet, die bei herkömmlichen Systemen den Hauptanteil für Einschränkungen im Messbereich und Messverfahren verursachen. Durch diese detaillierte Betrachtung ist es möglich, für diese Einflüsse alternative Lösungen auszuarbeiten. Somit kann gezeigt werden, dass die Messmöglichkeiten primärer Kraftnormalanlagen sowie Systeme aus Kraftnormalanlagen wesentlich zu erweitern sind. Die Schaffung der metrologischen Rückführbarkeit, wie sie in Kapitel 5 beschrieben wird, ergibt die Ausgangsbasis für die Umsetzung dieses Kraftnormalanlagensystems. Bei der Verifizierung der entwickelten Anforderungen wird dabei als Kernteil vor allem spezielles Augenmerk auf jene Methoden und Lösungen gelegt, die auf den innovativen Ansätzen der vorangegangenen Analysen beruhen. Im Speziellen wird detailliert der Einfluss der Umgebungsbedingungen auf die für den Messbereich und die Messgenauigkeit

Zielsetzung

verantwortlichen Anlagenteile betrachtet, insbesondere auf die Gewichtscheiben und das dazugehörige Waagengehänge.

Nach einer kurzen Beschreibung der Konstruktion und des Aufbaus der Anlagen werden in Kapitel 6 sowohl konstruktions- als auch verfahrenstechnische Lösungen auf Grund des Anforderungsprofils verifiziert. Vor allem werden jene Anlagenteile genauer betrachtet, die bei vergleichbaren Anlagen noch nicht umgesetzt worden sind und deren Einfluss auf das Messergebnis und dessen Unsicherheit kritisch ist. Durch Zusammenführung und Interpretation der Messergebnisse wird die Prozessfähigkeit dieser Anlage belegt. Es wird der Beweis angestrebt, dass die bei bestehenden und gleichwertigen Anlagen auftretenden und durch internationale Kalibrierrichtlinien erfassten Störgrößen bei dieser Anlage in der Berechnung der Messergebnisse bzw. der Unsicherheitsbetrachtung keinen Einfluss finden. Zur Darstellung der Ergebnisse wurde dabei auf anerkannte Werkzeuge der Metrologie zurückgegriffen.

Das Kapitel 7 der Dissertation bildet den Kern der messtechnischen Beweisführung. Auf Basis von Erfahrungen aus internen Vergleichsmessungen mit kalibrierten TransfERNormalen wurden in einer wissenschaftlichen Zusammenarbeit mit der Physikalisch-Technischen-Bundesanstalt (PTB) als nationales Metrologieinstitut der Bundesrepublik Deutschland umfangreiche Vergleichsmessungen durchgeführt. Damit wurde die Verknüpfung zu den nationalen Normalen der Kraft der PTB geschaffen. Mit diesen messtechnischen Untersuchungen wurde somit die neue österreichische Kraftskala mit der anerkannten Kraftskala der PTB verglichen und bewertet. Diese Messungen bilden die Grundlage im BEV zur Validierung jener Anlage und des Prozesses zur Realisierung der Kraft. Sie sind die notwendige Beweisführung über die Prozessbeherrschung und die Basis für die Implementierung in das Qualitätsmanagement des BEV.

Damit auf Grund erzielter Messergebnisse die vom BEV ausgestellten Zertifikate durch die Unterzeichnerstaaten des Mutual Recognition Arrangement CIPM-MRA akzeptiert werden, ist diese umfassende Beweisführung obligatorisch.

Durch die gelungene Beweisführung über die Prozessbeherrschung wurde auch der Beweis erbracht, der die möglichkeitserweiternden Maßnahmen zur Realisierung der Kraft bei dieser Kraftnormalanlage belegt.

3 Stand der Technik bei der Kraftrealisierung

Um der Zielsetzung nachzukommen, die Darstellung des Newton auch für Metrologieinstitute mit beschränkten Ressourcen zu ermöglichen, ist eine genaue Bestandsaufnahme und Analyse aller Rahmenbedingungen durchzuführen. Dazu zählt nicht nur eine Zusammenfassung aller normativen Vorgaben im Bereich der Kraftmessung bzw. deren Darstellung, sondern auch eine genaue Betrachtung bestehender Lösungen für Kraftnormalanlagen. Die mechanische Analyse und mathematische Beschreibung des Verfahrens zur Kraftdarstellung sowie aufbauend darauf die Ermittlung der Grenzwerte in der Betrachtung der Messunsicherheit, die jeder Messung zugrunde liegen, identifizieren jene Bereiche des Darstellungsverfahrens, bei denen Potential zur Verbesserung besteht.

3.1 Normierung im Bereich Kraftmessung

Bei der Kraftmessung sowie bei deren Auswertung verwendet man in erster Linie die vier nachfolgend beschriebenen Dokumente. Vorgaben, die sich nur sekundär mit der Bestimmung von Kräften beschäftigen, bleiben hier unerwähnt. Ausdrücklich wird darauf hingewiesen, dass es sich hierbei um Richtlinien handelt, deren Einhaltung näherer Erläuterungen entbehrt. Sind aus technischen Gründen Abweichungen zu den Vorgaben notwendig, so sind diese in der Dokumentation bzw. in den Ergebnisberichten detailliert zu beschreiben.

Spezielle Normierung und Richtlinien für die Kraftmessung:

- ÖNORM, EN ISO 376: Metallische Werkstoffe — Kalibrierung der Kraftmessgeräte für die Prüfung von Prüfmaschinen mit einachsiger Beanspruchung

Diese internationale Norm [4] legt ein Verfahren zur Kalibrierung von Kraftmessgeräten für die statische Prüfung einachsiger Prüfmaschinen (z.B. Zug-Druckprüfmaschinen) fest und beschreibt ein Verfahren für die Klassifizierung dieser Geräte. Sie gilt allgemein für Kraftmessgeräte, bei denen die Kraft durch Messung der elastischen Formveränderung eines Verformungskörpers oder einer ihrer proportionalen Messgrößen bestimmt wird.

- Calibration Guide; EURAMET cg-4: Uncertainty of Force Measurement

Dieser Leitfaden [5] gibt eine Richtlinie für die Abschätzung der Messunsicherheit bei der Kraftmessung in verschiedenen Bereichen wieder:

- die Unsicherheit der Kraft verursacht durch die nationale Kraftmaschine (Primärnormal)
- die Unsicherheit der Kraft verursacht durch die Kalibriermaschine (Sekundärnormal)
- die Unsicherheit der Kraft verursacht durch das verwendete Messinstrument
- die Unsicherheit der Kraft verursacht durch das industrielle Krafterzeugungssystem

Die Unsicherheitsbetrachtung wird hier in zwei Bereiche geteilt:

- die Unsicherheitsbetrachtung des Kraftmessgerätes während der Kalibrierung
- die Unsicherheitsbetrachtung des Kraftmessgerätes nach der Kalibrierung

Stand der Technik

- ergänzend werden Unsicherheitsbeiträge bei der dynamischen Kraftmessung erwähnt.

- Richtlinie DAkKS / DKD-R 3-3; Kalibrierung von Kraftmessgeräten

Die Richtlinie [6] gilt für statische Belastungsverläufe. Neben den bisher üblichen Kalibrierabläufen mit drei Einbaustellungen werden auch vereinfachte Abläufe beschrieben, die den Aufwand auf ein messtechnisch vertretbares Mindestmaß und damit auch die Kosten reduzieren. Dazu sind bestimmte Voraussetzungen, wie die Anforderungen internationaler Regeln zur Bestimmung der Messunsicherheit, zu erfüllen. Der in dieser Richtlinie beschriebene Aufwand ist als Mindestmaß zu verstehen, der Anwender kann darüber hinausgehen, er darf ihn jedoch nicht verringern. Die Richtlinie erlaubt, praxishere Kalibrierabläufe und Auswertungen umzusetzen.

Grundsätzlich ist es nicht möglich, durch vereinfachte Kalibrierabläufe kleinere Messunsicherheiten zu erzielen als entsprechende Kalibrierungen desselben Kalibriergegenstandes nach aufwendigeren Verfahren, z. B. ein Verfahren gemäß DIN EN ISO 376.

In dieser Richtlinie werden keine Klassifizierungen mehr beschrieben. Die Richtlinie gilt für alle Kraftmessgeräte, bei denen die Kraft über die elastische Verformung eines Körpers ermittelt wird. Sie kann auch für Kraftaufnehmer allein angewendet werden.

- Richtlinie DAkKS / DKD-R 3-9: Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren

In dieser Richtlinie [7] werden Mindestanforderungen an das Kalibrierverfahren und an die Abschätzung der Messunsicherheit bei der kontinuierlichen Kalibrierung von Messgrößenaufnehmern für mechanische Größen festgelegt.

Dies gilt für Kalibriergegenstände, die durch vom Kalibrierlaboratorium beigestellte Einspannteile zu einer vollständigen Messkette ergänzt werden müssen. Die Einspannteile sind Teil der Kalibriereinrichtung. Damit wird die Anwendung der Richtlinie grundsätzlich auf Messgrößenaufnehmer ohne Einspannteile als Kalibriergegenstand eingeschränkt. Die Anwendung der Richtlinie setzt voraus, dass die nach dem Vergleichsverfahren arbeitenden Kraftbezugsnormalmesseinrichtungen in der Lage sind, sowohl einen stufenförmigen als auch einen kontinuierlichen Belastungsverlauf zu realisieren.

Unter kontinuierlichen Kalibrierabläufen wird hier eine stetige Messgrößenänderung verstanden, deren Zeitverhalten z.B. rampenförmig oder \sin^2 -förmig („haversine“-förmig; $\text{hav}(x) = \sin^2(x/2)$) verläuft. Der Ablauf ist aber im Gegensatz zur dynamischen Belastung mit beispielsweise sinus- oder stoßförmigem Zeitverlauf als quasistatisch zu betrachten. Es wird von einer Dauer der Belastungszeit vom Beginn der Messung mit einem Kraftanstieg bis zum Kalibrierbereichsendwert von minimal 1 min ausgegangen, z.B. bei DMS-Messtechnik. Die zeitkritischen Parameter des kontinuierlichen Kalibrierablaufs und der Komponenten wie z.B. Anstiegsgeschwindigkeit der Belastung, zeitgleiche Datenerfassung, Filtercharakteristiken, usw. beeinflussen das Kalibrierergebnis in stärkerem Maße als bei stufenweisem Ablauf. Sofern die Kalibriereinrichtung und die messtechnische Ausrüstung einen schnelleren Kalibrierablauf zulassen, müssen die Beiträge zur Messunsicherheit im Einzelfall nachgewiesen und quantifiziert werden, z.B. bei piezoelektrischer Messtechnik. Die Einflüsse sind zum Zwecke der Vergleichbarkeit zu benennen und anzugeben. Die Abläufe und Festlegungen in dieser Ausgabe der

Stand der Technik

Richtlinie sind vorläufig auf das nachweisliche Erreichen einer kleinsten angebbaren Messunsicherheit (kleinste angebbare Messunsicherheit bei statischer Kalibrierung) $W_{\text{bmc}} \geq 1 \cdot 10^{-3}$ vom Messwert ausgelegt. Besonderheiten, die durch die Kalibriereinrichtung vorgegeben sind, müssen vom Kalibrierlaboratorium bestimmt und bei der Abschätzung der Messunsicherheit berücksichtigt werden.

3.2 Kraftmessgeräte und Kraftnormalanlagen

Als Kraftmessgerät wird die Summe der gesamten Messkette vom Kraftaufnehmer (Verformungskörper) bis zum Anzeigegerät verstanden.

Durch die vergleichende Messmethode werden Kraftaufnehmer in der Metrologie auch als Transfernormale bezeichnet, da sie als Träger der Vergleichsmöglichkeit zwischen bekannten und unbekanntem Kräften dienen.

Die Kalibrierung eines Transfernormals oder Kraftaufnehmers besteht darin, dass genau bekannte Kräfte in den Kraftaufnehmer eingeleitet und die ausgewiesenen Verformungswerte des Anzeigegerätes aufgezeichnet und ausgewertet werden.

Bei entsprechender Ausführung des Kraftaufnehmers kann die Verformung des Verformungskörpers sowohl mit mechanischen als auch elektrischen, optischen oder sonstigen Mitteln und Messgeräten gemessen werden. Je nach Ausführung des Messgerätes erfolgen die Messungen mit der erforderlichen Genauigkeit und Konstanz. Das heißt, die Qualität des Verformungsmesssystems ist dafür entscheidend, ob das Kraftmessgerät nur für bestimmte Kalibrierkräfte oder auch für die Interpolation klassifiziert werden kann.

Die größte Bedeutung im Bereich der Kraftmessung haben Kraftaufnehmer mit Dehnungsmessstreifen (DMS). Das Messprinzip beruht darauf, dass ein Widerstandsdraht seinen elektrischen Widerstand bei Dehnung ändert. Dieser Widerstandsdraht hat nur 3 bis 8 μm Durchmesser und ist in einem dünnen Kunststoffträger mäanderförmig integriert. DMS applizierte Wägezellen unterschiedlicher Bauart können über große Nennkraftbereiche verwendet werden. Dabei kann auch, je nach Ausführung, eine Fehlergrenze in der Größenordnung von 0,03% erreicht werden, ein Grenzwert, der nach den Klassifizierungsrichtlinien der EN ISO 376 [4] höchste Güte erfordert.

Grundprinzip ist dabei, dass die axial eingeleitete Kraft einen Körper in axialer Richtung staucht und diesen im Umfang entsprechend der Poissonzahl μ dehnt. Diese Umfangsdehnung wird nun mittels DMS gemessen und einer Kraft nach den Erkenntnissen einer Kalibrierung zugeordnet. In Zugrichtung wird in analoger Weise die Einschnürung des Körpers gemessen. Für kleine Kräfte ist es möglich, mittels DMS auch die Biegedehnung zu erfassen.

Die DMS werden dabei direkt auf den Zug-Druckkörper geklebt und können als Wheatstone'sche Viertel-, Halb- oder Vollbrücke geschaltet sein.

Entscheidenden Einfluss in der Kraftmessung hat die mechanische Verbindung zwischen dem kraftausübenden und dem kraftmessenden Teil (Einspannteile-Kraftaufnehmer). Für diese krafteinleitenden Komponenten gibt es in der ÖNORM, EN ISO 376 [3] eine allgemeine Beschreibung sowie Beispiele.

Alle in dieser Arbeit beschriebenen Kraftmessungen wurden mittels DMS-applizierter Kraftsensoren (Krafttransfernormale) durchgeführt. Sie entstammen einer Serie von Zug-Druck-Transfernormalen des BEV, die im Zuge der Realisierung der Kraft für

Stand der Technik

Vergleichszwecke verwendet werden. Die Messhistorie dieser Transferrnormale ist bestens bekannt. Darüber hinaus liegen Kalibrierzertifikate anderer Metrologieinstitute, zum Beispiel von der PTB, vor. Als Anzeigegerät für die Verformungswerte wurde eine Messbrücke der Type DMP 40 mit dem Messbereich 2,5 mV/V und einer Auflösung von 0,000001 mV/V ($1 \cdot 10^{-6}$ mV/V) verwendet. Durch die Durchführung und Auswertung einer signifikanten Anzahl von Messserien mit gleichartigen Transferrnormalen mit unterschiedlichen Messbereichen wurde die Basis für die gesamte Validierung der Kraftnormalanlage geschaffen.

Kraftmessenanlagen, wie sie in unterschiedlichen Kombinationen als Kraftnormalanlagensysteme von nationalen Metrologieinstituten zur Realisierung der Kraft verwendet werden, können in zwei Bereiche eingeteilt werden:

- Primäre Kraftnormalanlagen sind Kraftnormalanlagen, bei denen die aufgebrachte Kraft direkt aus der Umsetzung eines physikalischen Messprinzips abgeleitet und deren Größe aus einem mathematischen Modell dieses Prinzips berechnet wird. So wird z.B. nach $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$, mit der Kraft \vec{F} , der konstanten Masse m und der Beschleunigung \vec{a} die Gewichtskraft einer bekannten Masse abgeleitet. Praktisch gesehen wird die Kraft durch diese bekannte Masse bei bekannter Erdbeschleunigung realisiert oder, anders beschrieben, die Kraft wird durch die Gewichtskraft von bekannten Belastungskörpern im bekannten Schwerfeld der Erde erzeugt (vgl. Totlastkraftanlagen).
- Sekundäre Kraftnormalanlagen sind Kraftanlagen, deren Krafterzeugung nicht näher definiert vor sich geht (zum Beispiel wenn die Kraft hydraulisch oder mechanisch aufgebracht wird), wobei die absolute Größe der erzeugten Kraft nur untergeordnete Bedeutung hat. Die Größe der momentanen Kraft wird nur im direkten Vergleich mit kalibrierten Krafttransferrnormalen bestimmt. Diese sekundären Kraftnormalanlagen realisieren die Kraft nicht, sie sind nur Mittel zur Kraftaufbringung. Die Rückführung der Kraft erfolgt ausschließlich über die an primären Kraftnormalanlagen kalibrierten Transferrnormale. Unterschieden werden hier hydraulische Applikationen, mechanisch übersetzte Applikationen und Systeme, die mehrere Transferrnormale gleichzeitig benutzen.

Ein großer Teil der weltweiten NMIs beschäftigt sich im Rahmen der abgeleiteten Maßeinheiten der Masse mit Kraft. Aufgebaut ist die Kraftmessung in den NMIs, je nach abgedecktem Messbereich, auf primären Kraftnormalanlagen, oft mit angeschlossenen mechanisch oder hydraulisch übersetzten Erweiterungen. Ausgangspunkt dabei sind zumeist eine oder mehrere Totlastkraftanlagen, die zur Realisierung der Kraft in direkter Ableitung von der Masse und der Erdschwere herangezogen werden. Zur weiteren Unterscheidung werden Anlagen nach ihrer maximal realisierbaren Laststufe bezeichnet. Wie schon 1978 in [15] und [16] beschrieben, werden diese Kraftnormalmaschinen in „Belastungsmaschinen mit kettenförmig anhängenden Belastungskörpern“, wobei die „Belastungskörper übereinander gestapelt werden und kettenförmig am Belastungsgehänge hängen“, und in Belastungsmaschinen mit frei wählbarer Reihenfolge der Belastungskörperverwendung geteilt. Hier kann jeder Belastungskörper zwar nur einmal, dafür jedoch in frei wählbarer Reihenfolge und in einer Belastungsfolge ohne Zwischenentlastung aufgebracht werden. Bei diesen Maschinen ist man allerdings an die Anzahl der Gewichte und die Reihenfolge der realisierbaren Laststufen gebunden.

Stand der Technik

Die meisten Laboratorien, die sich mit Kraftmessung beschäftigen, verwenden zum Großteil Kraftnormalmaschinen auf dem Prinzip der Kettenstapel [8],[15]. Der Grund liegt wohl in der einfachen und robusten Bauweise und der kommerziellen Herstellung. Kraftnormalmaschinen mit unabhängig ansteuerbaren Gewichten werden in der Regel nur als Sonderkonstruktionen einiger Metrologieinstitute realisiert, wie z.B. im Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS) mit einer 100 kN-Totlastkraftanlage [17] oder im CNR-IMGC (heutige INRIM, NMI Italien) [19]. Sonderformen in der Anwendung, wie der Vergleich der Kräfte mit Wägezellen in der Totlastkraftanlage des CENAM (NMI Mexiko) [18], bleiben eher Einzellösungen und beruhen auf spezifischen Notwendigkeiten der NMIs.

Im Bereich der kleinen Kräfte (beginnend bei 0,001 mN bis 10 N) gibt es nur Sonderlösungen einzelner Metrologieinstitute. Die Realisierungsmöglichkeiten der Kraft gehen in diesem Messbereich mehr über die Methodik von Wägetechniken. Dabei kommen als Vergleichsnormale hochgenaue Wägezellen von Kleinstwaagen zum Einsatz, wobei die Kraft über Piezoelemente aufgebracht wird ([20] und [21]). Eher ungewöhnlich ist hier, wie in [22] beschrieben, eine Ausführung als Totlastkraftanlage mit Belastungskörper im Milligramm-Bereich.

Im Großlastbereich gibt es ebenfalls Ausführungen als Totlastkraftanlagen wie die 2 MN-Anlage der PTB [23], Deutschland, die 1,2 MN-Anlage des NPL [24], UK, oder die 4,448 MN-Anlage des NIST [26], USA. Meist werden die Anlagen in diesem Messbereich als mechanisch oder hydraulisch übersetzte Totlastkraftanlagen realisiert; zum Beispiel in dem Bereich von 16,5 MN (PTB) [25] oder 53 MN (NIST) [26].

Als Vergleich und zur Erfassung der Messmöglichkeiten anderer NMIs im Bereich der Kraftmessung sei hier aus Gründen des Umfanges ausschließlich auf die Messmöglichkeiten im Kraftbereich bis 5 MN der PTB als eines der führenden Metrologieinstitute Europas eingegangen. Hier erfolgt die Realisierung der Kraftskala mit einem System von Kraftnormalanlagen oder auch Kraftnormalmesseinrichtungen (K-NME) wie sie an der PTB genannt werden, nach zwei Prinzipien. Zum einen erfolgt sie mit mehreren Totlast-Kraftnormalanlagen bis 2 MN und zum anderem für größere Kräfte bis 16,5 MN durch zwei hydraulisch übersetzte Totlastanlagen. Da zu einer lückenlosen Darstellung der Kraft je nach Umfang der Normalanlage eine gewisse Überlappung in den realisierbaren Laststufen notwendig ist, verfügt die PTB über folgende Kraftnormalanlagen und kann dabei die angegebenen Laststufen realisieren (Messunsicherheitsangaben nach Kapitel 3.4.3):

Stand der Technik

200-N-Kraftnormalmesseinrichtung

Kurzbezeichnung	200-N-K-NME
Prinzip	direkte Massewirkung
rel. erw. ($k=2$) Messunsicherheit	$2 \cdot 10^{-5}$
Kraftstufung	0,5 N, 1 N, ..., 5 N 1 N, 2 N, ..., 10 N 2 N, 4 N, ..., 20 N 5 N, 10 N, ..., 50 N 5 N, 10 N, ..., 100 N 10 N, 20 N, ..., 200 N



2-kN-Kraftnormalmesseinrichtung

Kurzbezeichnung	2-kN-K-NME
Prinzip	direkte Massewirkung
rel. erw. ($k=2$) Messunsicherheit	$2 \cdot 10^{-5}$
Kraftstufung	50 N, 100 N, 150 N, 200 N, 250 N, 300 N, 350 N, 400 N, 500 N, 500 N, 600 N, ..., 1000 N, 1200 N, 1400 N, ..., 2000 N



20-kN-Kraftnormalmesseinrichtung

Kurzbezeichnung	20-kN-K-NME
Prinzip	direkte Massewirkung
rel. erw. ($k=2$) Messunsicherheit	$2 \cdot 10^{-5}$
Kraftstufung	0,25 kN, 0,5 kN, ..., 2 kN, 2,5 kN, ..., 5 kN, 6 kN, ..., 10 kN, 12 kN, ..., 20 kN



100-kN-Kraftnormalmesseinrichtung

Kurzbezeichnung	100-kN-K-NME
Prinzip	direkte Massewirkung
rel. erw. ($k=2$) Messunsicherheit	$2 \cdot 10^{-5}$
Kraftstufung	2 kN, 4 kN, 5 kN, 6 kN, 8 kN, 10 kN, 12 kN, 14 kN, 15kN, 16 kN, 18 kN, 20 kN, 25 kN, ..., 50kN, 60 kN, ..., 100kN



Stand der Technik

1-MN-Kraftnormalmesseinrichtung

Kurzbezeichnung	1-MN-K-NME
Prinzip	direkte Massewirkung
rel. erw. ($k=2$) Messunsicherheit	$2 \cdot 10^{-5}$
Kraftstufung	20 kN, 40 kN, 50 kN, ..., 1000 kN



2-MN-Kraftnormalmesseinrichtung

Kurzbezeichnung	2-MN-K-NME
Prinzip	direkte Massewirkung
rel. erw. ($k=2$) Messunsicherheit	$2 \cdot 10^{-5}$
Kraftstufung	50 kN, 60 kN, 70 kN, ..., 2000 kN



5-MN-Kraft-Normalmesseinrichtung

Kurzbezeichnung	5-MN-K-NME
Prinzip	hydraulische Übersetzung
rel. erw. ($k=2$) Messunsicherheit	$1 \cdot 10^{-4}$
Kraftstufung	50 kN, 100 kN, 150 kN, ..., 5000 kN



Die für dieses Kraftnormalanlagensystem zur Verfügung stehende Labor-Grundfläche beläuft sich an der PTB etwa auf 600 m², die Anlagen erstrecken sich dabei auf bis zu sechs Stockwerke (Quelle: www.ptb.de, Stand Mai 2014).

Stand der Technik

Analysiert man am Beispiel der PTB die Verteilung der Lastmaschinen auf den Messbereich bis 5 MN, so lässt sich in einer graphischen Darstellung hervorragend die Überlappung der Teilbereiche erkennen. Diese Überlappung ist nicht nur im Zuge der Darstellung der Kraft notwendig, sie hat vielmehr Bedeutung bei der Weitergabe der Kraft durch die Kalibrierung von TransfERNormalen sowie beim direkten Vergleich identer Laststufen zweier Kraftmaschinen. So können Kraftanlagen direkt bei denselben Laststufen verglichen werden.

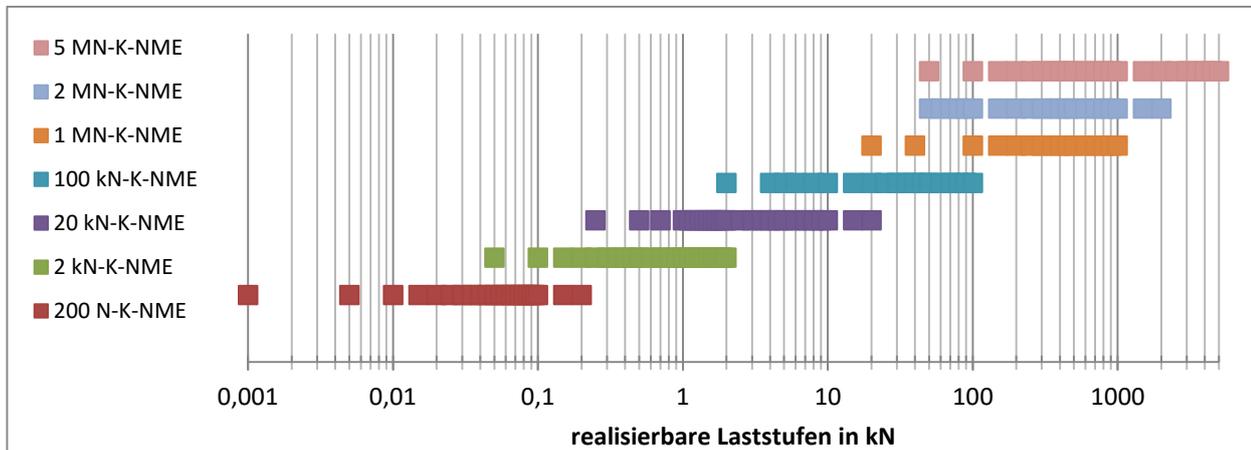


Abbildung 1: Verteilung der realisierbaren Laststufen der Kraftnormalanlagen bis 5 MN bei der PTB

In Abbildung 1 wurden die realisierbaren Laststufen der einzelnen Kraftnormalmaschinen erfasst und graphisch gegenübergestellt. Die realisierten Laststufen jeder Kraftmaschine sind in logarithmischer Form auf der horizontalen Achse aufgetragen. Die Last-Teilbereiche der Kraftnormalanlagen sind in nicht maßstabsgetreuer Größe zur Veranschaulichung des Bereiches jeder Kraftmaschine in vertikaler Ausrichtung übereinander in Balkenform aufgetragen. Durch die Darstellung kann man die Überlappungsbereiche abschätzen, wobei deutlich erkennbar ist, dass bei den kleinen Laststufen jeder Kraftmaschine nicht alle Laststufen der nächstkleineren Kraftnormalmaschine realisiert werden können. Hier stehen konstruktionsbedingt keine Belastungskörper passender Masse zur Verfügung. Auf diese entstehenden „Lücken“ ist insbesondere bei der Auswahl der Kraftmaschine bei normativ vorgeschriebenen Kalibrierungen von Kraftsensoren zu achten.

Vergleicht man die Situation der PTB mit anderen Metrologieinstituten wie z.B. dem National Physical Laboratory (NPL) in Teddington, London, UK, die vergleichbare Anlagen vorweisen können, erhält man eine ähnliche Aufteilung.

Bei vielen Metrologieinstituten ist die zur Verfügung stehende Laborfläche eines der Hauptkriterien, ob und in welchem Umfang ein Aufbau einer Kraftnormalanlage umgesetzt werden kann. Dabei steht natürlich nicht nur die Investition selbst im Vordergrund, sondern finanziell von Bedeutung ist vor allem die Erschaffung und Erhaltung der notwendigen Infrastruktur. Die Bedarfsanalyse an Kraft-Teilbereichen ist deshalb so detailliert zu betrachten, da die Auswahl des Messbereichumfanges direkt mit dem zu erwartenden Platzbedarf zusammenhängt.

Abbildung 2 visualisiert die Abschätzung der benötigten Laborgrundfläche in m², wobei zur notwendigen Grundfläche für jede Normalmesseinrichtung selbst eine Fläche zur

Stand der Technik

Bedienung der Anlagen addiert worden ist. Somit ist es möglich, eine Vorstellung bezüglich der Größe der Laborfläche zu erhalten. Obwohl die Anlagenhöhe bei dieser Auslegung vorerst nicht dargestellt worden ist, ist diese zu berücksichtigen. Sie trägt zur Abschätzung des benötigten Labor-Raumbedarfs und vor allem zur Abschätzung des Aufwandes bei der Klimatisierung des Labors bei.

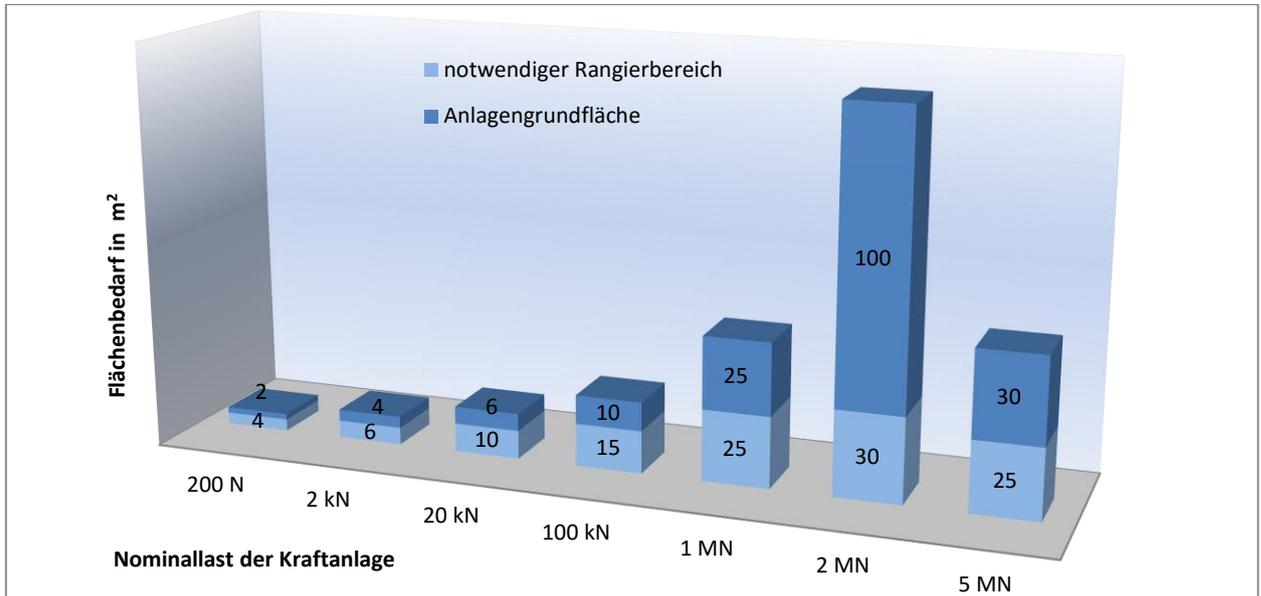


Abbildung 2: Geschätzter Flächenbedarf der PTB Kraftnormalanlagen bis 5 MN

Die Größen der Kraftnormalanlagen ohne Versorgungsgeräte betragen dabei von etwa einer Fläche von 1 m x 1 m bei einer Höhe von 2 m (200 N-Totlastanlage) bis etwa 10 m x 10 m Fläche und einer Höhe von 18 m (2000 kN-Kraftnormalanlage). Es sei speziell darauf hingewiesen, dass sich bei den größeren, als Totlastanlage ausgeführten Kraftnormalanlagen durch die größer werdenden Massestapel die benötigte Grundfläche vervielfacht, während der Flächenbedarf bei hydraulischen oder hebelübersetzten Kraftanlagen auf Grund der fehlenden oder wesentlich kleineren Massestapel deutlich geringer ausfällt. Siehe dazu das Verhältnis der Flächen von der 1 MN-Totlastanlage, der 2 MN-Totlastanlage und der hydraulisch übersetzten 5 MN-Totlastanlage in Abbildung 2.

3.3 Messtechnischer Vergleich von Kraftnormalanlagen

Die von der internationalen Gemeinschaft anerkannten Messmöglichkeiten aller Messbereiche von NMIs sind in einer Datenbank des BIPM (<http://kcdb.bipm.org/appendixC/>) der Calibration and Measurement Capabilities (CMC) veröffentlicht. Nach dem EURAMET cg-4: Calibrations Guide [5] können proklamierte Einträge in den CMC für Kraftmaschinen nur dann akzeptiert werden, wenn entsprechende Vergleichsmessungen mit anerkannten nationalen Kraftnormalmaschinen unter Verwendung von hochpräzisen TransfERNormalen durchgeführt worden sind. Die Durchführung solcher Vergleichsmessungen sind aber nicht wie bei einer Standardkalibrierung nach ISO 376 durchzuführen, sondern sollen im Ablauf einem internationalen Schlüsselvergleich ident sein. Schlüsselvergleiche sind jene Vergleichsprojekte der NMIs, die der Sicherstellung der internationalen Vergleichbarkeit und Anerkennung dienen. Die Analyse dieser Vergleichsmessungen sollte den Beweis erbringen, dass unter Verwendung derselben Prüfmethode und gleichem Ablauf die Ergebnisse beider Kraftnormalmaschinen (der anerkannten und der zu prüfenden) im

Stand der Technik

metrologischen Sinne gleichwertig und vergleichbar sind. Vereinfacht gesagt ist messtechnisch zu belegen, dass dieselben Messergebnisse erzielt werden wie mit einer erprobten und der Fachwelt bekannten Kraftnormalanlage.

Als Ausgangsbasis kann eine anerkannte Methode für einen derartigen Beleg aus dem Punkt 5 des EURAMET cg-4: Calibrations Guide [5] genommen werden. Erläutert wird hier eine Methode des Vergleiches zwischen zwei Kraftmaschinen, wobei allerdings eine davon eine messtechnische Abhängigkeit zu der anderen hat. Gemeint ist im Calibrations-Guide in erster Linie der „Vergleich“ im Zuge einer Kalibrierung einer unbekanntes Kraftnormalanlage eines Kalibrier-Laboratoriums durch eine Kraftnormalanlage eines nationalen Metrologieinstitutes, wobei die eine Kraftanlage somit auf die andere messtechnisch rückgeführt wird. Da diese Vorgehensweise eine hierarchische Abhängigkeit der beiden Kraftnormalmaschinen erzeugt, besteht infolge eine Korrelation der Ergebnisse. Im Originaltext werden auch die zu prüfenden Vergleichskraftnormalmaschinen als „Kalibriermaschinen“ bezeichnet. Demnach ist der Calibrations-Guide mehr so zu verstehen, dass Kraftnormalmaschinen verglichen werden, wobei eine Kraftnormalmaschine zur Realisierung der Kraft dient und die zweite zur Weitergabe der Kraft (z.B. in Form einer Materialprüfmaschine). Die Kraftnormalmaschine zur Realisierung der Kraft dient dabei als Bezugsnormal eines nationalen NMIs, während die andere Kraftnormalmaschine von einem Kalibrierlabor zur rückführbaren (siehe 3.4) Kalibrierung von Kraftsensoren verwendet wird.

Eine derartige wie oben beschriebene Abhängigkeit ist bei den in dieser Arbeit dargestellten Vergleichsmessungen der Kraftnormalanlagen des BEV und der PTB nicht vorgesehen (vgl. dazu Kapitel 7.5) und nicht erwünscht, da die verglichenen Kraftnormalanlagen auf gleichem hierarchischen Niveau in der Wertigkeit der nationalen Bezugsnormale stehen. Daher ist bei diesen Vergleichsmessungen die empfohlene Messunsicherheitsbetrachtung aus dem EURAMET cg-4, Calibrations-Guide [5] zu modifizieren.

Grundsätzlich ist vor jeder Vergleichsmessung eine Anzahl von TransfERNormalen festzulegen, die den gesamten Messumfang der Kraftnormalmaschinen abdeckt. Nach dem Calibration-Guide EURAMET cg-4 sind die TransfERNormale dabei so auszuwählen, dass der auszuwertende Lastbereich nicht kleiner als 40 % der maximal zulässigen Last ist. Die Erfahrung zeigt aber, dass eine Auswertung der Lastbereiche nur größer 50 % der Maximallast sinnvoll ist (siehe Kapitel 3.6.3), da hier die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse besser ist. Ebenso ist es zweckmäßig, verschiedene TransfERNormale zwischen den Krafrichtungen (Zug und Druck) zu verwenden, da bei Verwendung derselben TransfERNormale in beiden Krafrichtungen durch die Hysterese die Reproduzierbarkeit verringert wird. Um höchste Genauigkeit zu erzielen, sollen nach dem Calibration-Guide dabei als Anzeigegerät für die Transferstandards Messbrücken mit einer Auflösung besser als $2 \cdot 10^5$ Digits bei Vollast verwendet werden. Um bei der Betrachtung der Gesamtmessunsicherheit der Messungen die Unsicherheitsbeiträge für das Anzeigegerät zu minimieren, werden für die in dieser Arbeit beschriebenen Messungen Messbrücken mit einer Messauflösung von $2 \cdot 10^6$ Digits verwendet.

Vom Messablauf betrachtet sind mit diesen TransfERNormalen in jeder Kraftnormalmaschine die gleichen Messungen in mindestens drei Einbaupositionen (verschiedene Einbauwinkel) durchzuführen, wobei diese Messungen auch eine

Stand der Technik

Bestimmung der Hysterese zu enthalten haben. Zur Bestimmung der Wiederholbarkeit ist in mindestens einer Einbaustellung die Messserie zu wiederholen.

Dabei ist zu beachten, dass beim Vergleich von Kraftnormalmaschinen die Messungen mit dem TransfERNormal vor den Vergleichsmessungen an der Bezugs-Kraftnormalmaschine durchzuführen (Vormessungen) und im Anschluss an die Vergleichsmessungen sämtliche Messungen an der Bezugs-Kraftnormalmaschine zu wiederholen sind (Rückmessungen). Damit kann die Drift des TransfERNormals über den Zeitraum der Vergleichsmessungen bestimmt werden.

Zur weiteren Vorgehensweise werden durch die Gleichwertigkeit der Kraftnormalmaschinen beide als nationale Normale der Kraft gesehen und die fünf Schritte nach dem Calibration Guide EURAMET cg-4 für die Vergleichszwecke adaptiert (siehe Kapitel 7.3):

- Schritt 1: Bestimmung der Unsicherheit der realisierten Kraft bei der Bezugs-Kraftnormalmaschine
- Schritt 2: Bestimmung der Unsicherheit des Messwertes des TransfERNormals bei der Kalibrierung in der Bezugs-Kraftnormalmaschine
- Schritt 3: Bestimmung der Unsicherheit des Referenzwertes des TransfERNormals
- Schritt 4: Bestimmung der Kalibrierunsicherheit des Messwertes des TransfERNormals bei der Vergleichs-Kraftnormalmaschine
- Schritt 5: Vergleich mit der Unsicherheitsbestimmung der realisierten Kraft bei der Vergleichs-Kraftnormalmaschine

Mit der Summe aller Messungen kann die relative Abweichung zwischen den Kraftmaschinen bestimmt werden.

3.4 Betrachtung der Messunsicherheit

In diesem Zusammenhang sind die Vergleichsmessungen unter dem Blickwinkel der Rückführung zu betrachten: Von Rückführbarkeit (traceability) spricht man [12], wenn die Eigenschaft von Messgrößen durch eine ununterbrochene Kette von Vergleichsmessungen mit angegebener Messunsicherheit auf nationale oder internationale Normale bezogen wird. Nur bei nachgewiesener Rückführung wird im Rahmen des MRA die Gültigkeit der Kalibrier- und Prüfscheine von allen teilnehmenden Instituten gegenseitig anerkannt.

3.4.1 Grundlagen und Begriffe

Zahlreiche Einflüsse aus dem Messsystem selbst und aus der Umgebung wirken auf das Messergebnis ein und verfälschen es. Daher entsteht bei jeder Messung eine **Messabweichung Δx** des Messwertes x vom **wahren Wert x_w** , wobei der wahre Wert der Messgröße nicht festgestellt werden kann.

Die Messabweichung ist somit die Differenz aus dem wahren Wert und dem Messwert. Unter **Messgenauigkeit** versteht man (wie auch in [14] beschrieben) das Ausmaß der Annäherung der Messergebnisse an den wahren Wert der Messgröße. In diesem Zusammenhang tritt auch der Begriff der **Messunsicherheit** auf [11], [14]. Unter Messunsicherheit versteht man einen Schätzwert zur Kennzeichnung eines Wertebereiches, innerhalb dessen der wahre Wert der Messgröße liegt. Mit dem zuerst noch unbekanntem Betrag der Messunsicherheit u ist der untere Bereich ($-u$) und der

Stand der Technik

obere Bereich (+ u) des Wertebereiches definitionsgemäß $2u$ (geschrieben infolge U), wobei der Vertrauensbereich anzugeben ist. Zur besseren Veranschaulichung wird hier der Wertebereich bewusst auf den wahren Wert bezogen dargestellt; in der Praxis ist bei gleichem Ergebnis ein Bezug auch auf den Messwert möglich.

Zur Beurteilung der Messabweichungen und somit zur Erhöhung der Messgenauigkeit werden in der Regel Wiederholungsmessungen durchgeführt. Dabei unterscheidet man zwischen [14]:

- der **Wiederholbarkeit** einer Messung:
 - dasselbe Messverfahren,
 - dieselbe Messeinrichtung,
 - derselbe Beobachter,
 - derselbe Messort,
 - dieselben Bedingungen,
 - Wiederholung in einem bestimmten Zeitabstand.
- der **Reproduzierbarkeit** einer Messung:
 - des Messverfahrens,
 - der Messeinrichtung,
 - des Beobachters,
 - des Messortes,
 - der Bedingungen zu einem Zeitpunkt.
- der **Vergleichbarkeit** einer Messung:
 - des Messverfahrens,
 - der Messeinrichtung,
 - des Beobachters,
 - des Messortes,
 - identer Bedingungen wie zu einem Zeitpunkt,
 - in vergleichbaren aber verschiedenen Labors.

Die Wiederholbarkeit einer Messung wird quantitativ anhand eines Streumaßes für die Ergebnisse angegeben. Die Reproduzierbarkeit einer Messung ist dagegen die Annäherung der Ergebnisse von Messungen zu unterschiedlichen Bedingungen. Die Vergleichbarkeit einer Messung entspricht dabei der Reproduzierbarkeit einer Messung, wenn diese in verschiedenen, aber gleichartigen Labors durchgeführt wird.

3.4.2 Systematische und zufällige Messabweichungen

In Anlehnung an [14] werden **Messabweichungen** in

- grobe (vermeidbare) Messabweichungen (z.B. Fehler, falsche Anwendung),
- **systematische Messabweichungen** (korrigierbare, bekannte Einflüsse bekannter Größe) und
- **zufällige Messabweichungen** (nicht korrigierbare Abweichungen durch nicht bekannte Einflüsse)

gegliedert. Besteht das Messergebnis aus mehreren Teilmessungen, erhält man eine zusammengesetzte Messabweichung.

Ursachen für systematische Messabweichungen sind prinzipiell feststellbar und beseitigbar; die Ursachen von zufälligen Messabweichungen sind es dagegen mit den derzeit zur Verfügung stehenden Methoden der Messtechnik nicht [14]. In der Praxis der Messtechnik ist eine Unterscheidung von systematischen und zufälligen Messabweichungen oft schwierig. Nur bei eindeutig systematischen Einflüssen, bei denen auch eine Korrektur oder Beseitigung möglich ist, wird diese vorgenommen. In der Messunsicherheitsanalyse betrachtet man daher die Unterscheidung auch nicht weiter,

Stand der Technik

sondern behandelt zuerst die als systematisch erkannten Messabweichungen und wendet dann auf alle anderen Messabweichungen statistische Methoden an.

Zufällige Messabweichungen lassen sich in ihrer Gesamtheit durch Verteilungsfunktionen und statistische Kennwerte erfassen. Grundlage dafür ist nach [14], dass der arithmetische Mittelwert einer Reihe von Messungen unter Wiederholbedingungen x_0 sehr nahe beim wahren Wert x_w liegt. Misst man die Größe „X“ N -mal, dann erhält man für den arithmetischen Mittelwert x_0 , wenn x_i die Schätzwerte für die Größe „X“ darstellen.

$$x_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Für $N \rightarrow \infty$ geht der Mittelwert in den wahren Wert $x_w = \mu$ über. μ heißt **Erwartungswert** und ist die allgemeine Bezeichnung für den Mittelwert der Grundgesamtheit.

Dass der arithmetische Mittelwert der wahrscheinlichste Wert einer Messreihe ist, geht auf eine Annahme von Karl Gauß zurück. Bereits Gauß gab für die Streuung einer Messreihe den sogenannten „wahren mittleren Fehler“ der Messwerte an, den wir heute als **Standardabweichung** σ bezeichnen. Deren Quadrat heißt **Varianz** σ^2 .

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_w)^2$$

Da der wahre Wert nicht bekannt ist, wird in der Berechnung nach [14] der wahre Wert x_w durch den wahrscheinlichsten Wert (den arithmetischen Mittelwert) x_0 ersetzt, so erhält man die **empirische Varianz** s^2

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - x_0)^2$$

bzw. die empirische Standardabweichung s . Die beiden Gleichungen unterscheiden sich durch den Bezugswert und um den Freiheitsgrad. In [14] wird bewiesen, dass bei entsprechend hohen Stichproben die empirische Varianz s^2 der Varianz σ^2 gleichgesetzt werden kann und somit die empirische Varianz unabhängig von N ist.

Setzt sich das Messergebnis aus mehreren Größen zusammen, bedarf es zunächst einer Vorschrift, wie sich der Mittelwert des Messergebnisses aus Teilgrößen zusammensetzt, sowie einer analogen Anweisung für die **kombinierte Varianz** u_c^2 .

3.4.3 Angabe der Messunsicherheit

Wie in [14] beschrieben setzt sich die kombinierte Varianz aus den Teilvarianzen ($u^2(Q)$ und $u^2(\Delta t)$) zusammen, wobei die **Empfindlichkeitskoeffizienten** zu berücksichtigen sind. Diese Empfindlichkeitskoeffizienten sind die partiellen Ableitungen der Ergebnis- oder Ausgangsgröße Y .

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)$$

$\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2$ stellt dabei den Empfindlichkeitskoeffizienten für eine Größe dar.

Die **Normalverteilung** bezieht sich als stetige Verteilung auf unendlich viele Messungen.

Stand der Technik

In der Messtechnik zieht man aber stets nur eine „Stichprobe“, die lediglich $N \ll \infty$ Werte enthält. Es ist klar, dass vor allem für kleine N (z.B. $N < 10$) die Normalverteilung eine mehr oder weniger gute Näherung an die tatsächlichen Verhältnisse liefern wird. Der arithmetische Mittelwert kann hier auch nur eine Näherung des wahren Wertes sein und die empirische Varianz kann nur einen ungefähren Wert für die Varianz der Normalverteilung darstellen. Wie [14] beschreibt, werden die Verhältnisse bei Messprozessen mit N Wiederholungen, bei denen man zufällige Messabweichungen erhält, deshalb besser durch die sogenannte **Student- oder t-Verteilung** beschrieben. Die Studentverteilung ist der Normalverteilung sehr ähnlich und geht für $N \rightarrow \infty$ auch in diese über. Die Abweichungen gegenüber der Normalverteilung werden durch einen Studentfaktor t beschrieben, der in der messtechnischen Praxis eine große Bedeutung hat. Bei der Normalverteilung entspricht einer Auftrittswahrscheinlichkeit von 68,3 % ein Bereich um den Erwartungswert von $\pm\sigma$. Bestimmt man bei der Studentverteilung einen Bereich um den Erwartungswert, der ebenfalls einer Auftrittswahrscheinlichkeit von 68,3 % entspricht, dann ist dieser Bereich meist deutlich größer und beträgt: $\pm t_{68,3}\sigma$. Analog ist für die Auftrittswahrscheinlichkeiten von $P = 95,45\%$ die Intervallbreite: $t_{95,45}\sigma$ und für $P = 99,73\%$: $t_{99,73}\sigma$.

Man kann im Allgemeinen für die kombinierte Varianz eine Normalverteilung ansetzen. Wenn aus der kombinierten Varianz die sogenannte **erweiterte Messunsicherheit U** gebildet werden soll, die einer Auftrittswahrscheinlichkeit von 95,45% entspricht, kann somit ein Erweiterungsfaktor $k=2$ angenommen werden, der einem Intervall von $\pm 2\sigma$ um den Erwartungswert entspricht. Nach [14] ist die Messunsicherheitsermittlung, wie jede Messung, stets eine Schätzung.

Um im allgemeinen Fall Beiträge zur Messunsicherheit mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeitsverteilungen verknüpfen zu können, werden die **effektiven Freiheitsgrade** ν_{eff} herangezogen. In [14] beschrieben, sind sie ein passendes Maß für die Zuverlässigkeit der Standardunsicherheit einer Ausgangsschätzung. Im Wesentlichen gilt, je eingeschränkter Standardunsicherheiten sind (z.B. geringe Wiederholmessungen, Verwendung von Ausgleichspolynomen, ...) desto kleiner ist der Freiheitsgrad. Freiheitsgrade gegen ∞ zeigen Werte innerhalb fixer Grenzen (z.B. Rechteckverteilung). Ziel der Ermittlung der Freiheitsgrade ist daraus die Berechnung eines angemessenen Erweiterungsfaktors k . Trivial zusammengefasst lässt sich für jeden gewünschten Vertrauensgrad einer Verteilung aus dem Freiheitsgrad der Standardunsicherheit der passende Erweiterungsfaktor einer Studentverteilung bestimmen. So ist z.B. für den Vertrauensgrad von 95,45% bei einem $\nu_{\text{eff}} = 10$, $k=2,28$; bei einem $\nu_{\text{eff}} = 50$, $k=2,05$ oder einem $\nu_{\text{eff}} = \infty$, $k=2,0$.

Es ist also im Allgemeinen nicht so entscheidend, ob der Erweiterungsfaktor $k=2$ ist oder der Vertrauensgrad um einige Prozent größer oder kleiner ist. Entscheidend ist die eindeutige Angabe der Ergebnisse. Die erweiterte Unsicherheit kann dabei absolut in der Einheit des Ergebnisses (U) oder relativ zum Ergebniswert (W) in % ausgedrückt werden.

3.4.4 Darstellung der Messunsicherheit mittels GUM-Work-Bench

Eine in der Metrologie verbreitete Methode Messunsicherheitsberechnungen durchzuführen ist die Verwendung des GUM-Work-Bench [9].

Diese Methode bietet vollständige Unterstützung bei der Messunsicherheitsanalyse. Alle statistischen und mathematischen Verfahren des ISO Guide: Unsicherheit beim Messen

Stand der Technik

(GUM), „Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement“, JCGM 100:2008, [9], sind implementiert und werden bei der Auswertung automatisch angewendet. Die Software unterstützt die systematische Vorgehensweise und bietet die Verwaltung der Informationen zur Bestimmung der Messunsicherheit und zur Erstellung eines detaillierten Berichtes.

Die Vorteile dieses Werkzeuges liegen somit in den Darstellungsmöglichkeiten des Ergebnisses. Nach der Erstellung der Modellgleichungen (siehe 3.5) werden den einzelnen Größen Werte (Maßzahlen) und Einheiten zugeordnet sowie gegebenenfalls zwischen den einzelnen Größen Korrelationen festgelegt. Entsprechend der Vorgaben des GUM werden die partiellen Ableitungen der Modellgleichungen über die einzelnen Größen durchgeführt und dargestellt. Im Ergebnis dargestellt wird der Wert jeder Größe, dessen Unsicherheit (Standardabweichung), der Freiheitsgrad, der Sensitivitätskoeffizient sowie der Unsicherheitsbeitrag zur Ergebnisgröße zugeordnet. Die Unsicherheit wird je nach Einstellung absolut in der Einheit des Ergebnisses (U), relativ (W) oder relativ in % ausgedrückt.

Der zentrale Vorteil dieses Werkzeuges für den Anwender ist die einfache Visualisierung der Ergebnisse und die Möglichkeit, diese in textverarbeitende Programme zur Dokumentation einzufügen.

3.5 Modellierung zur Kraftrealisierung

In der Metrologie heißt rückführbar, wenn die Eigenschaft von Messgrößen auf eine ununterbrochene Kette von Vergleichsmessungen mit angegebener Messunsicherheit bezogen wird. Realisierung einer Größe bedeutet, sie zum einen mechanisch darzustellen und zum anderen gleichzeitig nach mathematischen Methoden zu definieren. Die geforderten Vergleichsmessungen beinhalten daher nicht nur die Messungen an sich, sondern die erhaltenen Ergebnisse dienen auch als Ausgangsbasis mathematischer Überlegungen. Deren Ergebnis ist ein Wert (mit Maßeinheit), der den besten zur Verfügung stehenden Schätzwert darstellt. Das Ergebnis ist natürlich mit einem Unsicherheitsanteil beaufschlagt, der ebenfalls zu nennen ist. Im Zuge der Messunsicherheitsbetrachtung ist aber nicht nur die detaillierte Kenntnis des Verfahrens und deren Einflussgrößen nötig. Ausgangsbasis zur Auswertung der erzielten Messwerte ist die mathematische Beschreibung der physikalischen Zusammenhänge und des Verfahrens. Diese Beschreibung wird durch die Modellgleichung ausgedrückt. Erst mit der Modellgleichung sind eine Berechnung des Wertes und die Abschätzung der einzelnen Beitragsparameter möglich, die zum Erhalt des Ergebnisses und des dazugehörigen Unsicherheitswertes führen.

Das Grundprinzip bei Standard-Totlastkraftanlagen (d.h. bei Kraftmaschinen, bei denen die Kraft in vertikaler Richtung durch Masse realisiert wird) ist, dass die Kraft (F , in N) eine Funktion der Masse (m , in kg), der Gravitation (Erdschwere) (g , in m/s^2) und des Luftauftriebes der Massen A , einem Verhältnis aus der Luftdichte (ρ_L , in kg/m^3) und der Materialdichte der Massescheiben (ρ_m , in kg/m^3) ist.

Damit erhält man die "einfachste" Modellgleichung, die die Realisierung der Kraft beschreibt.

Stand der Technik

Es gilt:

$$F = m \cdot g \cdot \left(1 - \frac{\rho_L}{\rho_m}\right) \quad \text{oder anders geschrieben}$$

$$F = (m - A) \cdot g$$

Damit ist $\frac{\rho_L}{\rho_m}$ das Verhältnis der Luftdichte zur Materialdichte und entspricht somit dem Luftauftrieb A . Dabei ist die Masse (m , in kg), die Gravitation (Erdschwere) (g , in m/s^2) und der Luftauftrieb der Massen A bzw. F_A die dadurch erwirkte Kraft. In weiterer Folge wird der Auftrieb A als W_A , dem Wägewert des Luftauftriebes bezeichnet. Somit ist auch

$$A = W_A = V_G \cdot \rho_L.$$

Der Luftauftrieb ist also das Verhältnis aus der Luftdichte (ρ_L , in kg/m^3) und der Materialdichte der Massescheiben (ρ_m , in kg/m^3) [31], [33], V_G ist das Volumen (verdrängte Volumen) der Gewichtscheiben.

Es ist daher notwendig, schon im Vorfeld der Massenbestimmung (Kalibrierung der Massestücke) die Materialdichte zu kennen, ein Umstand der bei Totlastkraftanlagen, wie sie von metrologischen Instituten verwendet werden, in der Regel gegeben ist. Ebenso ist es notwendig, die Luftdichte während der Messungen zu bestimmen. Sollte eine Massebestimmung der Gewichtstücke ohne bekannter Dichte erfolgt sein, oder bei Totlastmaschinen, die nicht als primäre Anlagen verwendet werden und deren Massen nur bedingt bekannt sind, bedient man sich aus dem Fachbereich der Massenbestimmung der konventionellen Masse (m_K) bzw. konventionellen Luftdichte. Da in diesen Fällen die wahre Masse (durch das unbekannte Volumen / die unbekannte Dichte) nicht bekannt ist, bezieht man sich auf den konventionellen Wägewert bzw. die konventionelle Masse (siehe Masserückführung Kapitel 5.1.1). In Prüf- und Kalibrierzertifikaten einiger Masselaboratorien wird oftmals die konventionelle Masse als Prüfergebnis angegeben. Ohne Angaben der Luftdichte und Materialdichte zum Zeitpunkt der Massebestimmung, ist auf die wahre Masse nicht zu schließen. Ohne hier näher darauf einzugehen, ergibt sich dieser konventionelle Wert aus der üblichen Justage der verwendeten Waagen oder Massekomparatoren; abgelesen wird dadurch der „konventionelle Wägewert“. Siehe dazu [8] und [13].

Es ergibt sich dadurch:

$$F = m \cdot g \cdot \left(\left(1 - \frac{1,2}{8000}\right) + \left(1,2 - \frac{\rho_L}{\rho_m}\right) \right)$$

Geht man in der Praxis davon aus, dass entsprechende Störkräfte F_{St} in annähernd vertikaler Richtung sich der Gewichtskraft F_G addieren und normal gerichtete Querkräfte F_Q hinzukommen, entspricht die Form eher

$$F = \sqrt{(F_G + F_{St})^2 + F_Q^2},$$

wobei, bedingt durch die Mechanik, die Gesamtkraft F nicht zwingend vertikal ausgerichtet sein muss. In der Praxis bedeutet das auch nicht, dass die geometrische Achse des Lastsystems ebenfalls vertikal ist und dadurch nicht zusätzliche Querkräfte eingeleitet werden.

Stand der Technik

Von der Grundgleichung ausgehend ist:

$$F = \sqrt{((m - A) \cdot g + F_{St})^2 + F_Q^2}$$

mit F_Q, F_{St} als Summe zusätzlich auftretender Querkräfte und anderer Störkräfte bei der Realisierung der Kraft (parasitäre Kräfte).

Wie in Abbildung 3 dargestellt, löst die realisierte Kraft F in dem Kraftsensor eine Gegenkraft F' aus, die sich in die eingeleitete Querkraft F_Q , eine weitere kraftsensorinterne Reibkraft F_{RS} und eine sensorinterne Querkraft F_{QS} sowie die Kraft F_{Def} aufteilt. Die Kraft F_{Def} wird als jener Teil der eingeleiteten Kraft F gesehen, die sich in Form der gemessenen Längenveränderung des Kraftsensors, also in Form der Deformation ΔL , auswirkt. In der routinemäßigen Kraftmessung lassen sich die kraftsensorinternen Störkräfte F_{RS} und F_{QS} sowie der Anteil von F_Q im Sensor nicht bestimmen und werden daher auch hier nicht weiter im Detail betrachtet. In der Praxis wird davon ausgegangen, dass bei Kraftsensoren entsprechender Güte das Verhältnis von F' zu den Störkräften und F_{Def} gleich ist und daher F' direkt der Deformation ΔL zugeordnet werden kann.

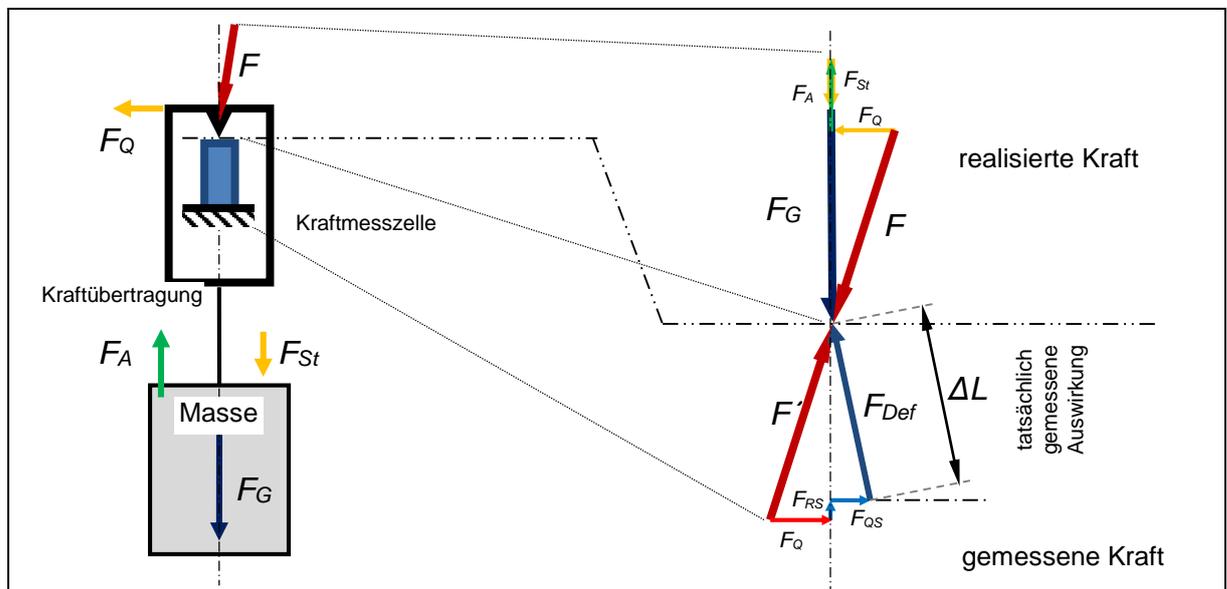


Abbildung 3: Prinzip der Kräfte einer Totlastanlage und Ableitung zur Kraftmessung

Im Idealfall entstehen bei der Kraftrealisierung mittels der Erdschwere keine Querkräfte, da die Krafrichtungen auf die Masse ausschließlich in vertikaler Achse erfolgen (siehe Abbildung 4, Fall 1). In der Praxis der Anwendung ist dieser Idealfall aber nicht zu realisieren. Als Auflage für die Krafteinleitung steht zum einem immer nur eine Fläche zur Verfügung und zum anderen ist diese Fläche nie absolut zentrisch.

Nicht nur aus konstruktiven Mängeln, sondern auch durch in der Positioniergenauigkeit des Kraftsensors begrenzte Möglichkeiten entstehen nicht zentrische Kräfte, die sich in parasitären Querkräften äußern und die resultierende Gesamtkraft aus der Schwerachse ablenken (Fall 2). Aus rein trigonometrischer Überlegung lässt sich diese Störkraft als Komponente der Kraft durch

$$F_Q = (F_G + F_{St}) \frac{\Delta x}{\sqrt{h^2 - \Delta x^2}}$$

Stand der Technik

abschätzen, wobei Δx die Abweichung der Gehängeachse von der Kraftsensorachse darstellt. h ist dabei die Höhe vom Auflagepunkt des Gehänges zum tatsächlichen Masseschwerpunkt. Fall 3 stellt die Problematik der Fertigungsgenauigkeiten dar. Obwohl man konstruktiv auf Hilfsmittel wie Kugelschalen zurückgreift, erfolgt die Kraftübertragung faktisch immer über einen von planparallelen Idealfächen abweichenden Formschluss. Der Fall stellt daher die reale Situation der Praxis dar; der Kraftverlauf verläuft entsprechend wie in Abbildung 3 dargestellt. Die Ursachen dafür liegen in Fertigungstoleranzen, ungenügender Justage sowie von der Achse abweichendem Verzug, z.B. durch unterschiedlich wirkende Temperatureinflüsse. Zur Abschätzung der Querkraft soll hier als einfachste Näherung für eine Kraftübertragungsfläche eine schräg gestellte Kreisfläche angenommen werden. Analog zu Fall 2 ergibt sich als Abschätzung der horizontalen Komponente der Kraft

$$F_Q = (F_G + F_{St}) \frac{\Delta z}{\sqrt{b^2 - \Delta z^2}},$$

wobei b den Abstand des Auflagepunktes zur Mittellinie und Δz die Höhe des Dreieckes darstellt, welches sich bei der Mittelachse durch die Schrägstellung der Auflagefläche ergibt (entspricht dem Kosinus des Öffnungswinkels).

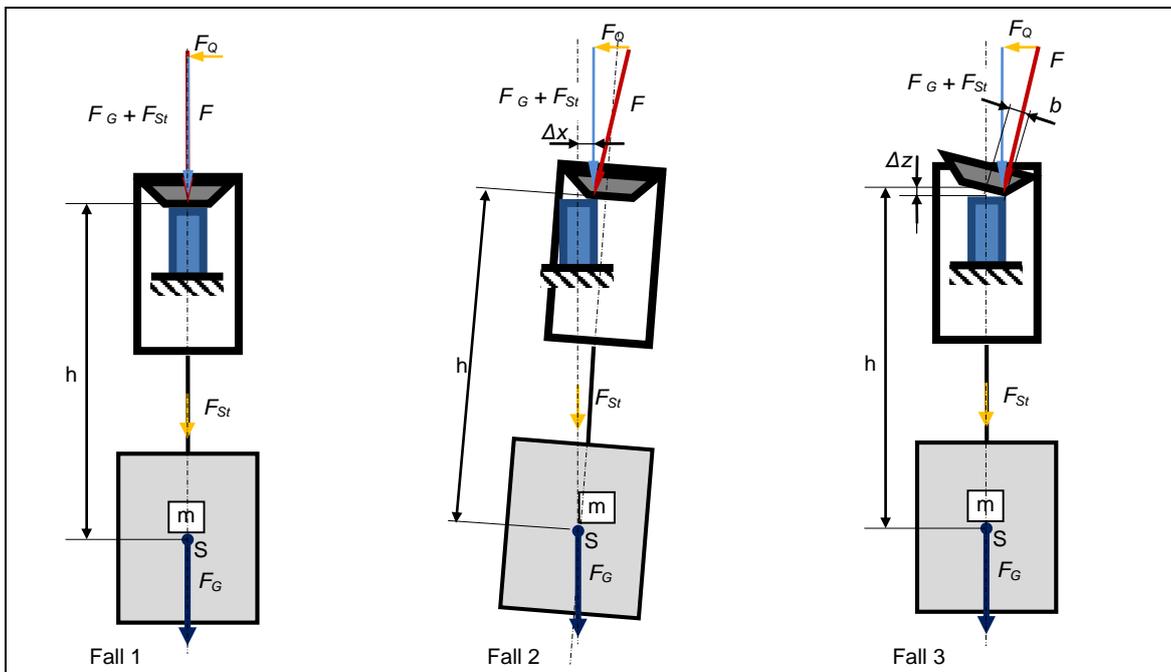


Abbildung 4: Hauptursachen für das Entstehen von Querkraften bei der Kraftrealisation

Für die weitere Betrachtung und zur Abschätzung einer möglichen Größe, die durch die Störkraft F_{St} angenommen werden kann, ist es notwendig, eine grobe Auslegung einer maximal erreichbaren Größe von F_Q vorzunehmen. Dazu erfolgt die Annahme, dass der Bediener in der Lage ist, den Kraftsensor so zu positionieren bzw. die Konstruktion so ausgeführt ist, dass sich die Mittelachse der Auflagefläche des Kraftsensors innerhalb eines Grenzbereiches von ± 1 mm zur Mittelachse des Gehänges und somit zum Punkt der Krafteinleitung befindet ($\Delta x = 1$ mm). Weiters erfolgt die Annahme, dass die Konstruktion mit einer Fertigungstoleranz ausgeführt ist, sodass die Auflagefläche mit einem Abstand von $b = 100$ mm nicht mehr als $\Delta z = 0,03$ mm Steigung bezogen auf diesen Abstand zur Horizontalen aufweist. Zur Veranschaulichung wird in Tabelle 1 zur Abschätzung der wirkenden Kraft nur die Gewichtskraft der Massen im Nominalwert bei

Stand der Technik

einer Fallbeschleunigung von 10 m/s^2 herangezogen. Die Tabelle zeigt für einige fiktive Kraftnominalwerte in Abhängigkeit von deren Masseabstand zum Auflagepunkt (Abstand: h aus Abbildung 4) die erwarteten Querkräfte und deren Gesamtsumme. In dieser Demonstration zeigt sich, dass bei der Realisierung der Kraft mittels Massescheiben bedingt durch die großen Abstände in der Konstruktion trotz auftretender Querkräfte bis 100 N die Abweichung der theoretischen resultierenden Kraft F von der errechneten Normalkraft (hier die Nominalkraft) nur wenige mN beträgt.

angenommene Masse m , angenommener Abstand h	fiktiver Nominalwert der Kraft F_G [N]	theoretische F_Q aus Fall 2 [N]	theoretische F_Q aus Fall 3 [N]	Summe der Querkräfte F_Q [N]	theoretisch resultierende Kraft F [N]	Differenz: $F - F_G$ [N]
2 kg, 1 m	20,0	0,0200	0,0060	0,0209	20,0000	0,0000
2 kg, 3 m	20,0	0,0067	0,0060	0,0090	20,0000	0,0000
20 kg, 3 m	200,0	0,0667	0,0600	0,0897	200,0000	0,0000
200 kg, 1 m	2000,0	2,0000	0,6000	2,0881	2000,0011	0,0011
200 kg, 4 m	2000,0	0,5000	0,6000	0,7810	2000,0002	0,0002
2000 kg, 4 m	20000,0	5,0000	6,0000	7,8102	20000,0015	0,0015
20000 kg, 2,5 m	200000,0	80,0000	60,0000	100,0000	200000,0250	0,0250
20000 kg, 5 m	200000,0	40,0000	60,0000	72,1110	200000,0130	0,0130

Tabelle 1: Exemplarische Abschätzung der Querkraft in Abhängigkeit zur Masse und deren Abstand h zum Auflagepunkt

Die erhaltenen Schätzwerte für die zu erwartenden Querkräfte werden im Folgenden bei der Messunsicherheitsbetrachtung der gesamten Kräfteverhältnisse herangezogen.

Um der Kraftmessung mit TransfERNormalen vorzugreifen, sei hier erwähnt, dass, wie gezeigt wurde, durch Querkräfte die realisierte Kraft in geringerem Ausmaß beeinflusst wird, aber die Auswirkungen auf die Messwerte der Kraftnormale selbst durch diese Querkräfte und deren Ursachen gravierend sind (vgl. Fall 3, siehe auch 3.6.2).

Die systematischen Unsicherheiten jeder Kraftmessung werden hier entsprechend der Grundgleichung in den vier Hauptvariablen Masse, Erdschwere, Luftdichte und Materialdichte zusammengefasst. Die Unsicherheit der berechneten Kraft ist in der Form

$$\left(\frac{\sigma_F}{F}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_g}{g}\right)^2 + \left(\frac{\rho_L}{\rho_m}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sigma_{\rho_m}}{\rho_m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\rho_L}}{\rho_L}\right)^2$$

zu bestimmen (σ_x ist dabei die Standardabweichung der Variable x).

In den Unsicherheitsanteilen ist vor allem die zeitliche Änderung der Variablen zu berücksichtigen. Davon betroffen sind in erster Linie die Erdbeschleunigung und die Luftdichteänderung über die Zeit. Aber auch die Masse unterliegt durch Oberflächenveränderungen einer Drift. Diese Aussage ist für jede Kraft gültig.

Mit dieser Betrachtungsweise mittels der Messunsicherheitsanalyse sollen die grundlegenden Anforderungen an eine Kraftanlage zur Realisation der Kraft abgeleitet werden. Ein Punkt, der in dieser Betrachtung der Messunsicherheit überhaupt noch nicht berücksichtigt wird, ist die Auswirkung der Maschinenmechanik und deren Einfluss.

Folgt man wieder dem Guide of the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) [9] wird von der Modellgleichung der Kraftrealisierung ausgegangen:

$$F = \sqrt{((m - W_A) \cdot g + F_{St})^2 + F_Q^2} \quad \text{mit} \quad W_A = V_G \cdot \rho_1$$

Stand der Technik

Dabei ist die Kraft F das Ergebnis, F_{St} und F_Q eine zusätzliche Störkraft und eine zusätzliche Querkraft durch Aufbringung der Massen, m die Masse der Gewichtscheiben, W_A deren berechneter Wägewart des Luftauftriebes und V_G deren Volumen bei 20 °C. Alle Kräfte werden in N, Masse und Wägewerte in kg und das Volumen in m^3 eingesetzt. g ist die Fallbeschleunigung auf der Höhe des Schwerpunktes der Gewichtscheiben in m/s^2 und ρ_L die Luftdichte in kg/m^3 .

Um Grenzbereiche bei der Darstellung der Kraft aufzuzeigen, werden im Folgenden exemplarisch für einige Laststufen realistische Werte für die eingesetzte Masse m und das Volumen V_G der Gewichtscheiben angenommen. Es sind Nominalwerte bei einer veranschlagten Materialdichte des Stahles für die Gewichtscheiben: $\rho_m = 7950 \text{ kg/m}^3$. Als Luftdichte wird eine realistische, mittlere Luftdichte von $\rho_L = 1,16 \text{ kg/m}^3$ gewählt. Der verwendete Wert für die Erdschwere entspricht dem Grundwert für g im BEV (Wien 16). Die absolute Größe der Werte sei hier zweitrangig, da nicht der Wert des Ergebnisses betrachtet werden soll, sondern nur alle angegebenen, dazugehörigen Messunsicherheitswerte oder Grenzwerte. Sie beruhen auf Erfahrungswerten bei analogen Messungen der Masse- oder Dichtebestimmung und stellen routinemäßig erzielte Standardunsicherheiten dar.

Zur Erläuterung des Ablaufes werden demonstrativ fünf Laststufen des Messbereiches bis 250 kN näher betrachtet. Dabei wurden die Lastbereiche 20 N, 200 N, 2 kN, 20 kN und 200 kN als repräsentative Beispiele ausgewählt. Als Ausgangswerte ergeben sich ausgehend von den Nominalwerten der Gewichtscheiben:

Größe	F	m	W_A	V_G	ρ_L	g	F_{St}	F_Q
	angenommene Laststufe	Normalverteilung; oder erweiterte Messunsicherheit	Zwischenergebnis Luftauftrieb	Normalverteilung; erweiterte Messunsicherheit	Rechteckverteilung; Grenzen	Rechteckverteilung; Grenzen	Rechteckverteilung; Grenzen	Rechteckverteilung; Grenzen
Einheit		kg		m^3	kg/m^3	m/s^2	N	N
Wert	200 kN	20000	-	2,5157	1,16	9,80841262	0 N	0 N
erweiterte Messunsicherheit; Grenzen		0,0106		0,005	$\pm 0,00145$	$\pm 0,00001$	$\pm 3,45$	± 72
Erweiterungsfaktor		1		1				
Wert	20 kN	2000	-	0,25157	1,16	9,80841262	0	0
erweiterte Messunsicherheit; Grenzen		0,00169		0,0005	$\pm 0,00145$	$\pm 0,00001$	$\pm 0,34$	$\pm 7,8$
Erweiterungsfaktor		1		1				
Wert	2 kN	200	-	0,025157	1,16	9,80841262	0	0
erweiterte Messunsicherheit; Grenzen		0,0004		0,0001	$\pm 0,00145$	$\pm 0,00001$	$\pm 0,033$	± 2
Erweiterungsfaktor		1		1				
Wert	200 N	20	-	0,0025157	1,16	9,80841262	0	0
erweiterte Messunsicherheit; Grenzen		0,00004		0,00005	$\pm 0,00145$	$\pm 0,00001$	$\pm 0,0032$	± 1
Erweiterungsfaktor		1		1				
Wert	20 N	2	-	0,00025157	1,16	9,80841262	0	0
erweiterte Messunsicherheit; Grenzen		0,000005		0,00001	$\pm 0,00145$	$\pm 0,00001$	$\pm 0,00026$	$\pm 0,2$
Erweiterungsfaktor		1		1				

Tabelle 2: Zusammengefasste angenommene Ausgangswerte über den Lastbereich 20 N bis 200 kN

Stand der Technik

Wie eingangs erwähnt, ist die messtechnische Ausgangsbasis einer primären Kraftnormalanlage als Totlastkraftanlage für höchste Anforderungen eine Darstellung der Kraft mit einer erweiterten relativen Unsicherheit von höchstens $U = 2 \cdot 10^{-5}$. Betrachtet man auf Basis der Modellgleichung verschiedene Laststufen in einem Bereich bis 200 kN unter der Annahme bzw. Vorgabe bekannter, nicht zu verändernder Unsicherheitsbeiträge und einer maximalen relativen Unsicherheit von $W = 2 \cdot 10^{-5}$, erhält man für die weitere Betrachtung Ausgangswerte möglicher Unsicherheitsbeiträge bei der Darstellung der Kraft.

In Tabelle 2 geht man von den fiktiven Werten (m , W_A , V_G , ρ_L und g) mit den aufgrund der Erfahrung realistischen dazugehörigen Messunsicherheiten für m und V_G sowie den in der Messtechnik realistischen Grenzbereichen für ρ_L und g aus. Bei einem angenommenen Ausgangswert für die Störgrößen F_{St} und F_Q von 0 N, sind in der Tabelle 2 die möglichen Grenzen einer Rechteckverteilung in den einzelnen Laststufen empirisch so gewählt, dass sich nach Kalkulation mit dem GUM-Work-Bench eine maximale relative Gesamtunsicherheit auf die Kraft von genau dem Wert ergibt, der dem zu erreichenden Grenzbereich von $W = 2 \cdot 10^{-5}$ bei $k=2$ entspricht.

Man erhält, ausgehend von den Standardunsicherheiten der Eingangsgrößen, durch partielle Ableitung nach der einzelnen Größe die Sensitivitätskoeffizienten und die absolut in Newton angegebenen Unsicherheitsbeiträge für jede Eingangsgröße. In der Tabelle ist für jede Laststufe das errechnete Ergebnis der realisierten Kraft nach der Modellgleichung sowie die abgeleitete dazugehörend erweiterte Messunsicherheit U bzw. die relative erweiterte Messunsicherheit W zusammengefasst. Als Ausgangswerte werden die angenommenen Grenzwerte der Rechteckverteilung aus Tabelle 2 herangezogen.

Die ausgewiesenen Unsicherheitsbeiträge für die Störkräfte F_{St} und F_Q in Tabelle 3 geben Auskunft über die maximale Größe dieser Störkraft. Die angenommene Größe dieser angegebenen Werte ergibt somit einen betragsmäßigen Wert der Störgröße, der bei der tatsächlichen Realisation der Kraftstufe nicht überschritten werden darf. Anderenfalls wäre in der jeweiligen Laststufe die Einhaltung der Grundforderung von einer zu erreichenden relativen Gesamtunsicherheit von $W = 2 \cdot 10^{-5}$ bei $k=2$ nicht möglich.

Stellt man nun die Unsicherheitsanteile der Einflussgrößen ausgedrückt in Newton (vergleiche Ergebnisse Tabelle 3 und *Abbildung 5* in blau aufgetragen) gegenüber der ebenfalls in Newton dargestellten maximalen relativen Gesamtunsicherheit von $W = 2 \cdot 10^{-5}$ (in rot aufgetragen) dar, so erkennt man, dass die Störgröße F_{St} (in der Modellgleichung die einzige Größe mit vorher nicht bekanntem Unsicherheitsanteil) relativ betrachtet einen abschätzbaren Unsicherheitsbeitrag von etwa $1 \cdot 10^{-5}$ ausmacht. Das ist somit die Hälfte des erlaubten Messunsicherheitsbudgets. Es ist festzustellen, dass bei den größeren Laststufen dieses Verhältnis exakt zutrifft, dass aber bei den kleinen Laststufen durch die relativ betrachtet größer werdenden Unsicherheitsanteile der Masse und des Volumens auch der relative Anteil des Beitrages von F_{St} kleiner wird.

Faktisch bedeutet dies, dass bei der Realisierung einer Kraft von 200 kN die erlaubte Unsicherheit der Störgröße F_{St} und somit der maximale Betrag der Störkraft $F_{St} = 2$ N nicht überschritten werden darf. Betrachtet man diese Unsicherheiten über den Messbereich, so zeigt sich, dass bei der Realisierung einer Kraft von 20 N analog dazu der maximale Betrag der Störkraft $F_{St} = 0,15$ mN nicht überstiegen werden darf.

Das Ergebnis dieser Messunsicherheitsberechnungen ergibt somit:

Größe	F	m	W _A	V _G	ρ _L	g	F _{St}	F _Q
	angenommene Laststufe / fiktives Ergebnis	Normalverteilung; oder erweiterte Messunsicherheit	Zwischenergebnis Luftauftrieb	Normalverteilung; erweiterte Messunsicherheit	Rechteckverteilung; Grenzen	Rechteckverteilung; Grenzen	Rechteckverteilung; Grenzen	Rechteckverteilung; Grenzen
Wert	200 kN	20000,0 kg	2,918 kg	2,5157 m ³	1,16 kg/m ³	9,80841262 m/s ²	0 N	0 N
Standardmessunsicherheit		0,0106 kg	0,00617 kg	0,005 m ³	0,000837 kg/m ³	5,77·10 ⁻⁶ m/s ²	1,99 N	5,77 N
Freiheitsgrad		50		50	∞	∞	∞	∞
Sensitivitätskoeffizient		9,8		-11	-25	20000	1,0	0,0
Unsicherheitsbeitrag		0,10 N		-0,057 N	-0,021 N	0,12 N	2,0 N	0,0
berechnetes Ergebnis	196,1396 kN	Unsicherheit (u) = 2,00 N		sich ergebende, erweiterte Messunsicherheit U = ± 4 N Relative erweiterte Messunsicherheit W = ±2,0·10 ⁻⁵				
Wert	20 kN	2000,0 kg	0,2918 kg	0,25157 m ³	1,16 kg/m ³	9,80841262 m/s ²	0 N	0 N
Standardmessunsicherheit		0,00169 kg	0,000617 kg	0,0005 m ³	0,000837 kg/m ³	5,77·10 ⁻⁶ m/s ²	0,169 N	2,89 N
Freiheitsgrad		50		50	∞	∞	∞	∞
Sensitivitätskoeffizient		9,8		-11	-2,5	2000	1,0	0,0
Unsicherheitsbeitrag		0,017 N		-0,0057 N	-0,0021 N	0,012 N	0,20 N	0,0 N
berechnetes Ergebnis	19,6140 kN	Unsicherheit (u) = 0,197 N		sich ergebende, erweiterte Messunsicherheit U = ± 0,4 N Relative erweiterte Messunsicherheit W = ±2,0·10 ⁻⁵				
Wert	2 kN	20,0 kg	0,02918 kg	0,025157 m ³	1,16 kg/m ³	9,80841262 m/s ²	0 N	0 N
Standardmessunsicherheit		0,0004 kg	0,000118 kg	0,0001 m ³	±0,00837 kg/m ³	5,77·10 ⁻⁶ m/s ²	0,0191 N	2,89 N
Freiheitsgrad		50		50	∞	∞	∞	∞
Sensitivitätskoeffizient		9,8		-11	-2,5	200	1	0
Unsicherheitsbeitrag		0,0039 N		-0,0011 N	-0,00021 N	0,0012 N	0,019 N	0 N
berechnetes Ergebnis	196,1396 kN	Unsicherheit (u) = 0,0195 N		sich ergebende, erweiterte Messunsicherheit U = ± 0,04 N Relative erweiterte Messunsicherheit W = ±2,0·10 ⁻⁵				
Wert	200 N	20,0 kg	0,02918 kg	0,002516 m ³	1,16 kg/m ³	9,80841262 m/s ²	0 N	0 N
Standardmessunsicherheit		0,00004 kg	0,000058 kg	0,00005 m ³	0,000837 kg/m ³	5,77·10 ⁻⁶ m/s ²	0,00185 N	2,89 N
Freiheitsgrad		50		50	∞	∞	∞	∞
Sensitivitätskoeffizient		9,8		-11	-2,5	20	1,0	0,0
Unsicherheitsbeitrag		0,00039 N		-0,00057 N	-0,000021 N	0,00012 N	0,0018 N	0,0 N
berechnetes Ergebnis	19,6136 N	Unsicherheit (u) = 0,00198 N		sich ergebende, erweiterte Messunsicherheit U = ± 0,004 N Relative erweiterte Messunsicherheit W = ±2,0·10 ⁻⁵				
Wert	20 N	2,0 kg	0,02918 kg	0,0002516 m ³	1,16 kg/m ³	9,80841262 m/s ²	0 N	0 N
Standardmessunsicherheit		0,000005 kg	0,000012 kg	0,00001 m ³	0,000837 kg/m ³	5,77·10 ⁻⁶ m/s ²	0,00015 N	2,89 N
Freiheitsgrad		50		50	∞	∞	∞	∞
Sensitivitätskoeffizient		9,8		-11	-2,5	2000	1,0	0,0
Unsicherheitsbeitrag		0,000049 N		-0,00011 N	-0,0000021 N	0,000012 N	0,00015 N	0,0 N
berechnetes Ergebnis	1,9614 N	Unsicherheit (u) 0,000195 N		sich ergebende, erweiterte Messunsicherheit U = ± 0,0004 N Relative erweiterte Messunsicherheit W = ±2,0·10 ⁻⁵				

Tabelle 3: Zusammengefasste Ergebnisse mit den sich ergebenden, maximal zulässigen Messunsicherheiten über den Lastbereich aus Tabelle 2

Geht man als Schlussfolgerung aus dieser grundlegenden Betrachtung des Unsicherheitsbudgets in Richtung der Konzeptionierung einer Totlast-Kraftnormalanlage von der ermittelten maximal erlaubten Störkraft $F_{St} = 0,15 \text{ mN}$ bei der Realisation von 20 N aus, bedeutet das, wieder über den Messbereich betrachtet, dass bei der Verwendung nur einer Anlage die Konstruktion so auszuführen ist, dass über den gesamten angestrebten Messbereich bis 250 kN der Einfluss auf den Wägewert der Massen etwa 15 mg nicht überschreiten darf. Setzt man diesen Wert als Unsicherheitsbeitrag in die Modellgleichung als Ausgangswert für F_{St} ein, so erhält man dagegen die in Abbildung 5 gezeigte Unsicherheit auf die Realisierung einer Kraft von 200 kN von nur 0,33 N. Dieser absolute Wert entspricht einer erweiterten relativen Unsicherheit (U) von nur $\pm 0,17 \cdot 10^{-5}$.

Stand der Technik

Diese Gesamtunsicherheit ergibt sich defacto aus der Addition der Varianzen der Masse, des Volumens und der Erdschwere, wobei die Störkraft hier zu vernachlässigen ist.

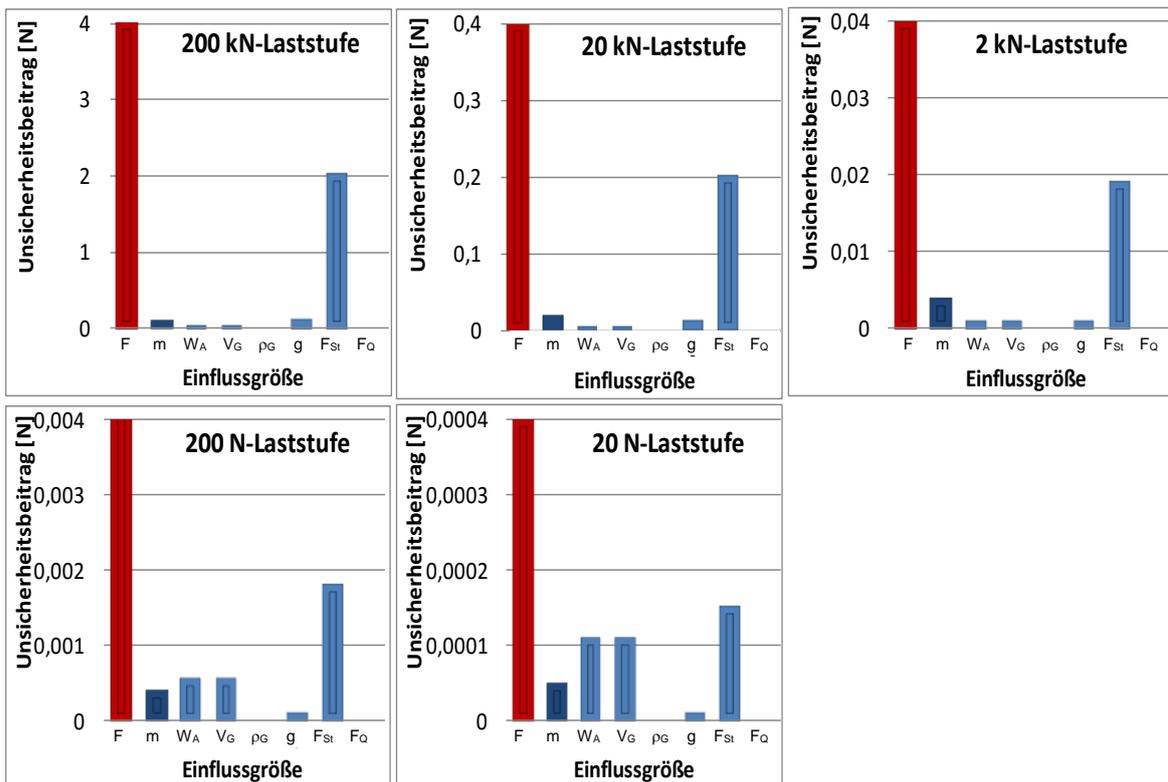


Abbildung 5: Gegenüberstellung der erhaltenen Einzelunsicherheitsanteile mit der erlaubten maximalen Gesamtunsicherheit auf der Kraft F

Geht man von einer Kraftanlage mit nur einem einzigen, umfassenden Messbereich aus, so bedeutet dies als Anforderung an die mögliche Konstruktion der Kraftnormalanlage: Analysiert man eine zu realisierende Kraft von 20 N, so hat das resultierende Eigengewicht einer kraftableitenden Tragekonstruktion für die Gesamtmasse der Gewichtscheiben kleiner 2 kg zu sein und darf dabei nur eine maximale Störkraft von 0,15 mN aufweisen. Das bedeutet, dass der Streubereich der Wägewerte des Eigengewichtes dieser Tragekonstruktion dabei kleiner als 15 mg zu sein hat. Legt man diese Vorgabe an die Konstruktion aus dem unteren Grenzwert auf den oberen Grenzbereich des Messbereiches um und würde man als größte Laststufe 250 kN anstreben, bedeutet das, dass eine 2 kg schwere Tragekonstruktion eine Masse von 25000 kg aufnehmen muss. Zusammenfassend wird in Verbindung mit den Ausführungsformen eingangs in diesem Kapitel festgestellt, dass eine wesentliche Erweiterung des Messbereiches bestehender Kraftanlagen nur dann möglich ist, wenn es gelingt, die Summe der Störkräfte herkömmlicher Kraftanlagen drastisch zu reduzieren.

3.6 Bewertung einer Kraftmessung

Zur Aufnahme realisierter Kräfte sind Kraftsensoren unausweichlich. Werden Kraftsensoren zur Messung und deren Ergebnisse zur Bewertung von Kraftmaschinen herangezogen, ist eine strikte Einhaltung eines genau definierten Messablaufes notwendig. Durch bauart- und produktionsabhängige Charakteristika (Kenngrößen, Eigenerwärmung, Temperaturkompensation, Hysterese, ...) jedes Sensors ist die strikte Einhaltung der Kraftwechsel und deren größenmäßige und zeitmäßige Abfolge

Stand der Technik

unerlässlich. Aus der Praxis der täglichen Verwendung von Kraftsensoren zeigt sich, dass bei nicht penibler Befolgung dieser Abläufe die Ergebnisse in einem größeren Rahmen streuen, als zu einer Beurteilung der Kraftanlage zulässig ist.

Normativ sind zwei Messabläufe geregelt:

- Ablauf der Kalibrierung konform EN ISO 376:2011 [3]: wird in der Regel zur Kalibrierung und anschließender Bewertung von Kraftsensoren verwendet.
- Messablauf nach DAkkS – DKD 3-9 [7]: Wird vorzugsweise bei Vergleichsmessungen verwendet, da das Ergebnis besser auf das Verhalten der Kraftmaschine eingeht.

3.6.1 Messablauf einer Kraftmessung nach ISO

Aufgrund der Notwendigkeit, jede Bewertung einer Kraftmessung mit zuvor kalibrierten Krafttransfernormalen zu beginnen, wird im Folgenden der ISO-konforme Messablauf betrachtet.

Der Messablauf sieht drei Vorbelastungen mit Maximallast von jeweils 60 Sekunden vor, dann erfolgen Messreihen mit ausschließlich aufsteigenden Kraftwerten, ohne dass die Einbaustellung des Kraftaufnehmers verändert wird. Danach werden zwei weitere Messreihen mit jeweils zunehmender und abnehmender Kraft in jeweils unterschiedlicher Einbaustellung (120° Verdrehung) durchgeführt. Den Messreihen werden im Folgenden entsprechend der Reihenfolge die Bezeichnungen X_1 bis X_6 zugeordnet. Vor Beginn jeder zusätzlichen Kraftmessreihe wird eine weitere Vorbelastung ausgeführt. Zwischen zwei aufeinanderfolgenden Belastungsvorgängen wird die Kraft gleichmäßig erhöht oder verringert. Am Ende der Messserie wird eine Kriechmessung (bei 30 s und 300 s) bei Volllast und bei Nulllast durchgeführt, die der Beurteilung der Drift des Sensors dient. Zu jeder realisierten Belastungsstufe wird der Verformungsmesswert in Form der DMS-Widerstandsmessung in mV/V aufgezeichnet.

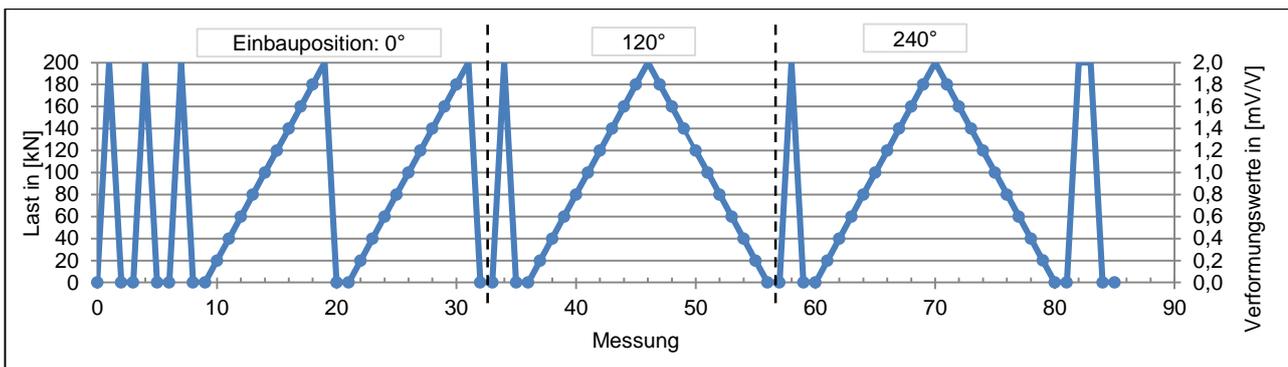


Abbildung 6: Kraftstufen eines Messablaufs nach ISO am Beispiel 200 kN mit Verformungswerten bis 2 mV/V

Der Messablauf einer Messserie in der Abbildung 6 zeigt den normkonformen Modus nach ISO:

- Messung 1 bis 8: Vorbelastungen;
- erste Auf-Reihe: X_1 : Messung 9 bis 19;
- zweite Auf-Reihe: X_2 : Messung 21 bis 31;
- 120° Drehung des Kraftsensors
- Messung 33 bis 35: Vorbelastungen;

Stand der Technik

- dritte Auf-Reihe: X_3 : Messung 36 bis 46;
- erste Ab-Reihe: X_4 : Messung 47 bis 56;
- 120° Drehung des Kraftsensors
 - Messung 57 bis 59: Vorbelastungen;
 - vierte Auf-Reihe: X_5 : Messung 60 bis 70;
 - zweite Ab-Reihe: X_6 : Messung 71 bis 80;
 - Messung 82 bis 83: Kriechmessung Volllast 30 s und 300 s;
 - Messung 84 bis 85: Kriechmessung Nulllast 30 s und 300 s.

Bei der Bestimmung des Verformungsmesswertes eines Kraftwertes im Zuge einer Kalibrierung eines Kraftsensors/Transfornormals bedient man sich also einer Interpolationsgleichung. Die erhaltenen Verformungswerte werden für jede Laststufe festgehalten und danach werden für jede Messserie die Koeffizienten der Ausgleichsfunktion für sämtliche Datenpunkte unter Verwendung der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt. Die Interpolationsgleichung, die sich daraus ergibt, kann erster, zweiter, dritter oder vierter Ordnung sein. Die Abweichungen zu dieser Ausgleichsfunktion (Restwerte) werden graphisch über der Laststufe aufgetragen. In der Regel entscheidet über die Form der Interpolationsgleichung der Anwender aufgrund der Beurteilung der Restwerte.

Die Interpolationsgleichungen unterschiedlicher Ordnung am Beispiel eines 200 kN-Krafttransfornormals zur Demonstration:

Linear: $X_a = 1,00009 \cdot 10^{-2} \cdot F$

2ter Ordnung: $X_a = 7,85456 \cdot 10^{-9} \cdot F^2 + 9,99964 \cdot 10^{-3} \cdot F$

3ter Ordnung: $X_a = 1,52697 \cdot 10^{-10} \cdot F^3 - 3,46431 \cdot 10^{-8} \cdot F^2 + 1,00023 \cdot 10^{-2} \cdot F$

4ter Ordnung: $X_a = -1,6429 \cdot 10^{-12} \cdot F^4 + 8,39676 \cdot 10^{-10} \cdot F^3 - 1,16113 \cdot 10^{-7} \cdot F^2 + 1,00051 \cdot 10^{-2} \cdot F$

Werden die Abweichungen der Messwerte jeder Laststufe relativ zu diesen Interpolationsgleichungen n-ter Ordnung aufgetragen, erhält man das dargestellte Bild:

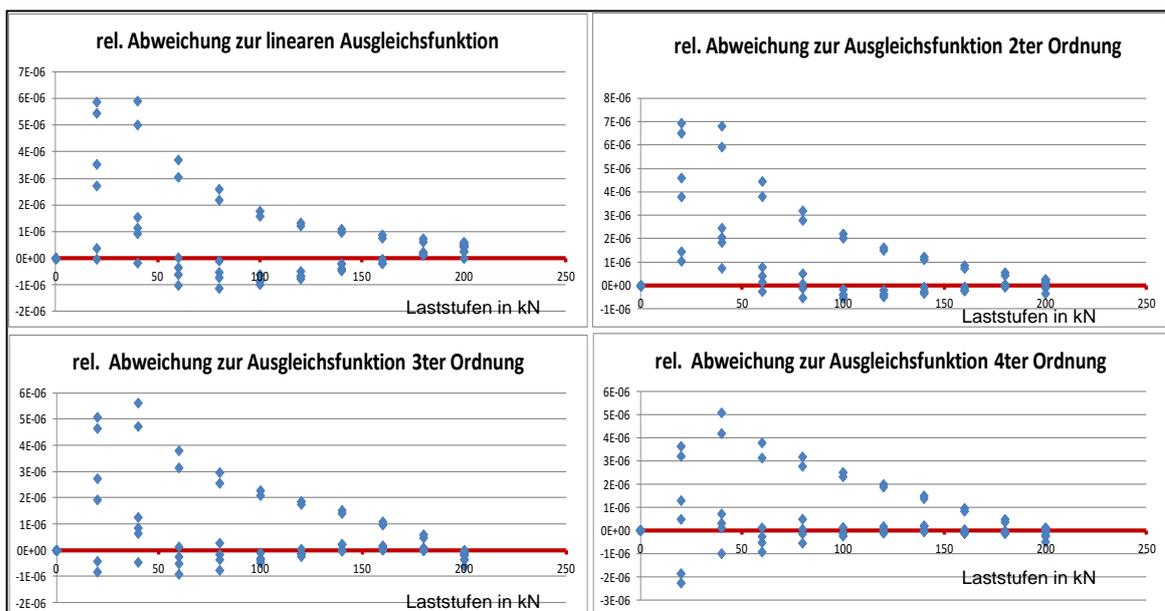


Abbildung 7: Typische Bilder der Restwerte in den Ausgleichsfunktionen n-ter Ordnung im Vergleich

Dabei sind die horizontalen roten Linien die normierten Ausgleichsfunktionen unterschiedlicher Ordnung. Die Restwerte sind über den einzelnen Laststufen

Stand der Technik

aufgetragen. Abbildung 7 zeigt, dass in der Regel die Wertigkeiten der Ausgleichsfunktionen sehr ähnlich sind. Typisch ist das trichterförmige Bild der Restwerte. Dieses Bild ergibt sich vor allem aus dem markanten Einfluss der Umkehrspanne (Messwerte der oberen Kurvenbereiche) der Transfornormale (siehe auch Abbildung 7 und Abbildung 8).

Meist wird in Kalibrierscheinen eine Gleichung zweiter oder dritter Ordnung angegeben, wobei in der Regel eine Gleichung dritter Ordnung durch die etwas kleineren Restwerte bevorzugt wird.

Die bei der Messreihe aufgezeichneten Verformungswerte sind Basis der nachfolgenden Berechnungen von Kennwerten des Kraftmessgerätes und deren Beurteilung. Die Größe der Kennwerte charakterisiert den verwendeten Kraftsensor.

3.6.2 Beurteilung des Kraftmessgerätes und dessen Messergebnis

Konform Punkt 7.5 EN ISO 376:2011 [3] werden im Wesentlichen hier eine Reihe von Kenngrößen bestimmt, die Aussagen über die Qualität eines Krafttransfornormals zulassen und zur Klassifizierung des Sensors herangezogen werden.

- *Relative erweiterte Vergleichspräzision b und Wiederholpräzision b'*

Diese Abweichungen werden für jede bei der Kalibrierung aufgebrachte Kraftstufe in verschiedenen Einbaustellungen b (um 120° verdreht) oder in gleicher Einbaustellung b' nach folgenden Gleichungen berechnet:

$$b = \left| \frac{X_{max} - X_{min}}{\bar{X}_r} \right| \cdot 100 \quad \text{mit} \quad \bar{X}_r = \frac{X_1 + X_3 + X_5}{3}$$

und b' die relative Wiederholpräzision:

$$b' = \left| \frac{X_2 - X_1}{\bar{X}_{wr}} \right| \cdot 100 \quad \text{mit} \quad \bar{X}_{wr} = \frac{X_1 + X_2}{2}$$

- *Relative Interpolationsabweichung f_c*

Diese Abweichung ist mit Hilfe einer Interpolationsgleichung 1., 2. oder 3. Grades zu ermitteln, wobei der Verformungsmesswert \bar{X}_r in Abhängigkeit von der Kalibrierkraft angegeben wird. Die relative Interpolationsabweichung ist nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$f_c = \left| \frac{\bar{X}_r - X_a}{X_a} \right| \cdot 100,$$

wobei X_a der berechnete Verformungsmesswert ist.

- *Relative Nullpunktabweichung f_0*

Der Nullpunkt ist vor und nach jeder Messreihe aufzuzeichnen. Die Nullpunktablesung muss etwa 30 s nach der vollständigen Entlastung vorgenommen werden.

Die relative Nullpunktabweichung ist nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$f_0 = \frac{i_f - i_0}{X_N} \cdot 100$$

Die maximal ermittelte relative Nullpunktabweichung ist zu berücksichtigen.

Stand der Technik

- *Relative Umkehrspanne v*

Die relative Umkehrspanne ist bei jeder Kalibrierung zu bestimmen, indem eine Überprüfung bei zunehmenden und dann bei abnehmenden Kräften durchgeführt wird. Die Differenz zwischen den in den beiden Messreihen mit zunehmender und abnehmender Kraft erhaltenen Werten ermöglicht die Berechnung der relativen Umkehrspanne:

$$v_1 = \left| \frac{X'_4 - X_3}{X_3} \right| \cdot 100 \quad \text{und} \quad v_2 = \left| \frac{X'_6 - X_5}{X_5} \right| \cdot 100$$

v wird berechnet als Mittelwert von v_1 und v_2 :

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

- *Relative Kriechabweichung c*

Die Differenz zwischen den Ausgabewerten i_{30} und i_{300} , die 30 s bzw. 300 s nach Aufbringung oder Wegnahme der Höchstkraft für die Kalibrierung erhalten werden, ist zu berechnen und als prozentualer Anteil der maximalen Verformung anzugeben.

$$c = \left| \frac{i_{300} - i_{30}}{X_N} \right| \cdot 100$$

- *Beurteilung der Einzelergebnisse*

Aus der vorangegangenen Betrachtung der aufgezeichneten Messwerte erhält man typische Bilder der relativen Anteile der Bewertungsparameter und kann somit ihre Größe direkt vergleichen. Durch die relativen Größen der Umkehrspanne, der Wiederholpräzision und der Vergleichspräzision ergeben die Restwerte zu der Ausgleichsfunktion eine typische trichterförmige Streuung (siehe Abbildung 7 und Abbildung 8), die bei den kleineren Laststufen verhältnismäßig größer wird. Betrachtet man nun das Bild, so erhält man eine Aussage über die „Qualität“ des Sensors. Über die Streuung dieser Parameter lassen sich die Messergebnisse von Kraftsensoren und somit Kraftsensoren zueinander vergleichen.

Analysiert man die Lage der Werte in dem trichterförmigen Bild, so lassen sich die einzelnen Kenngrößen deutlich unterscheiden. In Abbildung 8 ist die Größe des Einflusses der Umkehrspanne (rote Linie), der Einfluss der Vergleichspräzision (grüne Linie) und der im Verhältnis geringe Einfluss der Wiederholpräzision und Interpolationsabweichung (schwarze und graue Linie) der Transfernormale visualisiert.

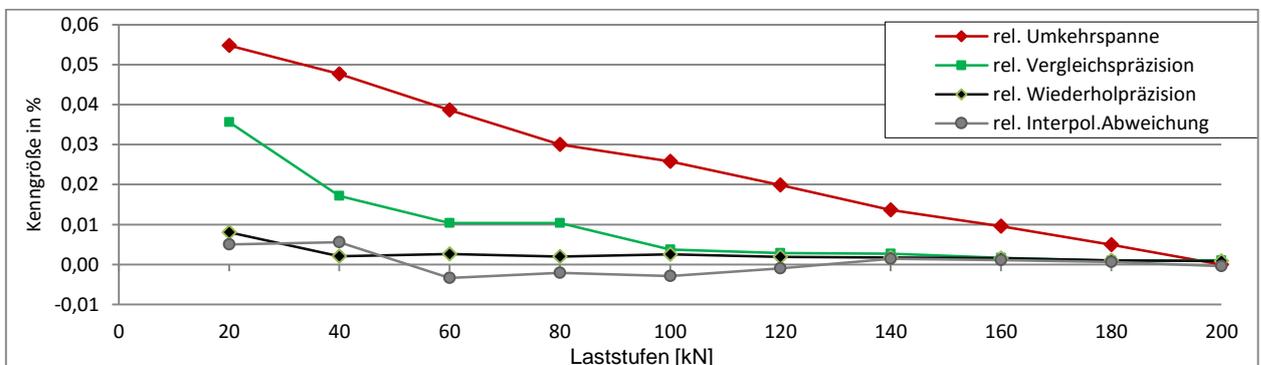


Abbildung 8: Typische Anordnung der Kenngrößen für das Beispiel aus Abbildung 7

Die Gegenüberstellung der Kenngrößen wie in Abbildung 8 dient der Beurteilung der Qualität dieser einen Messserie für ein Transfernormal. Die weitere Betrachtung erfolgt

Stand der Technik

durch Gegenüberstellung der Diagramme mehrerer identer Messserien. Durch die Streuungen der einzelnen Parameter lassen sich aufgrund der Erfahrung des Betrachters Rückschlüsse auf die einzelnen Messungen ableiten.

Anhand des gezeigten Beispiels lässt sich erkennen, dass die relative Wiederholpräzision, die Wiederholbarkeit eines Messsignals bei zwei aufeinanderfolgenden Messreihen ohne das Transfornormal in seiner Position oder seiner Einspannung zu verändern, einen sehr kleinen Anteil an der Gesamtstreuung hat. Das bedeutet, im konkreten Fall sind die angezeigten Verformungsmesswerte auf wenige Digits reproduzierbar. Einen im Verhältnis ebenso geringen Wert zeigt die relative Interpolationsabweichung. Der Grund hierfür ist, dass aufgrund der Bauweise moderner Transfornormale diese ein sehr lineares Ausgangssignal über den Messbereich aufweisen. Das bedeutet natürlich auch, dass die Restwertabweichung einer Funktion dritter Ordnung sehr gering ist.

Wie in Abbildung 7 und Abbildung 8 erkennbar, sind die Anteile der Verformungswerte aus der relativen Wiederholpräzision, der Wiederholbarkeit und der Interpolationsabweichung anhand der Streuung nicht wirklich voneinander unterscheidbar (in Grün, Grau und Schwarz gekennzeichnet). Die erweiterte Vergleichspräzision, also die Vergleichspräzision, die in gleicher Lastrichtung (zunehmende Kräfte), aber in verschiedenen Einbaupositionen (120°) bestimmt wird, gibt einen Index über den Zustand und die Genauigkeit der Einspannteile. Wie man in Abbildung 8 an der grünen Markierung erkennen kann, liegen die Kennwerte im oberen Belastungsbereich sehr nahe beisammen. Das heißt, die Streuung der Werte der Vergleichspräzision, der Wiederholpräzision und der Interpolationsabweichung ist sehr gering. Im unteren Lastbereich sieht man dagegen eine deutliche, um das Sechsfache größere Streuung.

3.6.3 Alternativer Messablauf bei der Kraftmessung nach DAkKS

Wie eingangs in 3.6 erwähnt, wird bei Vergleichsmessungen und der Beurteilung von Kraftmessmaschinen selbst von der Vorgehensweise der EN ISO 376:2011 [3] Abstand genommen und nach einem Messablauf des deutschen Kalibrierdienstes nach DAkKS – DKD 3-9 [7] vorgegangen. Dieser Ablauf wird aus dem Grund vorzugsweise bei diesen Messungen verwendet, da das Ergebnis besser auf das Verhalten der Kraftmaschine selbst eingeht bzw. das Ergebnis mehr dem Verhalten der Kraftmessmaschine als dem Verhalten des Krafttransfornormals zugeschrieben werden kann.

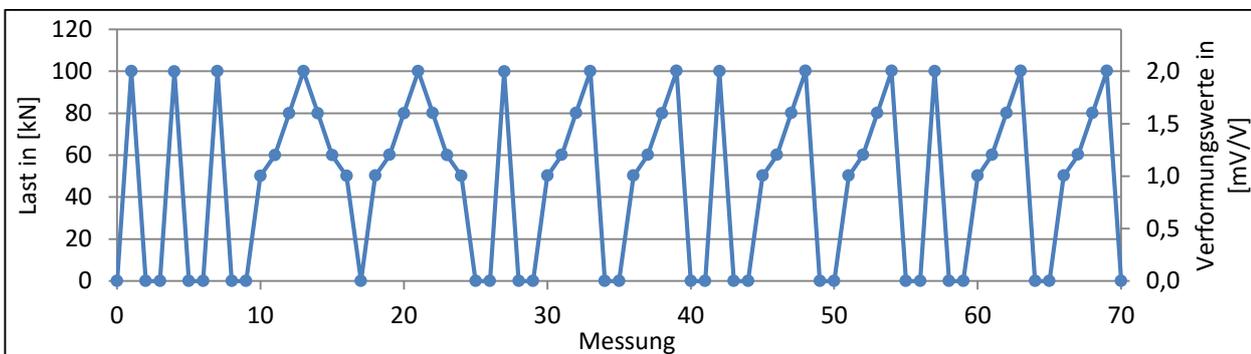


Abbildung 9: Kraftstufen eines Messablaufes nach DKD am Beispiel 100 kN mit Verformungswerten bis 2 mV/V

Die Kalibrierung des Kraftaufnehmers erfolgt in vier jeweils um 90° versetzten Einbaulagen. In der Einbaulage 0° kann die Kalibrierung bei ansteigender und abnehmender Last oder alternativ bei ansteigenden Kraftwerten erfolgen. In den übrigen

Stand der Technik

Einbaulagen wird die Kalibrierung nur mit ansteigenden Kräften durchgeführt. Nach jeder Änderung der Einbaulage des Kraftmessgerätes wird dieses einmal auf Höchstlast vorbelastet, wobei in der ersten Einbaulage zur Ausrichtung das Kraftmessgerät dreimal mit Höchstlast vorbelastet wird.

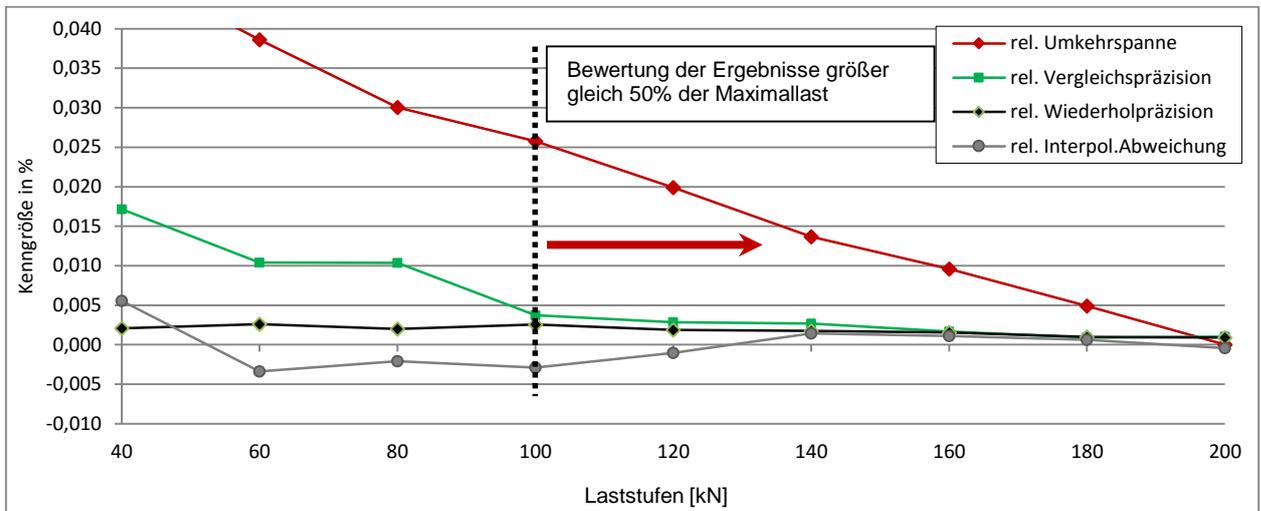


Abbildung 10: Übliche Messbereichsauswahl zur Bewertung einer Kraftmessung anhand eines Ausschnitts des Beispiels aus Abbildung 7

Zur Erzielung der höchst möglichen Genauigkeit der Transferrnormale wurden nur Laststufen verwendet, die größer gleich 50 % der Maximallast der Transferrnormale sind. Dabei wurden im Wesentlichen die Mittelwerte der Anzeigewerte bei zunehmender Last dem Vergleich unterzogen. Somit werden defacto nur der geringe Einfluss der Vergleichspräzision und der Wiederholpräzision bzw. die Interpolationsabweichung (schwarzer Bereich) der Transferrnormale berücksichtigt. Da sich dieser Messbereich von Krafttransferrnormalen durch die hohe Reproduzierbarkeit auszeichnet, können die Streuungen des Ergebnisses besser dem Messverhalten der verwendeten Kraftmaschine zugeordnet werden.

3.6.4 Einflussfaktor Übergangselemente

Die Erfahrung hat gezeigt, dass diese Streukomponente durch den Einfluss der Einspannteile (z.B. Kugelkalotten, Druckplatten, ...) bedingt wird. Der Grund hierfür ist, dass die zum Beispiel durch das Ausrichten der Druckplatten entstehenden Störkräfte zu den Auflagekräften ein ungünstiges Größenverhältnis aufweisen. Im Weiteren hat die Erfahrung gezeigt, dass dieser Anteil durch Variation der Einspannteile verändert bzw. optimiert werden kann. Wie sich in der Praxis bei der Durchführung von solchen Messreihen herausstellt, kann hier üblicherweise keine Systematik erkannt werden. Es lässt sich bei der Einspannung eine Optimierung der Messergebnisse bzw. Minimierung der Störgrößen nur erzielen, indem man auf Erfahrungswerte des Anwenders zurückgreift. Fakt ist, dass offensichtlich durch komplexe Korrelationen zwischen den einzelnen Einflussgrößen der Maschine, der Übergangselemente und der einzelnen Transferrnormale eine systematische Anordnung nicht abgeleitet werden kann. Den größten Anteil der Streuung macht hingegen ein transferrnormalspezifischer Wert, die Umkehrspanne, aus. Dieser in Abbildung 8 in Rot gekennzeichnete Bereich ist ein Maß für die sogenannte Hysterese des Transferrnormals. Dabei geht es um die „Wiederholbarkeit“ der Messwerte beim Wechsel zwischen zunehmenden und

Stand der Technik

abnehmenden Kräften. Diese Umkehrspanne ist eindeutig abhängig von der Bauart des Sensors bzw. von der Bauart des Messwertaufnehmers. Prinzipiell ist die Reproduzierbarkeit der Messwerte mit abnehmender Kraft aus Messreihe 4 und 6 zueinander wesentlich besser, als die Abweichung der beiden Messreihen zu den Messwerten aus den Messreihen mit zunehmender Kraft. Die Praxis in der Kraftmessung zeigt, dass bei Messungen in Druckrichtung der Wert der Umkehrspanne eines Kraftsensors durch Veränderung der Aufstellung nur marginal verändert werden kann. In Zugrichtung hat die Einspannung des Sensors einen größeren Einfluss auf die Umkehrspanne und kann somit, ähnlich wie die Vergleichspräzision, durch geringfügige Variation der Einbauteile optimiert werden. Um Veränderungen feststellen zu können, reicht in der Regel eine geringfügige Positionsänderung (z.B. Rotation um wenige Winkelminuten) einzelner Einbauteile.

3.6.5 Betrachtung der Unsicherheitsfaktoren von Kraftaufnehmern

Eine Abschätzung der Messunsicherheit der Kalibrierung und des späteren Einsatzes des Kraftmessgerätes ist abhängig vom Umfang und Ablauf der Messserien. Da für eine qualifizierte Messunsicherheitsbetrachtung Kalibrierung und deren Kalibrierergebnisse einen Mindeststandard erfüllen müssen, wird im Folgenden ein Kalibrierablauf konform EN ISO 376:2011 [3] herangezogen.

Bei der Kalibrierung eines Transfornormals oder Kraftsensors unterscheidet man bei der Betrachtung eine Klassifizierung der Messgeräte für die Interpolation oder nur für bestimmte Kräfte. Bei der Bestimmung des Verformungsmesswertes eines Kraftwertes im Zuge einer Kalibrierung eines Kraftsensors bedient man sich bei der ersten Möglichkeit einer Interpolationsgleichung. Die Unsicherheit dieser Interpolationsgleichung ergibt die Kalibrierunsicherheit. Möchte man ein Messgerät für bestimmte Kräfte klassifizieren, ist die Kalibrierunsicherheit jene Unsicherheit der Kraft, die einem mittleren Verformungsmesswert genau bei der Laststufe entspricht. Beide Betrachtungsweisen gelten mit der Einschränkung, dass Messwerte nur im Laufe zunehmender Kräfte für die Auswertung herangezogen werden dürfen.

Die Berechnung der kombinierten Standardabweichung und der erweiterten Messunsicherheit erfolgt nach Anhang C der EN ISO 376:2011 [3]. Für jede Kalibrierkraft F ist die kombinierte Standardunsicherheit u_c zu ermitteln, erhalten durch Addition der einzelnen quadrierten Unsicherheitsanteile u_i . Diese werden graphisch über der Kraft aufgetragen und danach die Koeffizienten der Kurvenanpassung nach der Methode der kleinsten Quadrate unter Verwendung sämtlicher Datenpunkte bestimmt.

Die Form der angepassten Kurve (z. B. linear, polynomisch oder exponentiell) hängt von den Kalibrierergebnissen ab. Aus Gründen der Einfachheit wird hier eine lineare Gleichung bevorzugt [3]. Falls diese zu Werten führt, die geringer als der kleinste kombinierte Unsicherheitswert sind, sollte eine konservativere Kurvenanpassung angewendet und/oder ein Mindestwert für die Unsicherheit festgelegt werden. Es wird angenommen, dass dies dem gewonnenen kleinsten erhaltenen Wert der kombinierten Standardmessunsicherheit entspricht.

Durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ für den Vertrauensbereich 95% erhält man für jede Kraft aus der einfachen Unsicherheit den Wert für die erweiterte Unsicherheit U . Die Standardunsicherheit ist in Übereinstimmung mit dem Leitfadens zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (GUM) [9] ermittelt.

Stand der Technik

Daher ist nach EN ISO 376:2011 [3]:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^9 u_i^2}$$

und $U = k \cdot u_c$

Im Verhältnis zur Kraft F lässt sich der Wert W der erweiterten relativen Unsicherheit berechnen:

$$W = \frac{U}{F}$$

Dabei ist

- u_1 die mit der eingeleiteten Kalibrierkraft verbundene Standardunsicherheit
- u_2 die mit der erweiterten Vergleichspräzision der Kalibrierergebnisse verbundene Standardunsicherheit
- u_3 die mit der Wiederholpräzision der Kalibrierergebnisse verbundene Standardunsicherheit
- u_4 die mit der Umkehrspanne verbundene Standardunsicherheit
- u_5 die mit der Auflösung der Anzeige verbundene Standardunsicherheit
- u_6 die mit dem Kriechverhalten des Messgeräts verbundene Standardunsicherheit
- u_7 die mit der Drift des Nullwerts verbundene Standardunsicherheit
- u_8 die mit der Temperatur des Messgeräts verbundene Standardunsicherheit
- u_9 die mit der Interpolation verbundene Standardunsicherheit

Die kombinierte Standardabweichung (u_c) und die erweiterte Messunsicherheit (U) werden entweder in Einheiten der Kraft oder als Relativwerte (w_c und W) angegeben.

Die relative Unsicherheit kann ebenfalls in der Einheit der Kraft oder als Prozentsatz angegeben werden. Die einzelnen Komponenten für Kraftaufnehmer selbst sind nach Anhang C (informativ) der EN ISO 376:2011 [3] geregelt und im Anhang 9.1 aufgeschlüsselt. Eine reine Betrachtung der Rückkopplung des Kraftaufnehmers auf die Kraftmaschine bleibt hier gänzlich unbeachtet, da diese Größe ein reines Ergebnis der Ist-Situation bzw. dieser einen betrachteten Einspannung ist. Die Größe dieser Rückwirkung hängt von der Qualität des Kraftsensors ab und kann hier nur in Eignung oder Nicht-Eignung beurteilt werden; Nicht-Eignung wäre zum Beispiel eine asymmetrische Verformung unter Last und ist in jedem Fall im Messergebnis in Form der Reproduzierbarkeit, Wiederholbarkeit und Umkehrspanne deutlich ablesbar.

Der größte Anteil der Messunsicherheit wird in der Regel nicht durch den Kraftsensor selbst, sondern durch dessen Einspannung bzw. durch die Einspannteile des Kraftsensors verursacht. Während man bei der Messung in Druck-Richtung von wenigen geometrisch bestimmten, zur Reduktion von Querkräften zum Teil kugelig ausgeführten Kontaktflächen ausgeht, hat man in Zug-Richtung eine weit größere Anzahl von Einspannteilen. Damit liegt eine Vielzahl von Kontaktflächen vor, die sich in der Praxis, bedingt durch Fertigungstoleranzen, oft nur als unzureichend geeignet herausstellen. Zwar verwendet man auch hier Komponenten mit Kugelflächen, aber eine geometrisch exakte Positionierung ist durch die Verwendung von Verschraubungen nicht möglich. In der Praxis ist damit eine exakte, axiale Einleitung der Kraft nur bedingt möglich. Die Anordnung und Positionierung dieser Einbauteile (vor allem in Zug-Richtung) und somit die Größe des Einflusses der Einspannung obliegt der Erfahrung des Bedieners. Um

Stand der Technik

diese unbekannte Größe messtechnisch in den Griff zu bekommen, ist daher bei Vergleichsmessungen darauf zu achten, dass vorzugsweise die Verwendung derselben Einbauteile möglich ist. Ferner ist darauf zu achten, dass durch entsprechende Dokumentation der Einspann-Situation eine idente Anordnung und Positionierung der Einspannteile erfolgt. Eine detaillierte Beschreibung bzw. Empfehlung der zu verwendenden Einbauteile und deren Abmaße erfolgt in Anhang A der EN ISO 376 [3]. Ebenso werden hier Zwischenringe, Übergangsteile (Verlängerungen, Reduzierstücke usw.) und Druckstücke beschrieben. Eine Abschätzung der Einflussgrößen für die Betrachtung der Messunsicherheit für Einbauteile separat ist nicht möglich. Aus diesem Grund werden Transfernornal und Einbauteile in gleicher Einbaustellung immer als Gesamtheit betrachtet. Die Messunsicherheit wird für das Transfernornal angegeben (zum Beispiel durch die Klassifizierung); die Beiträge der Einbauteile finden sich in Reproduzierbarkeit, Wiederholbarkeit und Umkehrspanne wieder.

Zur besseren Erläuterung der Unsicherheitsfaktoren von Kraftaufnehmern wird hier die Beurteilung des Ergebnisses des Beispiels aus 3.6.2 fortgeführt. Entsprechend der Gleichungen aus Kapitel 3.6.2 werden in der Auswertung der Kraft normkonform die Unsicherheitsfaktoren berechnet und zum Zwecke der Klassifizierung dargestellt.

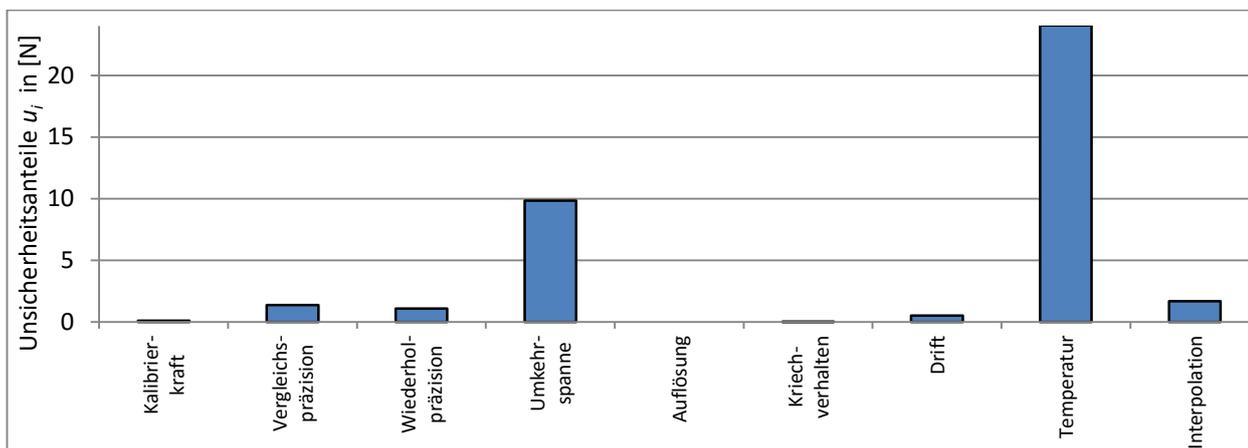


Abbildung 11: mittlere Verteilung der Einflussgrößen der Unsicherheit auf das Kalibrierergebnis bei einem 200kN-Kraftsensor

Abbildung 11 zeigt die Verteilung und die Größenordnungen der einzelnen Einflussgrößen am Beispiel des 200 kN-Transferkraftsensors. Im Speziellen sei auf das Verhältnis der Größen der Unsicherheit von der dargestellten Kalibrierkraft in Spalte 1 und den Größen der Unsicherheitsbeiträge des Transfersensors hingewiesen. Während die Größe der Unsicherheit der Kalibrierkraft und der Auflösung des Anzeigergerätes am Rande der grafischen Darstellungsmöglichkeit liegt, ist der Einfluss der Temperatur des Kraftsensors und die Umkehrspanne (also die Hysterese) für die Qualität des Sensors entscheidend. Im Wesentlichen bedeutet dies, dass die Aussagekraft einer Kraftmessung von der Größe der Umkehrspanne und der Güte der Temperaturkompensation des Kraftsensors abhängt, während die Unsicherheitsanteile der realisierten Kraft, der Messgeräteaflösung und der Kriechabweichung marginal sind.

4 Methodenbasierte Messanlagengestaltung

In einer Gegenüberstellung und Abwägung der Rahmenbedingungen, verfahrenstechnischer Vorgaben, konstruktiver Notwendigkeiten, steuerungstechnischer Möglichkeiten und mathematischer Grundlagen werden die Einflüsse zur Messunsicherheitsbetrachtung bei der Kraftmessung analysiert. Diese Zusammenhänge werden auf die erwarteten Beiträge zur Messunsicherheit der Messergebnisse mit einer derartigen Kraftnormalanlage umgelegt und bewertet. Dabei wurden in Kenntnis verschiedener Realisierungsmöglichkeiten und nach bekanntem Messprinzip in einigen Teilen der Messmethode Überlegungen angestellt, die Möglichkeiten zur Erfüllung der Anforderungen aufzeigen. Bei diesen Modifizierungen bewährter Methoden kommen technische Lösungen zum Tragen, die bekannte Einflussfaktoren bzw. Störgrößen bei der Realisierung von Kräften reduzieren. Dadurch ist man in der Lage, bei Messungen mit Kraftsensoren normativ vorgeschriebene Verfahren einzuhalten, wobei aber auf die Berücksichtigung einzelner festgelegter Korrekturfaktoren in der Auswertung verzichtet werden kann. In einer Abwägung der abgeleiteten Einflussgrößen bzw. eigentlich in der Abwägung von deren größenmäßigen Anteilen zur Gesamtmessunsicherheit werden jene Kerngebiete ausgearbeitet, die den Hauptbeitrag zur Leistungsfähigkeit einer Kraftanlage unter den speziellen Rahmenbedingungen übernehmen. Durch die Summe der Überlegungen im Zuge dieser Analyse werden Anforderungen und Vorgaben definiert, die auch zum Teil bewusst entgegen bewährter Realisierungsmethoden zu einer Lösung führen.

Die beschriebenen Anforderungen sind in einem Lastenheft für eine Anlage zur Realisierung von Kräften zusammengefasst. Dieses Lastenheft wurde Basis für eine schlussendliche Konzeptionierung und die Umsetzung einer derartigen Totlastkraftanlage zur Realisierung der Kraft.

4.1 Komponenten der Krafteinflüsse

In Kenntnis existierender Anlagen z.B. auch in [29], [30], werden alle vermuteten Einflussfaktoren und Schlüsselkomponenten aufgelistet und nachfolgend einer näheren Betrachtung unterzogen.

Aus prinzipiellen Überlegungen lassen sich bei der Realisierung einer Kraft Einflüsse von Normalkraftmaschinen in zwei Schlüsselbereiche aufteilen:

- in den Bereich der *Technik / Konstruktion* und
- in den der *verfahrenstechnischen* Komponenten.

Dabei sollen die Komponenten überlagert betrachtet werden, die als

- eine *maschineninterne Reaktion* erst durch die Realisierung der Kraft entstehen
- und eine Reaktion, abhängig vom Messprinzip auf den zu messenden *Kraftaufnehmer*.

Übergreifend sei der fünfte Teil der Einflusskomponenten zu sehen; der Teil, der den *Umgebungsbedingungen* zuzuordnen ist.

Bei einer grundsätzlichen Betrachtung der Einflussparameter bei der Kraftdarstellung aus Sicht der erzielten Messunsicherheit ist aber zu unterscheiden:

- Betrachtung der Unsicherheitsfaktoren der gemessenen Kraft sowie die
- Betrachtung der Unsicherheitsfaktoren der realisierten Kraft.

Messanlagengestaltung

Die Problematik liegt in der Verknüpfung der beiden Ansätze. Während die gemessene Kraft zu beurteilen ist, muss auf die realisierte Kraft geschlossen werden.

4.1.1 Messunsicherheitsbeiträge der realisierten Kraft

Im Folgenden wird in erster Linie auf die Ursachenanalyse der Unsicherheitsbeiträge bei der Realisierung der Kraft durch Totlastkraftanlagen eingegangen, um im Weiteren Grenzwerte für die Konzeptionierung zu definieren.

Aus den theoretischen Überlegungen der Messunsicherheitsbetrachtung und den konstruktiven Lösungen, sowie Erkenntnisse aus Testmessungen und Informationen von bestehenden Kraftanlagen, können nachfolgende relevante Einflussgrößen zugeordnet werden:

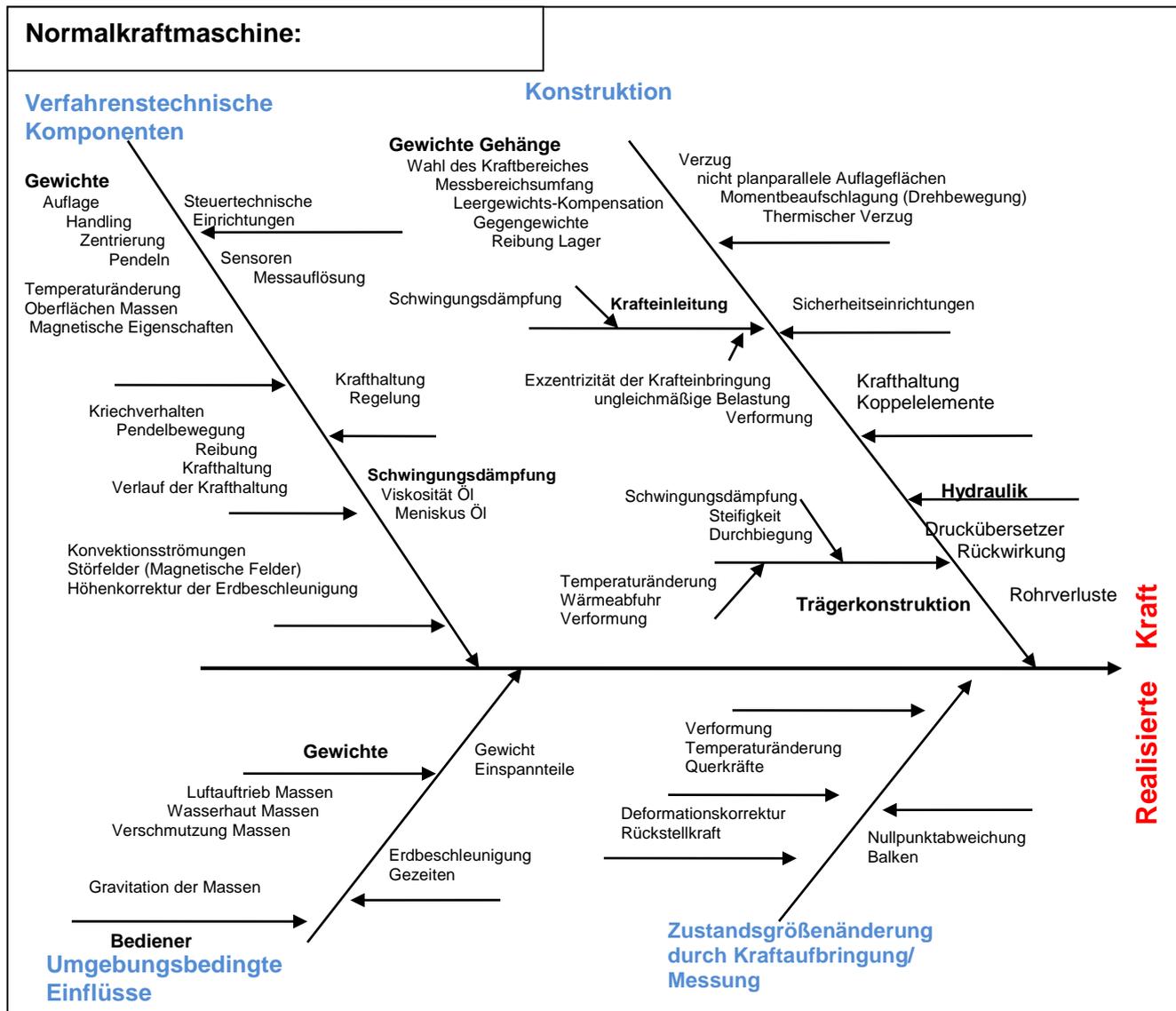


Abbildung 12: Messunsicherheitsrelevante Einflussgrößen der Kraftnormalanlagen bei der Realisierung einer Kraft

Die Einteilung dieser Einflussgrößen in Gruppen erfolgt rein nach allgemein technisch-physikalischen Überlegungen aufgrund der Zuordnung ihres Ursprunges. Diese Einflussgrößen sind im Anschluss einzeln zu betrachten und deren Größe ist in Bezug auf die Gesamtunsicherheit zu bewerten. Eine Aufschlüsselung dieser Einflussgrößen erfolgt vorerst ohne den Unsicherheitsbeitrag des Kraftaufnehmers; d.h. es werden vorerst ausschließlich Beiträge der Kraftnormalanlage betrachtet. Eine Rückwirkung des

Messanlagengestaltung

TransfERNormales auf die Anlage bleibt außer Acht. Unter der Rückwirkung des TransfERNormales werden Auswirkungen wie geometrischer Verzug des TransfERNormals durch die Kraftaufbringung und damit Einbringung einer Querkraft in die Anlage oder Rückstellkräfte durch die Hysterese des Kraftaufnehmers verstanden. Sehr wohl betrachtet werden aber Zustandsgrößenänderungen innerhalb der Anlage durch die unterschiedliche Größe der Kraftaufbringung (z.B. innere Kraftverteilung, Spannungen, Deformationen). Obwohl die angedachten Kraftnormalanlagen in Konzept und Konstruktion unterschiedlich sind, sind die Einflussfaktoren zur Messunsicherheitsbetrachtung ident. Dabei ist jedoch die Rückkopplung des Kraftaufnehmers inklusive der Einspannteile auf die Kraftanlage außer Acht zu lassen. Diese Annahme basiert auf der Tatsache, dass die Messmethode und das realisierte Messprinzip bei beiden Anlagenformen sowie die technische Lösung der Details (Kompensationen, Dämpfung, Lagerungen, ...) ident sind; es ist nur ihr zahlenmäßiger Betrag unterschiedlich.

4.1.2 Messunsicherheitsbeiträge der gemessenen Kraft

Die Einflussgrößen, die bei der Ermittlung der gemessenen Kraft relevant sind, also die auf die Messwerte des Kraftmessgerätes wirkenden Messunsicherheitsanteile, lassen sich weiter in zwei Bereiche teilen. Ein Bereich sind die Komponenten, die ihren Ursprung in der Realisierung der Kraft haben und somit anlagenspezifisch sind und einen Bereich bestehend aus jener Komponenten, die dem Messgerät zugeordnet werden können und somit messgerätespezifisch sind.

Wie der Abbildung 13 zu entnehmen ist, scheinen Beiträge zur Messunsicherheit der gemessenen Kraft mehrere Faktoren gleichzeitig zu beeinflussen. Die Einflüsse und Störgrößen der Betriebszustände auf Maschinenseite, wie kontinuierliche Belastung (treppenförmiger, kontinuierlicher Lastanstieg und Lastabfall) und kontinuierliche Belastung im Dauerbetrieb, korrelieren streng miteinander, gleichgültig, ob sie konstruktiver oder verfahrenstechnischer Natur sind.

Ebenso lassen sich Einflüsse und Auswirkungen auf Seiten der Kraftaufnehmer und der dazugehörigen Einspannkomponenten nicht eindeutig trennen. Vergleichbar werden dadurch nur Ergebnisse identer Verfahren und Abläufe. Die Problematik wird verstärkt, da auch übergreifend zwischen Maschine und Aufnehmer eine völlige Abhängigkeit besteht. So können zum Beispiel konstruktive Maschineneinflüsse durch geeignete Einspannteile kompensiert oder durch Kraftaufnehmer bestimmter Bauart um ein Vielfaches verstärkt werden. Weiters kann ein Kraftaufnehmer anderer Bauart gegenüber dem gleichen konstruktiven Maschineneinfluss eine Unempfindlichkeit zeigen, während eine Abänderung der Einspannteile genau das Gegenteil bewirkt. Diese Effekte lösen weitere Störgrößen aus, die durch das Messprinzip selbst (Kraftaufbringung) verursacht werden.

Wie die Erfahrung zeigt, lassen sich derartige Zusammenhänge zwar systematisch aufzeigen, aber eine allgemein gültige oder mathematische Erfassung der Zusammenhänge scheint nicht möglich zu sein, da diese Zusammenhänge situationsabhängig sind und keine grundlegenden Strukturen aufweisen. Aufgrund der Vielzahl der Schnittstellen reicht eine geringfügige Veränderung einer einzigen Schnittstelle (z.B. geringe Verdrehung eines rotations-symmetrischen Körpers), um an allen Schnittstellen andere Ergebnisse festzustellen. Fertigungstoleranzen, Effekte der

Messanlagengestaltung

Reibung, Passungssysteme, geometrische Veränderungen durch die Kraftaufbringung, zum Teil systematischer, zum Teil zufälliger Natur, sind dafür verantwortlich. Messtechnisch gesehen ist so eine Situation natürlich problematisch. Die besten Ergebnisse erlangt man, wenn mit einer (oder besser mehreren) Messanordnungen idente Messungen durchgeführt werden, wobei man systematisch Komponenten der Messanordnung verändert oder tauscht. Vereinfacht gesagt entspricht dies einer systematischen aber empirischen Ermittlung. Von Vorteil ist es, wenn ein Großteil der Komponenten dieser Messanordnungen erprobt und bekannt ist (vergleiche Methode Dorian Shainin; Komponententausch, paarweiser Vergleich [31]).

Auf diese Weise lassen sich systematische und zufällige Einflüsse empirisch aufdecken und eliminieren; sind die Resultate der Messungen bekannt, lassen sich auch systematische Einflüsse mit geringem Ausmaß berücksichtigen. Die Messergebnisse sind aussagekräftiger, wenn sie aufgrund eines unterschiedlichen Messprinzipes zustande gekommen sind; beruht die Ermittlung der Messergebnisse auf gleichem oder gleichwertigem Prinzip, so sind Korrelationen zu beachten. Der unbekannte und zufällige Anteil wird in der Messunsicherheit nach den anerkannten Methoden der Messunsicherheitsabschätzung ausgedrückt und bewertet.

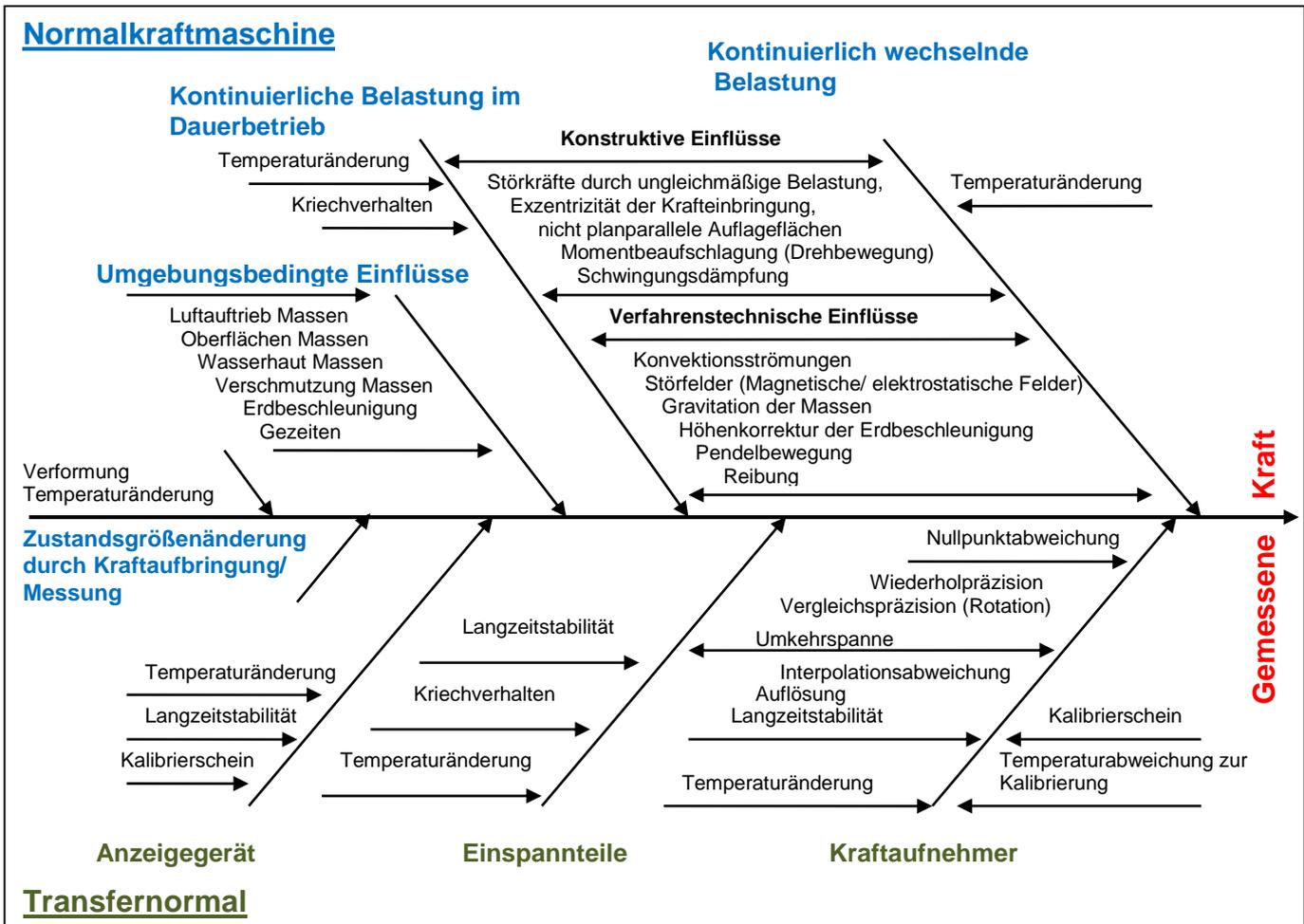


Abbildung 13: Messunsicherheitsbeiträge bei der Ermittlung des Messwertes eines Kraftmessgerätes

Bei der Betrachtung kritischer Unsicherheitsbeiträge der Kraftsensoraufnahme sei an dieser Stelle vorweggenommen, dass die Größe der Beiträge zur Gesamtunsicherheit, welche aus Komponenten einer Totlastkraftanlage kommen, einen Bruchteil der Beiträge

Messanlagengestaltung

ausmachen, die aus den Beiträgen des Kraftaufnehmers selbst kommen. Wird ein Kraftaufnehmer rein auf Druck belastet, stammt in der Regel der Hauptanteil des Unsicherheitsbeitrages aus der Größe der Umkehrspanne des Sensors. Bei Belastung in Zugrichtung kommt ein weiterer beachtlicher Teil aus der Zusammensetzung der Einspannkomponenten hinzu. Während sich die Einflussgröße der Umkehrspanne hauptsächlich auf den Sensor bezieht, d.h. von der Qualität des Sensors abhängig ist, hängt die Größe des Einflusses aus der Einspannung hauptsächlich von der Erfahrung des Anwenders ab, die ihm zur Verfügung stehenden Einspannkomponenten in immer gleichartiger Art und Weise zu verwenden. Die Auswahl der Einspannkomponenten, wie Druckplatten oder Gewindestifte und Kugelschalen im Zugbereich, haben gravierenden Einfluss auf die Qualität des Ergebnisses. Bei der Verwendung von Spannteilen sind allgemeine Empfehlungen leider nicht möglich. Art und Kombination von entsprechenden Einspannteilen hängen von Masse, Kraftbereich, geometrischer Ausbildung der Kraftsensoren und deren Positionierung ab. Um vergleichbare Messergebnisse zu erhalten, ist generell bei genauen Messungen auf unterschiedlichen Kraftmessmaschinen darauf zu achten, dass die Einspannteile in Art, Ausführung und Kombination identisch bleiben oder besser, immer dieselben Teile verwendet werden.

4.2 Kompensation kritischer Massen

Für Anlagen, die nicht als reine Totlastkraftanlagen konzipiert sind (d.h. die kleinste Laststufe entspricht der Masse der Gewichtsaufnahmekonstruktion (Gehänge), oder zumindest einem Teil davon), werden zusätzliche Auflagen gefordert. Das betrifft vor allem Anlagen, bei denen das Eigengewicht des Gehänges über ein Hebelsystem durch Gegengewichte kompensiert wird. Ebenso ist in der Messunsicherheitsbetrachtung jede Art von Führungselementen der Gewichtsaufnahmekonstruktion oder von Pendelstabilisatoren zu berücksichtigen. Dabei sind Einflussfaktoren bedingt durch die Reibung eines nicht ausgeglichenen Systems durch zusätzliche Unsicherheitsbeiträge einzubeziehen. Diese Unsicherheitsbeiträge sind für jeden Kraftbereich separat zu untersuchen und aufzuschlüsseln, d.h. für jede Laststufe im gesamten Messbereich der Anlage sind die Komponenten der Reibung bzw. Rückstellkräfte durch die Kompensation und Faktoren von etwaiger Schwingungsdämpfung zu bestimmen und zu analysieren.

Der Messablauf einer Kalibrierung ist sowohl in der ISO Norm 376 als auch im Calibration Guide der EURAMET im Detail beschrieben und vorgegeben. Normkonform ist zwischen den anzufahrenden Laststufen die Kraft auf einem konstanten Niveau zu halten. Je nach Konstruktion der Kraftnormalanlage sind zusätzliche Vorrichtungen notwendig, um diese Kraft zu realisieren. Dabei ist auf die Ausrichtung der Kraft, im Besonderen auf die axiale Richtung und die Konzentrizität, zu achten. Jede Richtungsveränderung des Kraftvektors – bedingt durch Störgrößen während der Kraftübergabe – wirkt sich im Messergebnis in Form der Reproduzierbarkeit, der Wiederholbarkeit und der Umkehrspanne aus (siehe auch 3.4.1 und 3.6.2). Daher sind Beiträge aus diesen Faktoren im Unsicherheitsbudget zu berücksichtigen.

Ebenso berücksichtigt werden müssen weitere maschinenspezifische Charakteristika wie Steifigkeit der Anlage oder das Auftreten von Querkräften. Die Größe der Auswirkung dieser Einflüsse ist abhängig von der Konstruktion der Transfornormale bzw. Kraftaufnehmer; der Beitrag zur Größe der Kraft in axialer Richtung der Transfornormale

Messanlagengestaltung

ist aber unbekannt. Daher sind bei der weiteren Betrachtung der Messunsicherheitskomponenten jene nicht bekannten, systematischen bzw. zufälligen Faktoren zu berücksichtigen.

Aus den Erkenntnissen des Kapitels 3.5 der Modellierung der Kraftrealisation und den Schlussfolgerungen aus der Messunsicherheitsbetrachtung wird abgeleitet, dass eine Messbereichserweiterung über den üblichen Bereich hinaus nur möglich ist, wenn eine grundsätzliche Änderung der Massenaufnahme zur Kraftrealisation erfolgt. Um von einem einzigen Messbereich auszugehen, wäre es zur Realisation der Kraft von wenigen Newton notwendig, dass die Konstruktion zur Aufnahme der Gesamtmasse (oder zumindest der kleinste in Eingriff zu bringende Teil davon) wenige hundert Gramm wiegt. Betrachtet man bestehende Totlastanlagen, so ist immer die Eigenmasse des Gehänges für die Massescheiben selbst als realisierende Masse zu betrachten. Aufgrund konstruktiver Erfahrungen kann angenommen werden, dass das Eigengewicht bzw. die Eigenmasse einer entsprechenden Vorrichtung, die geeignet ist eine Last von 250 kN aufzunehmen, mehrere hunderte Kilogramm betragen kann. Greift man der Konstruktion voraus und geht davon aus, dass noch zusätzliche ablaufbedingte Funktionen durch das Gehänge übernommen werden müssen, ist eine Masse (auch bei Trennung in Teilabschnitte) des Gehänges von unter einem Kilogramm nicht möglich. Dementsprechend ist eine Kompensation des konstruktiv notwendigen Eigengewichtes der bewegten, kraftübertragenden Teile notwendig. Eine in der Wägetechnik bewährte Methode ist dabei die Verwendung einer Mechanik, die einer Balkenwaage ähnlich ist.

Da bei jeder Art von Waage bewegte Massen verwendet werden, ist es für die weitere Betrachtung notwendig, umgebungsbedingte Änderungen in den Kräfteverhältnissen zu berücksichtigen. Dazu zieht man die in Kapitel 3.5 erhaltene Grundgleichung zur Realisierung der Kraft

$$F = \sqrt{((m - A) \cdot g + F_{St})^2 + F_Q^2}$$

mit der Masse m , der Erdschwere g , dem Luftauftrieb der Massen A , sowie den Störkräften F_Q, F_{St} heran.

Wie in Kapitel 3.5 bereits angedacht, wird der Luftauftrieb A vorerst als Wägewert betrachtet und entspricht somit dem Wägewert der Masse des verdrängten Volumens der Gewichte V_G zum Zeitpunkt der Luftdichte ρ_L . Durch Änderung der Umgebungsbedingungen wie Lufttemperatur, Luftdruck oder Luftfeuchte während der Messung unterliegt der Luftauftrieb des gesamten Systems einer Änderung g .

$$A = V_G \cdot \rho_L + \Delta_A \quad \text{und somit ist}$$

$$F = \sqrt{((m - (V_G \cdot \rho_L + \Delta_A)) \cdot g + F_{St})^2 + F_Q^2}$$

Dabei entspricht das Delta des Luftauftriebes Δ_A der Änderung des Auftriebes all jener bewegter Anlagenteile, die mit der Krafterzeugung und der Kraftübertragung in direkter Verbindung stehen. Ausgenommen werden hier die Masse der krafterzeugenden Gewichtscheiben selbst. Die Auftriebsänderung der Masse der Gewichtscheiben durch die Änderung der Umgebungsbedingungen wird gesondert über die Veränderung von

Messanlagengestaltung

deren Volumen V_G sowie durch die direkte Bestimmung des Luftauftriebes der Gewichtsscheiben berücksichtigt.

Δ_A wird in dieser Betrachtung vorerst auch als eine Masseveränderung dargestellt. Löst man Δ_A aus diesem Masseverhältnis und betrachtet diese Änderung der Masseverhältnisse als Änderung der Kraft F_{Δ_A} , so ist zu schreiben:

$$F = \sqrt{((m - (V_G \cdot \rho_L)) \cdot g + F_{\Delta_A} + F_{St})^2 + F_Q^2}$$

Graphisch dargestellt ergibt sich für die Waagenkonstruktion zur Kompensation der Gehängemasse durch Freimachen der Kräfte:

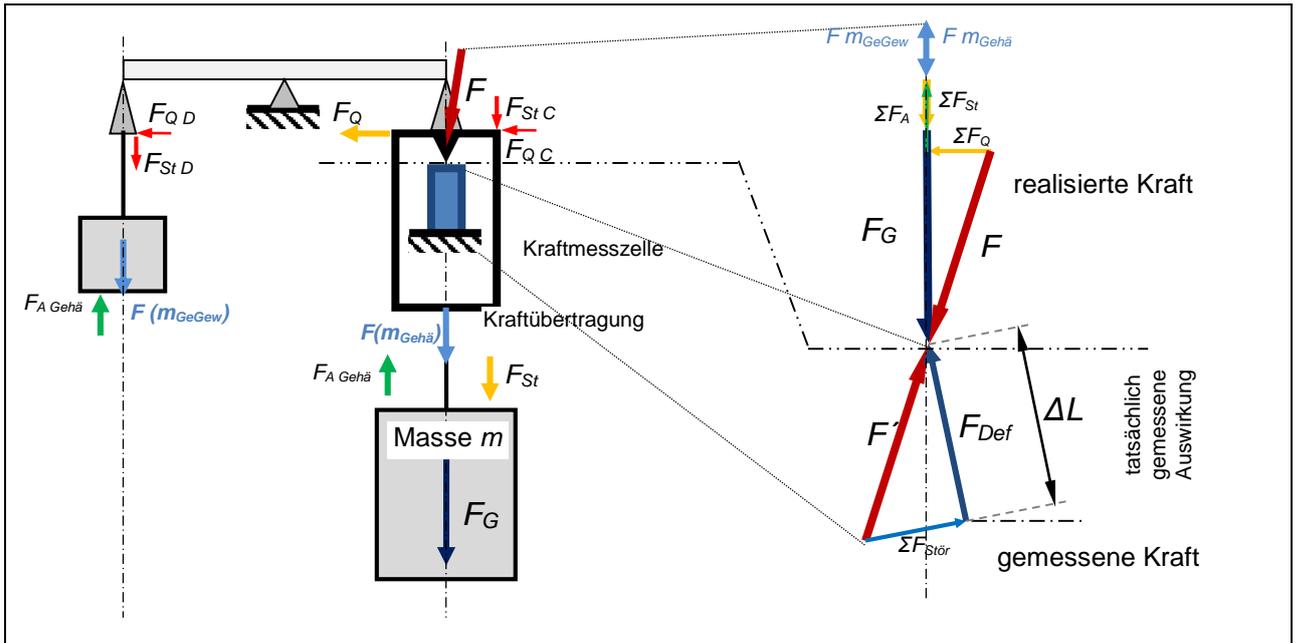


Abbildung 14: Prinzip der Kräfte einer Totlastanlage mit Kompensation der Gehängemasse und Ableitung zur Kraftmessung

Auf Basis dieser Überlegung ist F_{Δ_A} nun als Änderung der Verhältnisse des gesamten Waagebalkensystems (aus Gehänge und Gegengewichten) über einen Zeitraum zu sehen. F_{Δ_A} kann somit aus zwei Kräfteverhältnissen betrachtet werden. Ein Kräfteverhältnis ergibt sich durch das System zu Beginn der Messserie, $F_{\text{Sys}0}$ und durch Änderung der Bedingungen ergibt sich ein zweites Kräfteverhältnis zum Zeitpunkt der aktuellen Messung, $F_{\text{Sys}1}$. Aus verfahrenstechnischen Gründen wird $F_{\text{Sys}0} = 0$ angenommen.

Als Basis gilt für das Wägesystem (Balkenwaage) im ausgeglichenen Zustand ein Kräftegleichgewicht:

$$F_{\text{Sys}0} = \sqrt{((m_{\text{Gehä}} - (V_{\text{Gehä}0} \cdot \rho_{L1})) \cdot g_1 + F_{St a})^2 + F_{Q a}^2} - \sqrt{((m_{\text{GeGew}} - (V_{\text{GeGew}0} \cdot \rho_{L2})) \cdot g_2 + F_{St b})^2 + F_{Q b}^2}$$

wobei $m_{\text{Gehä}}$ die Masse des Gehänges, $V_{\text{Gehä}0}$ das Volumen des Gehänges, m_{GeGew} die Masse des Gegengewichtes, $V_{\text{GeGew}0}$ das Volumen des Gegengewichtes, ρ_{L1} , ρ_{L2} die örtlich gemessenen Luftdichten (durch Temperatur, Luftfeuchte und Luftdruck) bei Gehänge und Gegengewicht, g_1 , g_2 die örtlich bestimmten Erdbeschleunigungen bei Gehänge und Gegengewicht und $F_{St a}$, $F_{St b}$, $F_{Q a}$, $F_{Q b}$ die örtlich vorherrschenden Störkräfte und Querkräfte bei Gehänge und Gegengewicht (parasitäre Kräfte) sind.

Messanlagengestaltung

Unter Berücksichtigung der Volumenänderung durch Änderung von t und p

$$V(t, p) = V_0 \cdot [1 - \kappa(p - p_0)] \cdot [1 + \alpha_V(t - t_0)]$$

und der daraus folgenden Änderung von ρ_L ergibt sich die momentan gültige Kraft F_{Sys1} :

$$F_{Sys1} = \sqrt{((m_{Geh\ddot{a}} - (V_{Geh\ddot{a}1} \cdot \rho_{L3})) \cdot g_1 + F_{StC})^2 + F_{QC}^2} - \sqrt{((m_{GeGew} - (V_{GeGew1} \cdot \rho_{L4})) \cdot g_2 + F_{StD})^2 + F_{QD}^2}$$

In der Regel ist $F_{Sys1} = F_{\Delta A}$ und somit $F_{Sys1} - F_{Sys0} = F_{\Delta A}$,

wobei nach Änderung $V_{Geh\ddot{a}1}$ das Volumen des Gehänges, V_{GeGew1} das Volumen des Gegengewichtes, ρ_{L3} , ρ_{L4} die örtlich gemessenen Luftdichten (durch Temperatur, Luftfeuchte und Luftdruck) bei Gehänge und Gegengewicht, F_{StC} , F_{StD} , F_{QC} , F_{QD} die örtlich vorherrschenden Querkräfte und Störkräfte bei Gehänge und Gegengewicht sind. In der Betrachtung wird davon ausgegangen, dass sich g_1 und g_2 , die örtlich bestimmten Erdbeschleunigungen bei Gehänge und Gegengewicht, durch Schwerpunktsverlagerung und Gezeitenwechsel während einer Messserie (mehrere Stunden) nicht in einem relativ zueinander kritischen Ausmaß verändern. In der Betrachtung der Messunsicherheit wird dieser Faktor aber berücksichtigt.

$$F = \sqrt{\left((m - (V_G \cdot \rho_L)) \cdot g + \left(\sqrt{((m_{Geh\ddot{a}} - (V_{Geh\ddot{a}1} \cdot \rho_{L3})) \cdot g_1 + F_{StC})^2 + F_{QC}^2} - \sqrt{((m_{GeGew} - (V_{GeGew1} \cdot \rho_{L4})) \cdot g_2 + F_{StD})^2 + F_{QD}^2} \right) + F_{St} \right)^2 + F_Q^2}$$

Dabei ist:

F : [N] Kraft, Ergebnis, m : [kg] tatsächliche Masse der im Eingriff befindlichen Gewichte, W_A : [kg] Wägewert des Auftriebes, V_G : [m³] aktuelles Volumen der im Eingriff befindlichen Gewichtscheiben, V_0 : [m³] Volumen der Gewichte bei 20 °C, ρ_L : [kg/m³] die mittlere, örtlich gemessene Luftdichte (berechnet durch Temperatur, Luftfeuchte und Luftdruck), g : [m/s²] Fallbeschleunigung auf der Höhe des Schwerpunktes der Gewichtscheiben, $F_{\Delta A}$: [N] Auftriebskraft aus geändertem Systemauftrieb (Gehänge/Gegengewichte) im Laufe der Messserie, $m_{Geh\ddot{a}}$: [kg] Masse des Gehänges, $V_{Geh\ddot{a}}$: [m³] aktuelles Volumen des Gehänges bezogen auf ρ_{L3} , ρ_{L3} : [kg/m³] Luftdichte (gemessen) bei Gehänge, g_1 : [m/s²] Fallbeschleunigung auf der Höhe des Schwerpunktes des Gehänge, F_{StC} : [N] die örtlich angenommenen Störkräfte bei Gehänge, zusätzliche Störkraft durch Änderung des Gehänges: Öldämpfer, Auftrieb, Reibung, F_{QC} : [N] die örtlich angenommenen Querkräfte bei Gehänge, zusätzliche Querkraft durch Änderung des Gehänges: Asymmetrie-Schrägstellung, m_{GeGew} : [kg] Masse des Gegengewichts, $V_{GeGew\ddot{a}}$: [m³] aktuelles Volumen des Gegengewichts bezogen auf ρ_{L4} , ρ_{L4} : [kg/m³] Luftdichte (gemessen) bei Gegengewicht, g_2 : [m/s²] Fallbeschleunigung auf der Höhe des Schwerpunktes des Gegengewichts, F_{StD} : [N] die örtlich angenommenen Störkräfte bei Gegengewicht, zusätzliche Störkraft durch Änderung des Gegengewichts: Öldämpfer, Auftrieb, Reibung, F_{QD} : [N] die örtlich angenommenen Querkräfte bei Gegengewicht, zusätzliche Querkraft durch Änderung des Gegengewichts, κ : [1/Pa] Kompressibilität der Gewichte, p : [Pa] Druck auf die Gewichte, p_0 : [Pa] Bezugsdruck, α_V : [1/°C] Ausdehnungskoeffizient Stahl, t : [°C] Messtemperatur bei Gewichten, t_0 : [°C] Bezugstemperatur, F_{St} : [N] zusätzliche Störkraft durch Aufbringung der Massen, F_Q : [N] zusätzliche Querkraft durch Aufbringung der Massen, Z : [N] erfahrungsgemäßer zusätzlicher Messunsicherheitszuschlag für direkten Bedienungseinfluss.

Zur weiteren Betrachtung der Modellgleichung und zur ergänzenden Abschätzung von maximal erlaubten Unsicherheitsbeiträgen einzelner Komponenten werden im Folgenden Werte exemplarisch angenommen, die entweder vorgegeben oder empirisch ermittelt wurden. Die herangezogenen Ausgangswerte für die Masse m der Gewichtscheiben und

Messanlagengestaltung

deren Volumen V_G sind fiktive Nominalwerte bei einer angenommenen Materialdichte von Gewichtstahl: $\rho_m = 7950 \text{ kg/m}^3$. Als Luftdichte wird eine realistische, mittlere Luftdichte von $\rho_L = 1,16 \text{ kg/m}^3$ angenommen. Zur Vereinfachung werden hier alle Luftdichten gleichgesetzt. Die verwendeten Werte für die Erdschwere werden alle gleich angenommen und entsprechen dem Grundwert für g im BEV. Die Masse der Waagenkonstruktion wird hier mit 1000 kg je Seite vorerst definiert. Dieser Wert stellt einen Erfahrungswert dar, der größenordnungsmäßig für eine Konstruktion zur Aufnahme von Stahlscheiben mit einer Masse von 25 t angenommen werden kann. Verglichen mit anderen Kraftmaschinen wird ein solcher Massestapel etwa 1,2 m im Durchmesser und mit Arbeitszwischenräumen für Haltevorrichtungen etwa eine Höhe von 5 m aufweisen. Da zur Vermeidung von Beschädigungen der Gewichte Kunststoffauflagen in den Haltekonstruktionen zu verwenden sind, wird als mittlere Dichte für das Gehänge 7900 kg/m^3 angenommen. Das Volumen ergibt sich aus der Masse und der Dichte; die Ausgangswerte für die Gegengewichtseite werden ident angenommen. Die verwendeten Werte für die örtlich angenommenen Querkräfte und andere Störkräfte bei Gehänge und Gegengewicht $F_{StC}, F_{StD}, F_{QC}, F_{QD}$ wurden in Analogie zu den Erkenntnissen aus Kapitel 3.5 der Grundbetrachtung von Störgrößen für eine 1 kN-Kraftanlage ermittelt und abgeschätzt.

Für die nachfolgende Betrachtung seien hier die absoluten Größen der Werte zweitrangig, da sie sich nur auf die Größe des Ergebnisses beziehen. In dieser Betrachtung relevant ist der Unsicherheitsbeitrag der angenommenen Werte. Die Größe des Ergebnisses ist in dieser Betrachtung deshalb als zweitrangig zu sehen, da die Größe im Endeffekt nur eine Frage der Justage bzw. der Abstimmung der Eingangsgrößen ist. Analog zur Grundanalyse aus Kapitel 3.5 seien auch hier nur alle abgeschätzten Messunsicherheitswerte sowie abgeschätzte Grenzbereiche von entscheidender Bedeutung. Die Bandbreiten dieser Bereiche der zu erwartenden Messunsicherheiten sind in der Metrologie in Analogie zu ähnlichen Messverfahren als bekannt anzunehmen und daher entsprechend abschätzbar.

Betrachtet man auf Basis der Modellgleichung verschiedene Laststufen in einem Bereich bis 200 kN unter der Vorgabe bekannter, nicht zu verändernder Unsicherheitsbeiträge und einer zu erreichenden maximalen relativen Unsicherheit von $W = 2 \cdot 10^{-5}$, erhält man Ausgangswerte für mögliche Unsicherheitsbeiträge aus der Darstellung der Kraft. Die im Folgenden betrachteten Unsicherheitsbeiträge der einzelnen Größen beruhen alle auf Erfahrungswerten bei analogen Messungen der Masse- oder Dichtebestimmung oder haben sich aus der Analyse der Grundbetrachtung von Störgrößen in Kapitel 3.5 ergeben bzw. sind routinemäßig erzielte Standardunsicherheiten. Vom Prinzip her gesehen, wird in der folgenden Analyse die Grundbetrachtung um die Kräftegleichung der Gehängemasse und Gegengewichtsmasse erweitert. Im Weiteren wird die zeitliche Änderung vor allem der Volumina hinzugefügt.

Im Folgenden ist die exemplarische Darstellung der Ausgangswerte für 200 kN gezeigt. Für weitere Betrachtungen sind nur die Massewerte m und die verbunden Volumina V_0 zu variieren, die weiteren Werte sind konstruktionsabhängig und bleiben vorerst unverändert:

Messanlagengestaltung

Größe	Art-Verteilung	Wert	Quelle: Wert	erw. Messunsicherheit u oder Grenzen	Erweiterungsfaktor
F	Ergebnis				
m	Normalverteilung	zB.: 20000 kg	Annahme / Festlegung	zB.: u: 0,0106 kg	1
W _A	Zwischenergebnis				
V _G	Zwischenergebnis				
V ₀	Normalverteilung	2,5157 m ³	aus ρ_m	u: 0,005 m ³	1
ρ_L	Rechteckverteilung	1,16 kg/m ³	Annahme: realistische Luftdichte	Grenzen: $\pm 0,00145$ kg/m ³	
g	Rechteckverteilung	9,80841262 m/s ²	bekannt	Grenzen: $\pm 0,00001$ m/s ²	
F _{ΔA}	Zwischenergebnis				
m _{Gehä}	Normalverteilung	1000 kg	empirisch angenommen / festgelegt	u: 0,0055 kg	1
V _{Gehä}	Normalverteilung	0,12658 m ³	aus ρ Material	u: 0,001 m ³	1
ρ_{L3}	Rechteckverteilung	1,16 kg/m ³	Annahme: realistische Luftdichte	Grenzen: $\pm 0,0014$ kg/m ³	
g ₁	Rechteckverteilung	9,80841262 m/s ²	bekannt	Grenzen: $\pm 0,000001$ m/s ²	
F _{StC}	Rechteckverteilung	0 N	Annahme: Vergleich mit F _{StC} -1 kN	Grenzen: $\pm 0,01$ N	
F _{QC}	Rechteckverteilung	0 N	Annahme: Vergleich mit F _Q -1 kN	Grenzen: $\pm 0,05$ N	
m _{GeGew}	Normalverteilung	1000 kg	gleich m _{Gehä}	u: 0,0055 kg	1
V _{GeGewä}	Normalverteilung	0,12658 m ³	gleich V _{Gehä}	u: 0,001 m ³	1
ρ_{L4}	Rechteckverteilung	1,16 kg/m ³	Annahme: realistische Luftdichte	Grenzen: $\pm 0,0014$ kg/m ³	
g ₂	Rechteckverteilung	9,80841262 m/s ²	bekannt	Grenzen: $\pm 0,000001$ m/s ²	
F _{StD}	Rechteckverteilung	0 N	gleich Gehänge	Grenzen: $\pm 0,01$ N	
F _{QD}	Rechteckverteilung	0 N	gleich Gehänge	Grenzen: $\pm 0,01$ N	
κ	Rechteckverteilung	$1 \cdot 10^{-12}$ 1/Pa	bekannt	Grenzen: $\pm 2 \cdot 10^{-13}$ 1/Pa	
p	Normalverteilung	98185,1 Pa	bekannt	u: 10 Pa	1
p ₀	Konstante	101325 Pa	bekannt		
α_V	Rechteckverteilung	$5 \cdot 10^{-5}$ 1/°C	bekannt	Grenzen: $\pm 2 \cdot 10^{-6}$ 1/°C	
t	Normalverteilung	21 °C	bekannt	u: 0,05 °C	1
t ₀	Konstante	20 °C	bekannt		
F _{St}	Rechteckverteilung	0 N	empirisch angenommen	Grenzen: $\pm 3,45$ N	
F _Q	Rechteckverteilung	0 N	empirisch angenommen	Grenzen: ± 100 N	
Z	Rechteckverteilung	0 N	geschätzt	Grenzen: $\pm 0,002$ N	

Tabelle 4: Angenommene Ausgangswerte und deren Verteilungstyp für die 200 kN-Laststufe

In Tabelle 4 geht man von den bekannten oder angenommenen Werten (m , $F_{\Delta A}$, $m_{Gehä}$, m_{GeGew} , V_G , $V_{Gehä}$, $V_{GeGewä}$, ρ_L , ρ_{L3} , ρ_{L4} , g , g_1 , g_2 , F_{StC} , F_{QC} , F_{StD} , F_{QD} , t , t_0 , p , p_0 , κ , und α_V) aus. Dabei sind auch die dafür zu erwartenden Messunsicherheiten bei angenommenen Normalverteilungen oder die Grenzwerte bei angenommenen Rechteckverteilungen bekannt oder können abgeschätzt werden. Während die Größen m , $F_{\Delta A}$ und V_G , die sich für die Darstellung verantwortlich zeigen, variiert werden, bleiben alle anderen maschinenabhängigen Größen für die Betrachtung konstant. Wie bei der Untersuchung der Grundgleichung in Kapitel 3.5 lassen sich in der Kalkulation des GUM-Work-Bench für jede Laststufe durch bewusstes Variieren der Störgrößen F_{St} und F_Q jene Grenzwerte abschätzen, bei denen eine relative Gesamtunsicherheit auf die Kraft von genau $W = 2 \cdot 10^{-5}$ bei $k=2$ gerade noch möglich ist. Dabei kann auch hier für die Betrachtung der Realisierung die Querkraft F_Q vorerst vernachlässigt werden. Als zusätzlicher Bedieneinfluss Z werden anlagen- oder verfahrensabhängige Einflüsse, zum Beispiel Ablesefehler oder mangelhafte Interpolation bei der Ablesung, angenommen.

Versucht man das zu erwartende Messunsicherheitsbudget über den gesamten beabsichtigten Messbereich von 20 N bis 200 kN zu betrachten, erweist sich die Verwendung des GUM-Work-Bench als zweckmäßig. Entsprechend der aufgestellten Modellgleichung variiert man die Eingangsmassen m und die korrelierenden Volumina V_G . Als Ausgangswerte der übrigen Variablen werden die angenommenen Grenzwerte der Rechteckverteilungen oder die Standardunsicherheiten der Normalverteilungen aus Tabelle 4 herangezogen. Die Größen dieser angegebenen Werte geben somit einen betragsmäßigen Wert für jede Störgröße, der bei der Realisation der Kraftstufe von der Störgröße nicht überschritten werden darf. Anderenfalls wäre in der jeweiligen Laststufe

Messanlagengestaltung

die Einhaltung der Grundforderung von einer zu erreichenden relativen Gesamtunsicherheit von $W = 2 \cdot 10^{-5}$ bei $k=2$ nicht möglich.

	Laststufe:	200 kN	20 kN	2 kN	200 N	20 N
Größe	Wert	Wert	Wert	Wert	Wert	Wert
m		20000,0000 kg	2000,00000 kg	200,000000 kg	20,0000000 kg	2,00000000 kg
W _A		2,91836 kg	0,291836 kg	0,029183 kg	0,0029183 kg	0,0002918 kg
V _G		2,51583 m ³	0,251583 m ³	0,025158 m ³	0,0025158 m ³	0,0002516 m ³
V ₀		2,51570 m ³	0,251570 m ³	0,025157 m ³	0,0025157 m ³	0,0002516 m ³
Größe	Wert	Unsicherheitsbeitrag in [N]				
m		0,10 N	0,017 N	0,0039 N	0,00039 N	49·10 ⁻⁶ N
V ₀		-0,057 N	-0,0057 N	-0,0011 N	-0,00057 N	-0,00011 N
ρ _L	1,160000 kg/m ³	-0,021 N	-0,0021 N	-0,00021 N	-21·10 ⁻⁶ N	-2,1·10 ⁻⁶ N
g	9,80841262 m/s ²	0,12 N	0,012 N	0,0012 N	0,00012 N	12·10 ⁻⁶ N
F _{ΔA}	0,0 N					
m _{Gehä}	1000,00000 kg	0,027 N	0,0098 N	0,0044 N	0,0044 N	0,0044 N
V _{Gehä}	0,12658 m ³	-0,011 N	-0,0057 N	-0,0057 N	-0,0057 N	-0,0057 N
ρ _{L3}	1,1600 kg/m ³	-0,0010 N	-0,0010 N	-0,0010 N	-0,0010 N	-0,00010 N
g ₁	9,808412620 m/s ²	0,00058 N				
F _{StC}	0,0 N	0,0058 N	0,0058 N	0,0058 N	0,0058 N	0,0058 N
F _{QC}	0,0 N	0,0 N	0,0 N	0,0 N	0,0 N	0,0 N
m _{GeGew}	1000,00000 kg	-0,027 N	-0,0098 N	-0,0044 N	-0,0044 N	-0,0044 N
V _{GeGewä}	0,12658 m ³	0,011 N	0,0057 N	0,0057 N	0,0057 N	0,0057 N
ρ _{L4}	1,1600 kg/m ³	0,0010 N	0,0010 N	0,0010 N	0,0010 N	0,00010 N
g ₂	9,808412620 m/s ²	-0,00058 N				
F _{StD}	0,0 N	-0,0058 N	-0,0058 N	-0,0058 N	-0,0058 N	-0,0058 N
F _{QD}	0,0 N	0,0 N	0,0 N	0,0 N	0,0 N	0,0 N
κ	1000·10 ⁻¹⁵ 1/Pa	-10·10 ⁻⁹ N	-1,0·10 ⁻⁹ N	-100·10 ⁻¹² N	-10·10 ⁻¹² N	-1000·10 ⁻¹⁵ N
p	98185,1 Pa	0,0 N				
p ₀	101,325·10 ³ Pa					
α _v	50,00·10 ⁻⁶ 1/°C	-33·10 ⁻⁶ N	-3,3·10 ⁻⁶ N	-200·10 ⁻⁹ N	-20·10 ⁻⁹ N	-2,0·10 ⁻⁹ N
t	21,0000 °C	-72·10 ⁻⁶ N	-7,2·10 ⁻⁶ N	-720·10 ⁻⁹ N	-72·10 ⁻⁹ N	0,0 N
t ₀	20,0 °C					
F _{St}	0,0 N	2,0 N	0,20 N	0,014 N	0,0018 N	0,00015 N
F _Q	0,0 N	0,0 N	0,0 N	0,0 N	0,0 N	0,0 N
Z	0,0 N	0,0012 N	0,0012 N	0,0012 N	0,00012 N	58·10 ⁻⁶ N
Ergebnis	Wert	196139,6 N	19613,96 N	1961,396 N	196,140 N	19,614 N
	Standardabweichung	2,00 N	0,198 N	0,020 N	0,0133 N	0,0131 N
Bei k= 2	relative erw. Messunsicherheit	±2,0·10 ⁻⁵	±2,0·10 ⁻⁵	±2,0·10 ⁻⁵	±14·10 ⁻⁵	±130·10 ⁻⁵
	erweiterte Messunsicherheit	±4,0 N	±0,40 N	±0,040 N	±0,027 N	±0,026 N

Tabelle 5: Zusammengefasste Ergebnisse relativer Messunsicherheiten über die Lastbereiche von 200 kN bis 20 N

Vergleicht man die in Tabelle 5 ermittelten Ergebnisse der höheren Laststufen mit Massenkompensation mit den Ergebnissen derselben Laststufen ohne Massenkompensation aus Tabelle 3, so erkennt man, dass in beiden Fällen die erlaubten (möglichen) Größen der Störkräfte gleich sind. Faktisch bedeutet dies, dass Waagekonstruktionen im Bereich der Maximallasten keinen bedeutenden Einfluss auf das Ergebnis zu haben scheinen.

Betrachtet man aber in dieser Simulation der Kompensation der Masse die erzielten Messunsicherheiten über den gesamten beabsichtigten Messbereich von 20 N bis 200 kN bei den gleichen Laststufen, die auch in Kapitel 3.5 betrachtet wurden, stößt man an die Grenzen vertretbarer Messunsicherheiten (siehe gelb hinterlegte Messunsicherheiten in Tabelle 5).

Messanlagengestaltung

Variiert man zur Betrachtung verschiedener Laststufen die Massewerte der kraftrealisierenden Gewichtscheiben und die dazugehörigen, auftriebsrelevanten Volumina über den gesamten Messbereich bis 20 N Kleinstlast und bleiben alle anderen maschinenbezogenen Ausgangswerte gleich, so sind gegenläufige Trends bei den Unsicherheitsbeiträgen feststellbar. Während bei abnehmenden Lasten die relativen Unsicherheitsbeitragsanteile der Masse, des Volumens und der Störgröße F_{St} entsprechend abnehmen, bleiben jene Masse- und Volumenanteile aus der Waagenkonstruktion selbst über den gesamten betrachteten Messbereich fast konstant (blau markierte Beiträge in Tabelle 5). Dies bewirkt, dass sich trotz kleiner werdender Unsicherheitsbeiträge die geschätzte erweiterte Messunsicherheit U unter einer realisierten Laststufe von etwa 1,5 kN zwischen 25 mN und 30 mN einpendeln wird. Relativ auf die Kraft bezogen, bedeutet das einen Anstieg der Messunsicherheit von $W = 2 \cdot 10^{-5}$ bei $k=2$ auf $W = 130 \cdot 10^{-5}$.

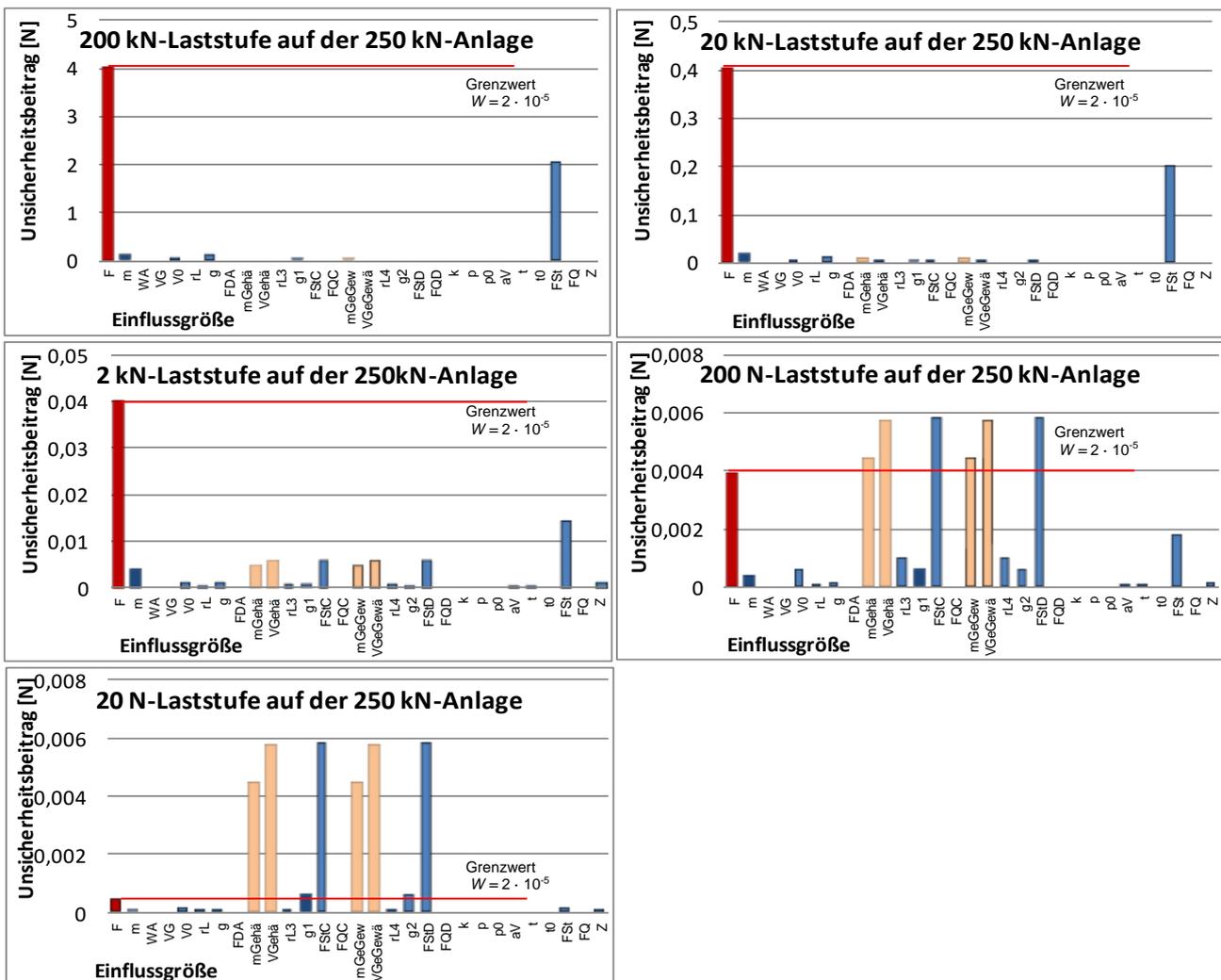


Abbildung 15: Unsicherheitsbeiträge bei kleiner werdenden Laststufen im Vergleich mit einer zulässigen relativen erweiterten Unsicherheit von $W = 2 \cdot 10^{-5}$ (rote Säulen)

In der Abbildung 15 und der Abbildung 16 sind die maximal erlaubten relativen Gesamtunsicherheiten von $W = 2 \cdot 10^{-5}$ (in rot dargestellt) den einzelnen Unsicherheitsbeiträgen gegenübergestellt. Zur besseren Anschaulichkeit werden auch hier bezogen auf die Last die relativen Unsicherheitsanteile in N als Kraftbeiträge dargestellt. Man erkennt, dass der einzige in der Modellgleichung bisher noch nicht abschätzbare Unsicherheitsbeitrag der Störgröße F_{St} relativ betrachtet hier im Vergleich

Messanlagengestaltung

mit der roten Säule eine maximale relative Unsicherheit von etwa $W = 1 \cdot 10^{-5}$ ausmachen darf (siehe Kapitel 3.5). Durch die aufhebende Wirkung der Gehänge-Gegengewicht-Kompensation wirken sich die entstehenden Kräfte und deren Unsicherheitsanteile im oberen Teil des Messbereiches nur geringfügig aus (orange Säulen). An den zusammengefassten Ergebnissen der Messunsicherheitsbeiträge über alle Laststufen zeigen sich aber die Grenzbereiche des Möglichen. Die Gehängekompensation ermöglicht zwar theoretisch den Messbereich einer solchen Anlage unbegrenzt zu erweitern, praktisch gesehen ist dies aber durch die Auswirkungen des Einflusses der Umgebungsbedingungen auf die Konstruktion selbst durch die großen Volumina nur mit Einschränkungen zu realisieren. Wie den gelb markierten relativen Unsicherheiten der Ergebnisse in Tabelle 5 zu entnehmen ist und die orangefarbenen Säulen in Abbildung 15 zeigen, ist die 2 kN-Laststufe jene Last, bei der die Anteile der einzelnen Beiträge sich etwa gleichermaßen einem Drittel der erwünschten Gesamtunsicherheit nähern und diese daher nicht vergrößern.

4.3 Grenzen des Messbereiches eines Kraftnormalanlagensystems

Praktisch gesehen bedeutet dies, dass eine „schwere“ Ausführung der Konstruktion für Laststufen kleiner 2 kN durch das ungünstige Verhältnis Last zu Konstruktionsvolumen bei Änderung der Umgebungsbedingungen als unzureichend einzustufen ist.

Betrachtet man als logische Folgerung eine analoge Waagenkonstruktion unter identen Aspekten und reduziert in erster Linie die Eigenmasse der Waagenkonstruktion sowie die Auswirkungen der Umgebungseinflüsse auf diese Eigenmasse, erhält man ein im Verhältnis ähnliches Bild über den Verlauf der Unsicherheitsbeiträge wie in den großen Laststufen.

Tabelle 6 und Abbildung 16 zeigen das Ergebnis der Kalkulation von den gleichen Ausgangswerten bei den Laststufen kleiner gleich 2 kN mit der Annahme, dass die Eigenmasse des Gehänges und des Gegengewichtes $m_{Gehä}$ und m_{GeGew} 50 kg je Seite nicht übersteigen. Das Volumen wurde mit gleicher Dichte (7900 kg/m^3) bestimmt. Durch die Reduktion der Konstruktionsmasse und der dadurch bedingten Verringerung der zu erreichenden Messunsicherheiten auf die Masse, das Volumen der Konstruktion und die Mechanik wirkt sich das Verhältnis Last zu Konstruktionsvolumen günstig auf die Gesamtmessunsicherheit aus. Die durch diese Maßnahme erreichte Verringerung der Messunsicherheitsanteile ist ausreichend zur Erreichung einer relativen erweiterten Gesamtunsicherheit kleiner $W = 2 \cdot 10^{-5}$.

Stellt man die Verteilung der erwarteten relativen Unsicherheitsanteile einer 200 kN-Anlage und die einer 2 kN-Anlage einander gegenüber, so ist zu erkennen, dass das Verhalten der Verteilung der Unsicherheitsanteile im Prinzip ident ist. Entsprechend der Theorie steigt durch die begrenzte Möglichkeit der Auflösung auch schon bei Kalibrierungen (z.B. bei der Masse- oder Volumenbestimmung der Gewichtscheiben) im unteren Grenzbereich der relative Anteil der Einzelmessunsicherheit. Daher wird auch die Gesamtunsicherheit grenzwertig. Am massiven Anstieg der relativen Messunsicherheit erkennt man das Erreichen der messtechnischen Limits der gewählten Verfahren.

Geht man bei Überlegungen wieder in Richtung Konzeptionierung einer Totlast-Kraftnormalanlage von der in Kapitel 3.5 ermittelten maximal erlaubten Störkraft von

Messanlagengestaltung

$F_{St} = 0,15 \text{ mN}$ bei der Realisation von 20 N aus, bedeutet das über den Messbereich bis 250 kN betrachtet, dass über den gesamten angestrebten Messbereich der Einfluss auf den Wägewert der Massen 15 mg nicht überschreiten darf. Verfahrenstechnisch kann dieser Grenzwert umgesetzt werden, allerdings beweist sich der Einfluss der Umgebungsbedingungen auf die Konstruktion in einem Ausmaß, dass dieser Grenzwert im Lastbereich kleiner 2 kN nicht einzuhalten ist. Daher ist die Teilung des Messbereiches einer Kraftnormalanlage bei 2 kN unumgänglich.

Bei Reduktion der Massen bewegter Anlagenteile zur Gewichtsaufnahme ergibt sich:

	Laststufe:	2 kN	200 N	20 N
Größe	Wert	Wert	Wert	Wert
m		200,000000 kg	20,0000000 kg	2,00000000 kg
W_A		0,029183 kg	0,0029183 kg	0,0002918 kg
V_G		0,025158 m ³	0,0025158 m ³	0,0002516 m ³
V_0		0,025157 m ³	0,0025157 m ³	0,0002516 m ³
Größe	Wert	Unsicherheitsbeitrag in [N]	Unsicherheitsbeitrag in [N]	Unsicherheitsbeitrag in [N]
m		0,0039 N	0,00039 N	$49 \cdot 10^{-6}$ N
V_0		-0,0011 N	-0,00057 N	-0,00011 N
ρ_L	1,160000 kg/m ³	-0,00021 N	$-21 \cdot 10^{-6}$ N	$-2,1 \cdot 10^{-6}$ N
g	9,80841262 m/s ²	0,0012 N	0,00012 N	$12 \cdot 10^{-6}$ N
$F_{\Delta A}$	0,0 N			
$m_{\text{Gehä}}$	50,00000 kg	0,000059 N	0,000059 N	0,000059 N
$V_{\text{Gehä}}$	0,006329 m ³	-0,000057 N	-0,000057 N	-0,000057 N
ρ_{L3}	1,1600 kg/m ³	-0,00012 N	-0,00012 N	-0,00012 N
g_1	9,808412620 m/s ²	0,00058 N	0,00058 N	0,00058 N
F_{Stc}	0,0 N	0,0058 N	0,0058 N	0,0058 N
F_{Qc}	0,0 N	0,0 N	0,0 N	0,0 N
m_{GeGew}	50,00000 kg	-0,000059 N	-0,000059 N	-0,000059 N
$V_{\text{GeGewä}}$	0,006329 m ³	0,000057 N	0,000057 N	0,000057 N
ρ_{L4}	1,1600 kg/m ³	0,00012 N	0,00012 N	0,00012 N
g_2	9,808412620 m/s ²	-0,00058 N	-0,00058 N	-0,00058 N
F_{Std}	0,0 N	-0,0058 N	-0,0058 N	-0,0058 N
F_{Qd}	0,0 N	0,0 N	0,0 N	0,0 N
κ	$1000 \cdot 10^{-15} \text{ 1/Pa}$	$-100 \cdot 10^{-12}$ N	$-10 \cdot 10^{-12}$ N	$-1000 \cdot 10^{-15}$ N
p	98185,1 Pa	0,0 N	0,0 N	0,0 N
p_0	$101,325 \cdot 10^3 \text{ Pa}$			
α_v	$50,00 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$	$-200 \cdot 10^{-9}$ N	$-20 \cdot 10^{-9}$ N	$-2,0 \cdot 10^{-9}$ N
t	21,0000 °C	$-720 \cdot 10^{-9}$ N	$-72 \cdot 10^{-9}$ N	0,0 N
t_0	20,0 °C			
F_{St}	0,0 N	0,014 N	0,0018 N	0,00019 N
F_Q	0,0 N	0,0 N	0,0 N	0,0 N
Z	0,0 N	0,0012 N	0,00012 N	$58 \cdot 10^{-6}$ N
Ergebnis	Wert	1961,396 N	196,140 N	19,614 N
	Standardabweichung	0,020 N	0,0133 N	0,0131 N
Bei k= 2	relative erw. Messunsicherheit	$\pm 2,0 \cdot 10^{-5}$	$\pm 2,0 \cdot 10^{-5}$	$\pm 2,0 \cdot 10^{-5}$
	erweiterte Messunsicherheit	$\pm 0,040$ N	$\pm 0,0039$ N	$\pm 0,00040$ N

Tabelle 6: Ergebnisse relativer Messunsicherheiten über die Lastbereiche von 2 kN bis 20 N mit leichtem Gehänge (blaue Kennzeichnung)

Schafft man konstruktiv unterschiedliche Ausführungsformen der bewegten Teile der Waagenkonstruktion, ist eine Einhaltung der Grenzbereiche möglich. Berücksichtigt man noch zusätzlich entstandene Störgrößen durch die Konstruktion der Waage, ist die maximal erlaubte Störgröße $F_{St} = 14 \text{ mN}$ für den Anlagenteil größer 2 kN und $F_{St} = 0,19 \text{ mN}$ für den Anlagenteil bis 2 kN-Last ausreichend um die Vorgaben auch bei

Messanlagengestaltung

Ausschöpfung der gesamten Bandbreite der Umgebungseinflüsse einzuhalten (Ergebnisse aus Tabelle 5 und Tabelle 6). In Masse ausgedrückt bedeutet das, dass bei einer 200 kN-Kraftanlage die maximale Abweichung in der Masse von etwa 1,4 g und bei einer 2 kN-Anlage in der Masse von 19 mg nicht überschritten werden darf. Für die Messunsicherheitsbetrachtung über den Messbereich heißt das, dass sich die relative erweiterte Messunsicherheit im unteren Messbereich dem erlaubten Grenzwert $W = 2 \cdot 10^{-5}$ annähert, wobei im oberen Messbereich der zu erwartende Wert für die relative erweiterte Messunsicherheit bei einer Größenordnung von $W = 2 \cdot 10^{-6}$ liegt.

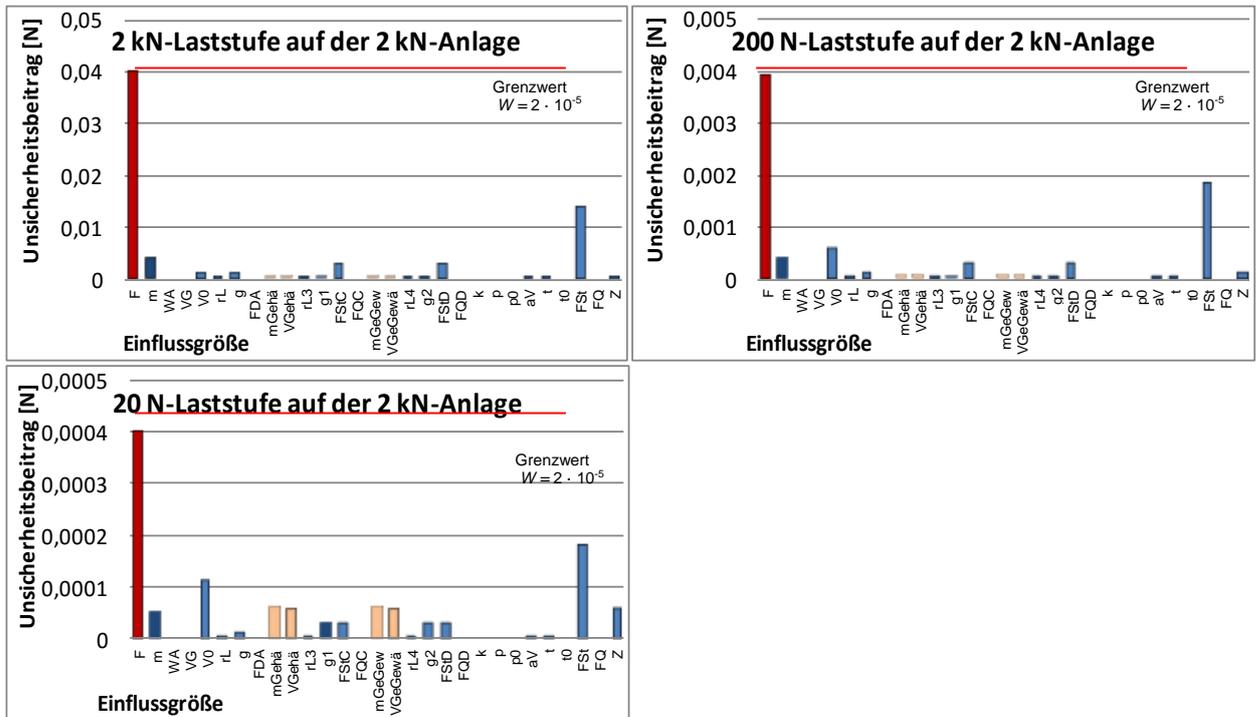


Abbildung 16: Vergleich der Unsicherheitsbeiträge kleiner Laststufen unter 2 kN mit der zulässigen relativen erweiterten Unsicherheit von $W = 2 \cdot 10^{-5}$ (rote Säulen)

4.4 Deformationsauswirkung

Eine axiale Belastung bedeutet in Kraftmaschinen eine Längenänderung im Gehänge und somit eine Positionsänderung der Massen einerseits und des Transfornormals andererseits. Bei herkömmlichen Standard-Totlastkraftanlagen, wie sie für Kalibrierlabors von der Industrie hergestellt werden, spielen solche Längenänderungen aufgrund der Einfachheit der Konstruktion keine Rolle, sofern die Deformation des Kraftsensors nicht zu groß ist. Hier werden in der Regel sogenannte Kettenstapel verwendet, deren Position im Gehäuse nebensächlich ist. Das bewährte Konzept und die einfache Konstruktion sind zwar von Vorteil, aber diese Totlastkraftanlagen sind sehr beschränkt in ihrem Messbereich und gänzlich an normkonforme Kraftstufen der Kraftsensoren gebunden.

Da hier ein derart eingeschränkter Messbereich nicht in Frage kommt, ist eine Sonderlösung anzustreben. Wie in Abbildung 14 schon gezeigt, wird bei der Kraftmessung eigentlich die Längenänderung ΔL des Kraftsensors unter der Kraft bestimmt. Das heißt, die Deformation des kraftbeaufschlagten Kraftsensors ergibt zwangsläufig eine Positionsveränderung des Gehängesystem Δl in der Totlastkraftanlage.

Messanlagengestaltung

Geht man von Δl aus, ergibt sich ein Auslenkungswinkel φ des Waagensystems nach $\sin \varphi = \frac{\Delta l}{l}$ mit l der halben Balkenlänge, wobei sich dann in Abhängigkeit des Winkels eine Rückstellkraft

$$F_R = F \cdot \sin \varphi$$

einstellt. Betrachtet man vereinfacht das System mit der Auslenkung φ über die Momentengleichung, ergibt sich in der Drehachse des Systems mit $\sum M = 0$ für den vertikal umgerechneten Rückstellkraftanteil F_{Rv} aus der Rückstellkraft F_R

$$F_{Rv} = \frac{F_R \cdot r}{l}$$

wobei alle weiteren Kräfte für diese Abschätzung außer Acht gelassen wurden. In der Messunsicherheitsbetrachtung kann diese zusätzliche Kraft F_{Rv} nur bedingt beachtet werden. Da sie systematischer Natur ist, ist die Ursache für die Störkraft entsprechend den Vorgaben des GUM zu beseitigen.

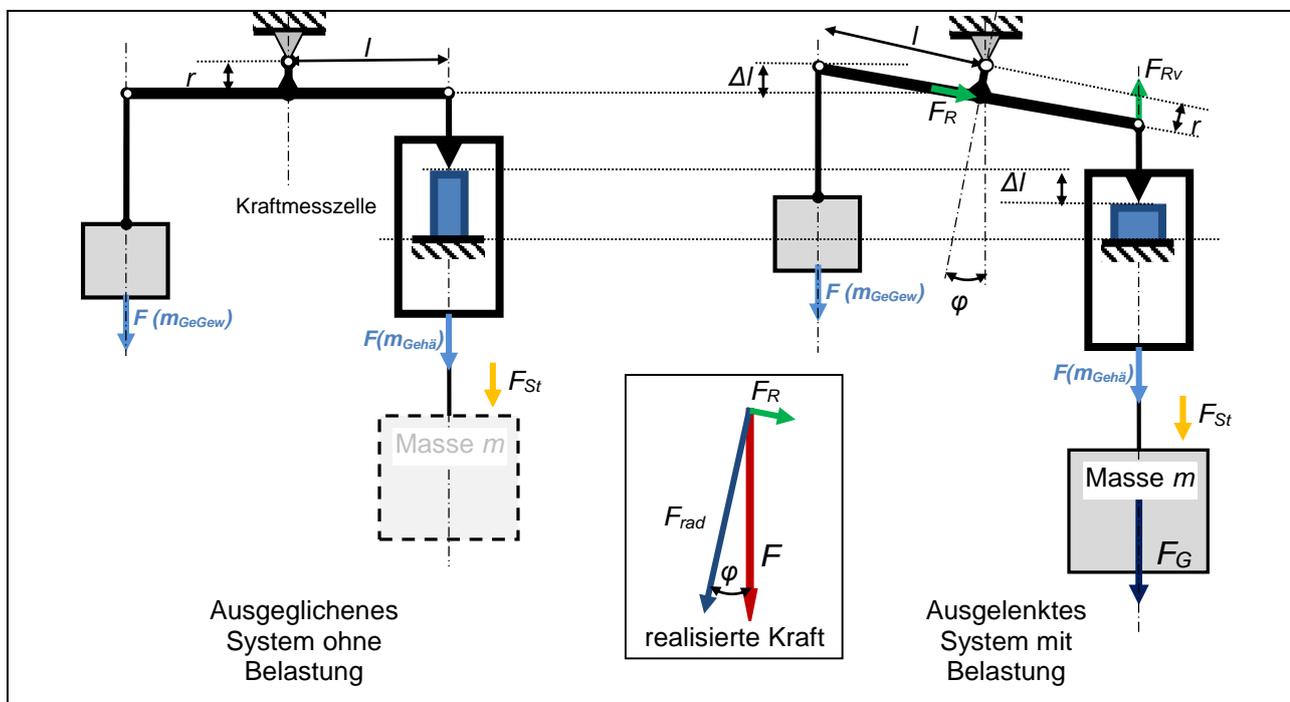


Abbildung 17: Prinzip der Rückstellkraft einer Totlastanlage mit Kompensation der Gehängemasse durch die Sensordeformation

Die in Tabelle 7 angenommenen Werte entsprechen größenordnungsmäßig realistischen Annahmen der Abmaße einer entsprechenden Waagenkonstruktion. Erfahrungsgemäß betragen Deformationen von Kraftsensoren je nach Bauart unter Volllast 2 mm bis 5 mm. Betrachtet man nun die Größenordnungen der Rückstellkräfte in vertikaler Richtung (F_{Rv} ist ein Teil von F_{St}) aus Tabelle 7 (900 mN und 90 mN) und vergleicht diese mit dem Ergebnis der zulässigen Störkräfte F_{St} in Kapitel 4.3 (14 mN und 0,19 mN bei der 200kN-Anlage bzw. bei der 2 kN-Anlage), so zeigt sich die offensichtliche Notwendigkeit, die Deformation des Kraftsensors systematisch zu kompensieren.

Messanlagengestaltung

Masse Gehänge [kg]	resultierende Kraft F [N]	Deformation/Auslenkung Δl [mm]	Auslenkwinkel φ [°]	Abstand Drehpunkt r [mm]	relevante Balkenlänge l [mm]	Rückstellkraft F_R [N]	Achsen-Drehmoment M [Nm]	Vertikale Rückstellkraft F_{Rv} [mN]
1000	10000	3	0,1719	3	1000	30	0,900	900
50	500	3	0,1719	3	500	1,5	0,045	90

Tabelle 7: Beispielhafte Rückstellkräfte zweier Waagebalkenpositionen mit einer angenommenen Auslenkung von 3 mm

Diese Erkenntnis belegt, dass eine Erweiterung des Messbereiches durch Kompensation der Massen nur möglich ist, wenn nicht nur die Masse des Waagegehänges selbst kompensiert wird, sondern jegliche Bewegung dieses Gehänges gleichzeitig verhindert wird. Vertikale Bewegungen im System werden durch Längenänderungen infolge von mechanischen Kräften oder auch infolge von Temperaturänderungen hervorgerufen. Da durch das Verfahren der Bestimmung der Deformation von Kraftsensoren eine Bewegung im System während der Kraftrealisierung unumgänglich ist, muss konstruktiv eine Lösung vorgesehen werden, die dieser Bewegung entgegensteuert bzw. diese unmittelbar bei Auftreten kompensiert. Eine derartige Lösung wäre z.B. über gesteuerte Achsen möglich. Auf Erfahrungswerte mit bestehenden Kraftanlagen kann hier nicht zurückgegriffen werden, da eine derartige Lösung nach derzeitigem Wissenstand noch nicht umgesetzt worden ist. Konstruktiv rudimentäre Ansätze bei einzelnen, im Messbereich vergleichbaren Anlagen die Eigenmasse von Gehänge oder Gehängeteilen durch entsprechende Gegengewichtssysteme zu vermindern, werden offensichtlich aus dieser Problematik der Positionsveränderung heraus und der damit in der Praxis schwer kalkulierbaren Rückstellkraft nicht eingesetzt. Realisierte Vorrichtungen wurden zwar erprobt, werden aber für Routinemessungen von den Verwendern nicht eingesetzt.

4.5 Voraussetzung eines primären Kraftnormalanlagesystems

Das BEV besitzt und verwendet unter anderem für Kundenkalibrierungen eine größere Anzahl von Krafttransfornormalen und Kraftmessgeräten, die einer regelmäßigen Kalibrierung als Bezugs- bzw. Arbeitsnormale bedürfen. Der Messbereich dieser Krafttransfornormale spiegelt den Bedarf der österreichischen Kunden wider und bewegt sich in einen Bereich bis 5 MN, vorwiegend aber bis zu einer Kraft von 250 kN. Zur weiteren Unterscheidung werden Anlagen nach ihrer maximal realisierbaren Laststufe bezeichnet. Aus Altbeständen verfügt das BEV über zwei hydraulische Pressen bis 5 MN, deren Revitalisierung auch im internationalen Vergleich als wirtschaftlich und technisch sinnvoll erscheint. Es wurde daher als Messbereich der Bereich bis 250 kN für die Schaffung eines primären Kraftbezugnormals mit einer Erweiterung bis 5 MN gewählt bzw. festgelegt. Um eine durchgängige Kalibrierung von Kraftmessgeräten zu ermöglichen, sind Anlagen zur Realisierung der Kraft möglichst mit überlappenden Kraftbereichen auszuwählen. Als unterer Grenzbereich der Kraftskala wurde 5 N definiert, da im Kraftlabor des BEV bereits eine Totlastanlage bis 10 N zur Verfügung steht (Realisierung der Kraft von 1 μ N bis 10 N [5], [27]).

Als ein Grenzwert für die angestrebte Genauigkeit und Ausführung bzw. für die zu erreichende relative Unsicherheit wurde über den Messbereich des Kraftnormalanlagesystems bis 250 kN von höchstens $2 \cdot 10^{-5}$ festgelegt, für den erweiterten Bereich bis 5 MN höchstens $2 \cdot 10^{-4}$. Diese Grenzwerte sind metrologisch

Messanlagengestaltung

anerkannte Grenzwerte für Totlast-Kraftnormalanlagen und angeschlossene Applikationen unterschiedlicher Bauart, die in der Lage sind, Kraftmessgeräte der höchsten Genauigkeitsklasse (00) zu kalibrieren [4],[28].

Der für die gesamte Anlage zur Verfügung stehende Platz ergibt sich aus den Abmessungen des Laborraums. Die Grundfläche ist 68 m² bei einer Raumhöhe von 7 m. In der Fundamentplatte wurden drei Vertiefungen bzw. Aussparungen zur Aufnahme von Anlagenteilen vorgesehen. Der Laborraum ist als eigenständige, entkoppelte Halle zwischen den baulichen Möglichkeiten der benachbarten Laborgebäude ausgeführt; eine Erweiterungsmöglichkeit gibt es nicht.

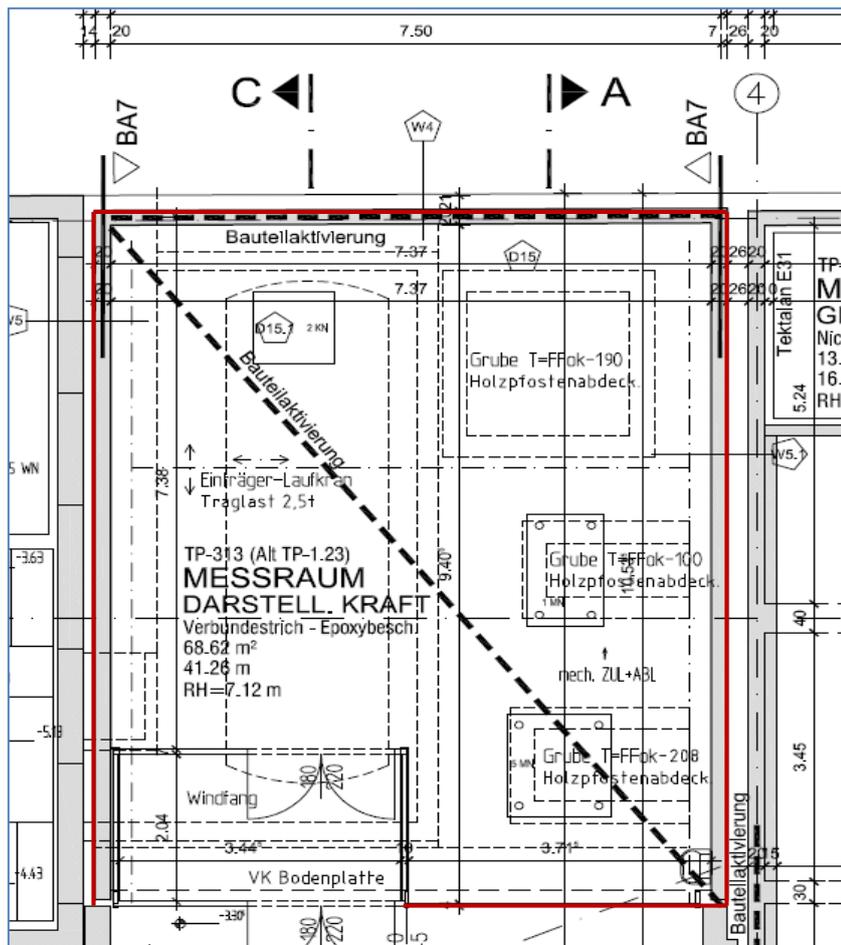


Abbildung 18: Auszug Bauplan BEV, Krafthalle mit Abmaßen

Aus den allgemeinen Überlegungen der Bedarfsanalyse, den Vorgaben des BEV, dem Vergleich mit dem Stand der Technik und den zur Verfügung stehenden Methoden sowie den Schlussfolgerungen aus der Messunsicherheitsbetrachtung seien hier die Eckpunkte der notwendigen Anforderungen zusammengefasst.

Zu realisieren ist ein:

- System aus primären Totlast-Kraftnormalanlagen mit einem mechanischen Messbereich: 5 N bis 250 kN,
- Kraftrichtung: Zug und Druck,
- geforderte relative Unsicherheit: kleiner $2 \cdot 10^{-5}$,
- Summe der auftretenden Störkräfte gegen Null gehend,
- verfügbare Grundfläche: Totlastanlagensystem 5 m x 10 m; Höhe 9 m.

Messanlagengestaltung

Im Vergleich mit dem Stand der Technik und den zur Verfügung stehenden bekannten Mitteln sind Lösungen zur Umsetzung für nachfolgende Punkte abzuleiten bzw. zu entwickeln:

- Möglichkeit der Realisierung des Messbereiches in zwei Teilbereichen (Teilung bei 2 kN) zur Reduktion des Platzbedarfes; 5 N bis 2 kN und von etwa 50 N bis 250 kN,
- Kompensation des Eigengewichtes aller bewegten Teile zur Vervielfachung des Messbereiches,
- Kompensation jeder verfahrensbedingten Verformung zur Steigerung der Messgenauigkeit,
- zur Reduktion des Platzbedarfes: Möglichkeit Zug- und Druckmessungen im selben Arbeitsbereich der Kraftmaschine zu realisieren,
- Ermöglichung wiederkehrender Kalibrierungen der Massescheiben zur Reduktion der Messunsicherheit,
- Optimierung der Möglichkeiten zur Steuerung der Aufrechterhaltung der Kraft während der Änderung der Laststufen zur Erweiterung des Messbereiches,
- die reibungsarme Lagerung bewegter Teile zur Realisierung des gesamten Messbereiches,
- die Sicherstellung ausgeglichener Materialdichteverhältnisse in allen bewegten Teilen,
- Umsetzung einer nahezu reibungsfreien Schwingungsdämpfung in Krafrichtung.

Als Zusammenfassung der Analyse bezüglich Entstehung von Einflüssen auf die Messunsicherheit und deren anteilmäßige Verschiebung bei unterschiedlichen Belastungen sowie deren größenmäßige Anteile an der Gesamtmessunsicherheit jeder Laststufe lassen sich alle Einflussfaktoren auf eine Kernfunktion für die Konzeptionierung und für die Konstruktion zusammenführen:

Jede Bewegung oder Zustandsgrößenänderung während der Messung ist im gesamten System zu verhindern. Dazu ist festzuhalten, dass jede Zustandsgrößenänderung im Gesamtsystem vice versa eine Bewegung im bewegten System auslöst.

Mit dem Ziele der Konzeptionierung werden im Anhang 9.2 Detailanforderungen zusammengefasst wie sie für das kooperative Projekt mit dem IFT vorgesehen wurden. Es erfolgt eine Ausarbeitung der Anforderungen aus messtechnischer und konstruktiver Sicht, sowie eine Formulierung von Anforderungen aus Vorgaben von Erfahrungswerten von anderen Kraftmaschinen und weiterer Vorgaben aus Rahmenbedingungen des Auftraggebers. Darin beschrieben sind die:

Anforderungen an die Konstruktion:

- **Arbeitsraum,**
- **Trägerkonstruktion** (Aufstellung, Durchbiegung, Steifigkeit, Verformung durch Kräfte, Schwingungsdämpfung, Verformung durch Temperaturänderung, Wärmeabfuhr),
- **Dimensionierung der Tragkonstruktion für Gewichte (Gehänge)** (Wahl des Hubes, Messbereichsumfang, Dimensionierung der Gewichtsaufnahmekonstruktion, Leergewichtskompensation der Gewichtsaufnahme, Messbereichsumfang, Wahl des Kraftbereiches),
- **Krafteinleitung und Kraftschluss zwischen Kraftaufnehmer und Maschine** (Einspannung der Kraftnormale, nicht planparallele Auflageflächen, Momentbeaufschlagung, Exzentrizität der Krafteinbringung, ungleichmäßige Belastung, Verformung, Querhaupt),
- **Krafthaltung** (Koppelemente),
- **Gewichte** (Ansteuerung der Gewichte, Auswahl der Gewichte, Einzelaufnahme und Einzelansteuerung, Zentrierung (zentrische Krafteinleitung in Trägerkonstruktion),

Messanlagengestaltung

Justierbarkeit),

- **Steuerungstechnische Einrichtungen** (Korrektur der Verformung, Schwingungen, Überprüfung der Sensorik: Position, Pendeln / Schrägstellung),
- **Sicherheitseinrichtungen** (Auffangvorrichtung und erhöhte Sicherheit bei Auflagen und Gehänge, Gefahr durch schwere Gewichte, Ausfall, Erkennungseinrichtung),

Anforderung Verfahrenstechnik:

- **Temperaturänderung durch Betrieb,**
- **Konvektionsströmungen / parasitäre Kräfte,**
- **Nullpunkt,**
- **Kriechverhalten,**
- **Pendelbewegung oder Schwingungen,**
- **Reibung,**
- **Krafthaltung und Konstanz der Krafthaltung** (Konstanz, Kraftverlauf),
- **Störfelder** (magnetische Felder, elektrostatische Aufladung),
- **Fallbeschleunigung der Erde (Erdbeschleunigung)** (Erdbeschleunigung, Höhenkorrektur der Erdbeschleunigung, Gravitation der Massen),
- **Verfahrenstechnische Dimensionierung der Trägerkonstruktion** (Referenzsensoren, Dimensionierung der Gewichtsaufnahmekonstruktion, Leergewichtskompensation der Gewichtsaufnahme, Waagenkonstruktion),
- **Gewichte** (Manipulation der Massescheiben, Verfahren der Massescheiben),

Maschineninterne Reaktion der Kraftaufbringung:

- **Verformung durch Krafteinleitung, Durchbiegung,**
- **Temperaturänderung durch Betrieb,**
- **Querkräfte durch Kraftschluss zu Kraftaufnehmer,**
- **Kraftaufnehmer,**
- **Nullpunktabweichung und Vorlast,**
- **Ausführung Kraftsensor,**
- **Anzeigegerät Vorspannung,**
- **Temperatureinfluss Maschine,**
- **Einspannteile,**
- **Abweichungen zu Vorkalibrierungen,**

Umgebungsbedingungen:

- **Gewichte** (Nominalwerte und Massen, Luftauftrieb Massen, Eigenschaften Massen, Wasserhaut der Massen, Verschmutzung der Massen),
- **Bediener** (Messablauf, Datenaufzeichnung, Programmbedienung, Programmoberfläche, Programmeingabe, Programmhilfe, Datenspeicherung und Aufzeichnung, Wartung),
- **Fallbeschleunigung der Erde (Erdschwere)** (Gezeiten).

4.6 Konzeptionierung eines Kraftnormalanlagensystems

Den Voraussetzungen folgend ist zu beachten, dass das gesamte Anlagensystem auf einer Grundfläche von maximal nur 50 m² unterzubringen ist, wobei alle notwendigen Hilfsapparaturen ebenfalls auf dieser Fläche Platz finden müssen.

Wie bereits beschrieben, liegt der Grund für diese Entscheidung einerseits in wirtschaftlichen Überlegungen und andererseits darin, dass eine Abdeckung der Kalibriermöglichkeit für einen Großteil der Kraftmessgeräte (TransfERNormale) des BEVs zu gewährleisten ist. Da der verfügbare Platz trotz Laborneubau begrenzt war und ein Kraftnormalanlagensystem von maximal vier mittelgroßen Maschinen inklusive der zwei bestehenden hydraulischen Kraftmaschinen zuließ, wurde der mechanische Kraftbereich in nur zwei Messbereiche unterteilt. Der erste Anlagenteil, eine Totlastanlage, hat den Kraftbereich 5 N bis 2 kN in Schritten von 0,5 N zu übernehmen, der zweite Teil, ebenfalls eine Totlastanlage, hat überlappend mit dem ersten Teil Kräfte von 50 N bis 250 kN zu realisieren.

Ein derart großer Messbereich ist für Normalmessanlagen einzigartig. Um die Baugröße zu reduzieren, ist die kleinere Totlastkraftanlage bis 2 N so konzipiert, dass bei der Realisierung des Kraftbereiches beim Wechsel der Krafrichtung zwischen Druck und Zug keine Veränderungen in der Einspannung des TransfERNormals vorgenommen werden müssen. Diese Einspann- und Messmöglichkeiten sind ebenfalls ein völlig neuer Ansatz. Diese Möglichkeit kontinuierlich über den Nullpunkt zu messen, sollte auch eine Untersuchung der Hysterese im Nullpunkt garantieren.

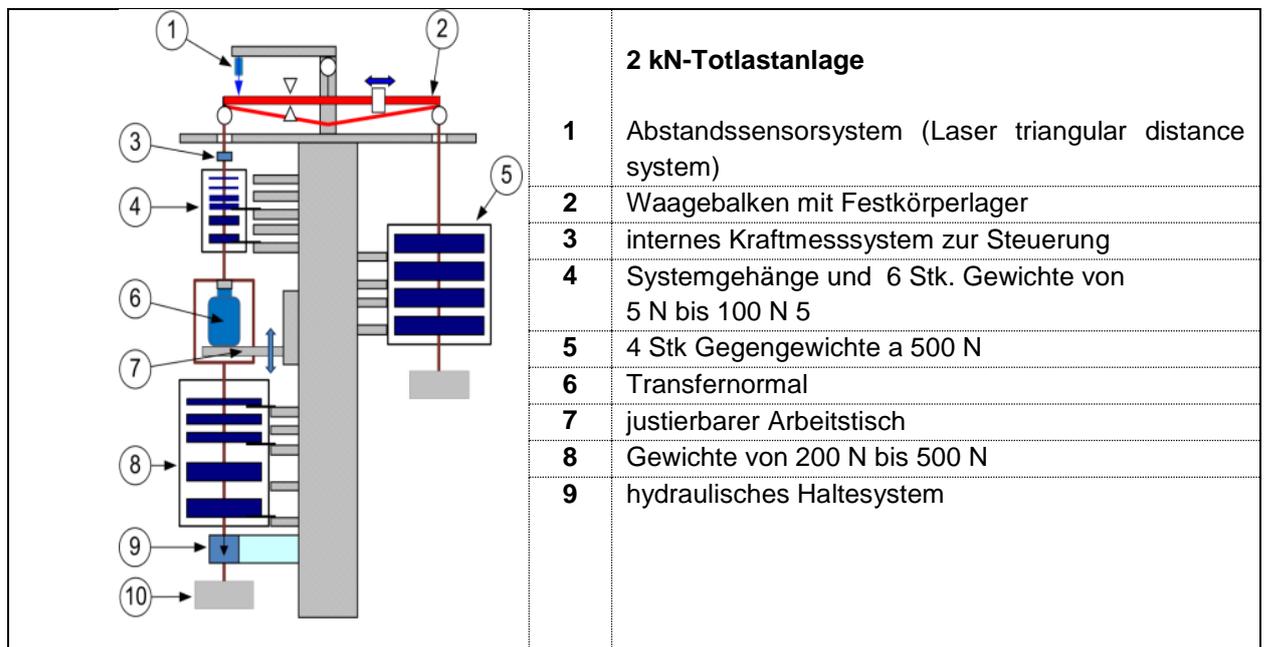


Abbildung 19: Konzept der 2 kN-Totlastanlage [35]

Die Einspannmöglichkeiten der Kraftsensoren bei der Kraftanlage bis 250 kN soll auf herkömmliche Art (Zug- und Druckbereich getrennt) erfolgen. Allerdings sollen die Messmöglichkeiten durch eine Auflösung der Kraftstufen über den gesamten Bereich von nur 50 N wesentlich erweitert werden. An diese Maschine sind die beiden bestehenden hydraulischen Pressen des BEVs über ein hydraulisches Koppelsystem angeschlossen. Eine weitere Vorgabe an das System war, die Konstruktion aller Anlagenteile so auszuführen, dass nicht nur die obligate, wiederkehrende Kalibrierung aller Sensoren

Messanlagengestaltung

möglich ist, sondern, entgegen der herkömmlich üblichen Bauweise von Kraftmaschinen für Kalibrierlabors, auch eine wiederkehrende Kalibrierung der Massescheiben gewährleistet wird.

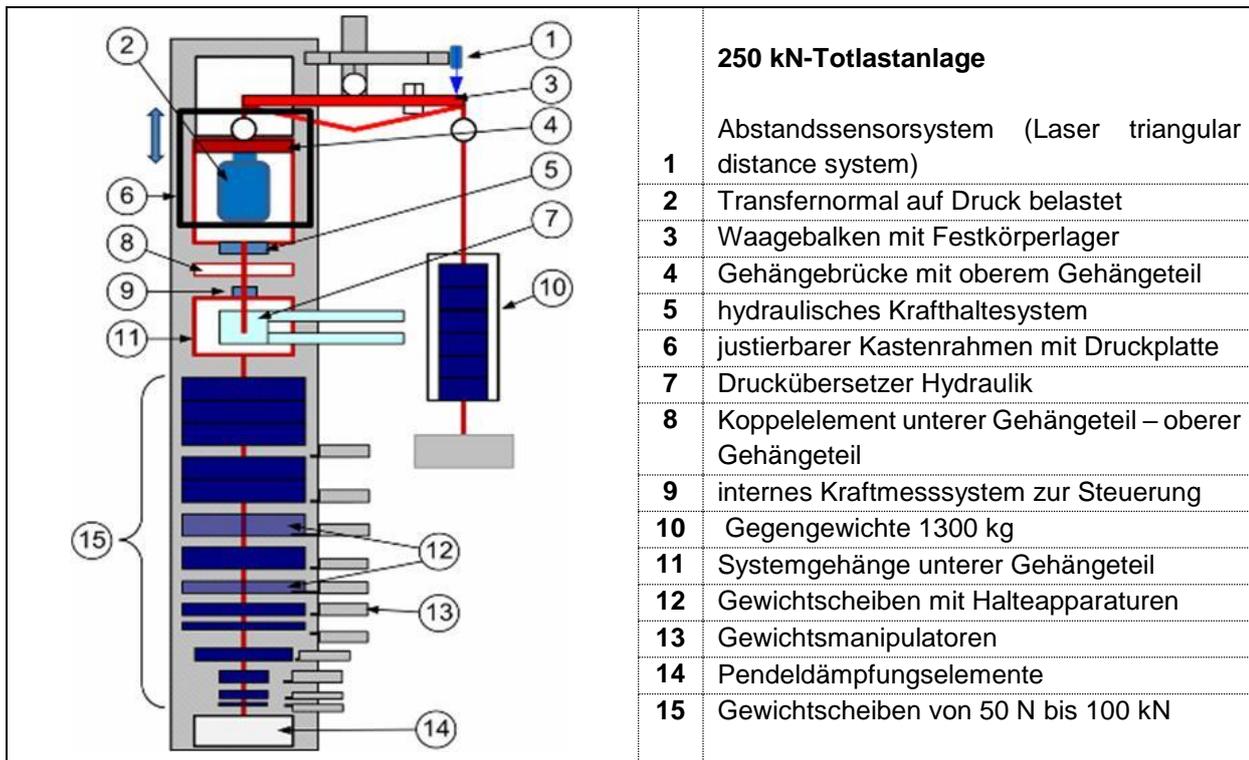


Abbildung 20: Konzept der 250 kN-Totlastanlage [35]

Durch das Konzept werden Bedingungen geschaffen, die nicht nur die Messmöglichkeiten einer solchen primären Kraftnormalanlage wesentlich erweitern, sondern ermöglichen Einflussfaktoren bzw. Störgrößen bei der Realisierung der Kraft zu eliminieren. Dadurch ist man in der Lage, auf normativ vorgeschriebene Korrekturfaktoren zu verzichten. Manche Punkte werden auch entgegen internationaler Gepflogenheiten umgesetzt, um gewisse Einflussfaktoren bei der Darstellung der Kraft zu vermeiden oder zu minimieren. Im Weiteren können mit diesem Konzept die Messmöglichkeiten einer derartigen Anlage im Rahmen der Darstellung der Kraft wesentlich erweitert werden.

Durch die Gewichtskompensation aller Gehängeteile und die spezielle reibungsarme Aufhängung des Waagebalkensystems lassen sich die Messbereiche von der Maximallast bis zu einer Minimallast, die nicht vom Aufnahmegehänge der Massen abhängig ist, zur Gänze ausschöpfen. Die mögliche Überlappung der Messbereiche (Laststufen) durch die messbereichserweiternde Maßnahme der Gewichtskompensation in Vergleich zu herkömmlichen Anlagen mit gleicher Maximallast (vergleiche Abbildung 1) ist in Abbildung 21 dargestellt. Dabei in Rot dargestellt der Messbereich der 2 kN-Totlastanlage und in Grün der Messbereich der 250 kN-Totlastanlage; die 1 MN und 5 MN Bereiche haben sich im Vergleich zu anderen Kraftnormalanlagen mit demselben Umfang nicht verändert.

Abbildung 21 visualisiert die Aufteilung des Messbereiches in die Kraftbereiche 5 N bis 2 kN und von 50 N bis 250 kN im Hintergrund (rote Punkte: 2 kN BEV und grüne Punkte: 250 kN BEV). Im unteren Bereich mit Quadraten gegenübergestellt ist jene Aufteilung des Messbereiches, wie sie von anderen Metrologieinstituten mit herkömmlichen

Messanlagengestaltung

Kraftanlagen realisiert wird (siehe auch die dargestellte Situation der PTB in Abbildung 1). Durch die Teilung des Messbereiches der beiden Maschinen bei 2 kN entsteht ein verhältnismäßig großer Überlappungsbereich, der für vergleichende Messungen von großem Vorteil ist.

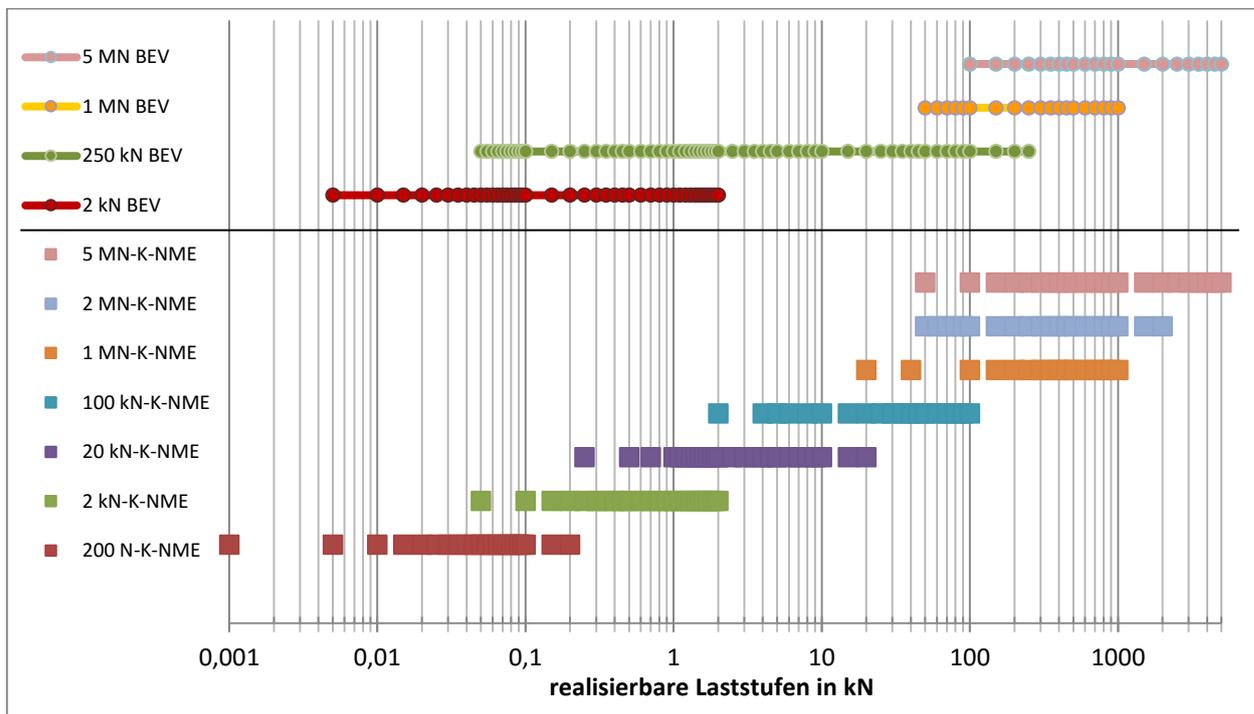


Abbildung 21: Messbereichsgegenüberstellung PTB – BEV

Bei Kraftmaschinen, deren Konstruktion auf die Verwendung von Kettenstapel oder auf eine ähnliche Technologien zurückgreift, ist man an einen fix vorgegebenen Ablauf der Massen gebunden. Dadurch entstehen je nach Auslegung der Massen in der Anlage „Löcher“ in der Durchgängigkeit der Darstellung des Messbereichs (siehe Abbildung 21). Diese „nicht darstellbaren Laststufen“ im durchgehenden Messbereich entsprechen der Auflösung der Kraftmaschine. Der Grund dafür ist die konstruktiv fehlende Möglichkeit eine bestimmte Laststufe zu realisieren. Sie sind ein Ergebnis der Abstimmung realisierbarer Laststufen einer Kraftmaschine aus normativen Vorgaben bei der Kraftmessung. Das bedeutet aber auch, dass nicht in gleichmäßig verteilten Lastschritten bzw. nicht in Schritten von der kleinsten realisierbaren Laststufe bis zum Maximalwert gemessen werden kann. Faktisch werden verschiedene Laststufen in vorgegebener Reihenfolge je nach Auslegung der Massescheiben zum Einsatz gebracht. Dagegen lässt sich bei den hier konzipierten Anlagen durch die Unabhängigkeit vom Eigengewicht des Waagengehänges und durch die Abstimmung der Massescheiben jede Laststufe kontinuierlich in Schritten der kleinsten Last realisieren (siehe Abbildung 21).

Durch den neuen Messablauf und den umfassenden Messbereich sind die angestrebten Grenzwerte der zu erreichenden Messunsicherheit von $2 \cdot 10^{-5}$ nur dann zu realisieren, wenn durch die Gewichtskompensation der Gehängemassen zusätzliche auftretende Störkräfte minimiert werden. Im Weiteren ist den durch die Kraftaufbringung und der dadurch resultierenden Deformation auftretenden Bewegungen durch verschiedene Systeme entgegenzuwirken um sie zu kompensieren (Deformationskorrektur). Bei der Umsetzung einer Deformationskorrektur ist auf Erkenntnisse aus dem Werkzeugmaschinenbau zu setzen.

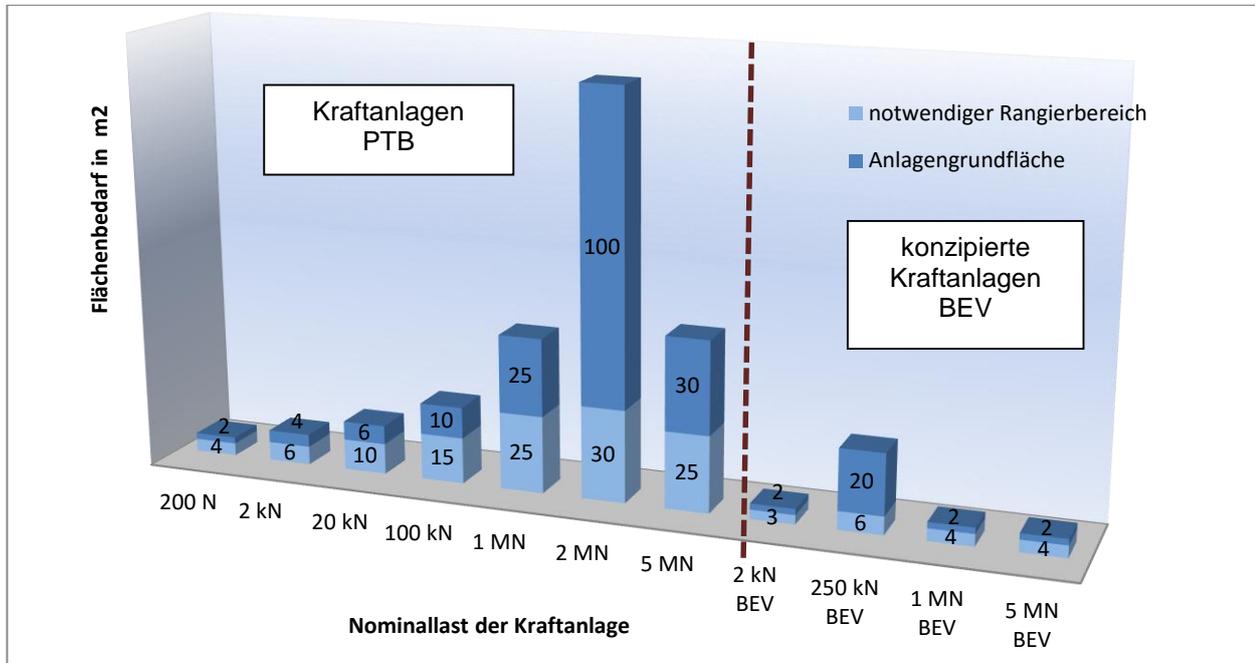


Abbildung 22: Gegenüberstellung des Platzbedarfs PTB und des konzipierten Bedarfs BEV

Das Gesamtkonzept und die räumliche Aufteilung sowie die Positionierung der Einzelkomponenten der Kraftnormalanlagen sind in Abbildung 33 zu sehen. Links im Vordergrund der Abbildung befindet sich die 2 kN-Totlastkraftanlage in Frontalansicht, mittig die 250 kN-Totlastkraftanlage umgeben von einer Arbeitsplattform und einer Hubarbeitsbühne. Diese Hubarbeitsbühne für den Betreiber auf der 250 kN-Totlastkraftanlage ist zur besseren und sicheren Bedienbarkeit der Anlage installiert worden. Mit der Totlastkraftanlage verbunden ist die 1MN hydraulische Maschine sowie die 5 MN Maschine (rechts im Bild).

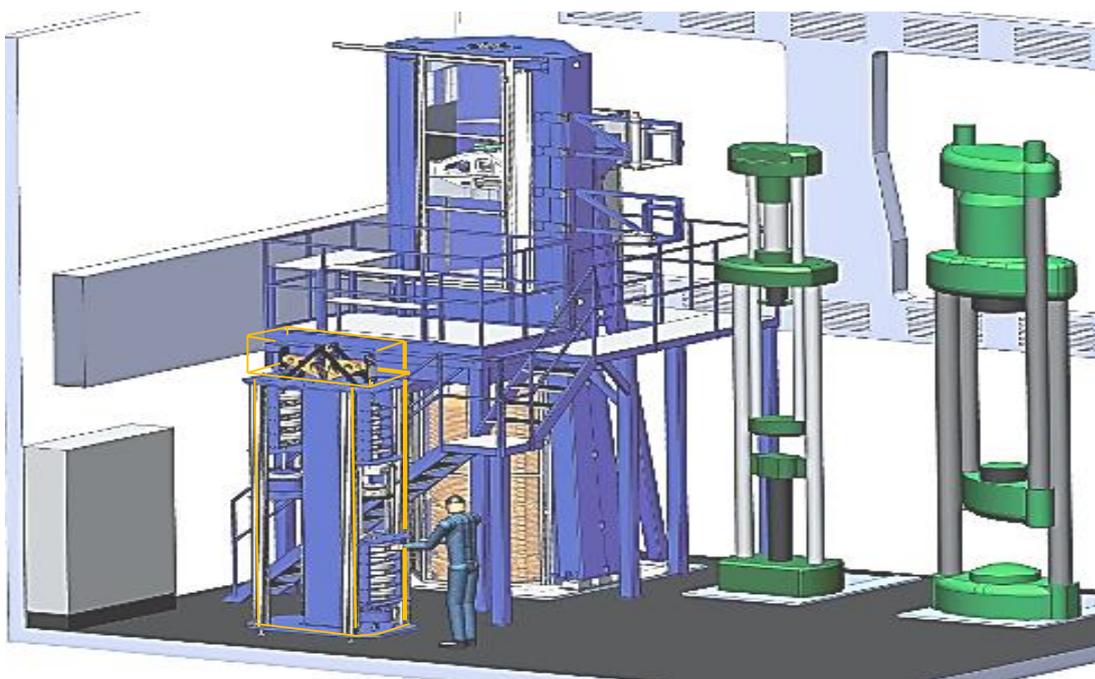


Abbildung 23: Konzeptübersicht und Positionierung der 2 kN- (im Vordergrund, oranger Rahmen) und der 250 kN-Totlastanlage (Mitte hinten, blau) mit den verbundenen hydraulischen Anlagen (grün) [37]

4.6.1 Innovatives Arbeitsprinzip der 2 kN-Totlastanlage

Zur Erfüllung der gesetzten Anforderungen wurde bei der 2 kN-Kraftanlage zur weiteren Reduktion des benötigten Platzes entgegen jeder herkömmlichen Bauweise von Kraftnormalmaschinen auf eine eigens entwickelte Lösung gesetzt. Aufgrund der Einzigartigkeit dieses Arbeitsprinzipes der 2 kN-Kraftanlage wird dieses hier im Detail betrachtet.

Eine spezielle Konstruktion von Massescheiben und Gegengewichtscheiben ermöglicht bei dem kleineren System eine ununterbrochene Realisierung der Kraft von 2 kN Druck bis 2 kN Zug in Schritten von nur 0,5 N. Die Konstruktion ähnelt einem Waagebalkensystem, bei dem sich auf der einen Seite Massescheiben zur Ableitung der Kraft befinden und auf der anderen Seite Gegengewichte mit gleichem Nominalwert sowie Gegengewichte zur Kompensation des Maschinengehänges mit den Einspannteilen. Alle Massescheiben sind in Form von Ringgewichten ausgeführt und haben Massen von 500 g bis 50 kg. Jede Massescheibe kann separat angesprochen und positioniert werden. Das ermöglicht uneingeschränkte Messmöglichkeiten in jedem Kraftbereich. Werden gleichzeitig Massescheiben und Gegengewichtscheiben verwendet, ist es möglich, auch den Nulldurchgang zwischen Druck- und Zugbereich abzudecken.

Dazu zeigt die Abbildung 24 schematisch das Arbeitsprinzip der 2 kN-Totlastanlage:

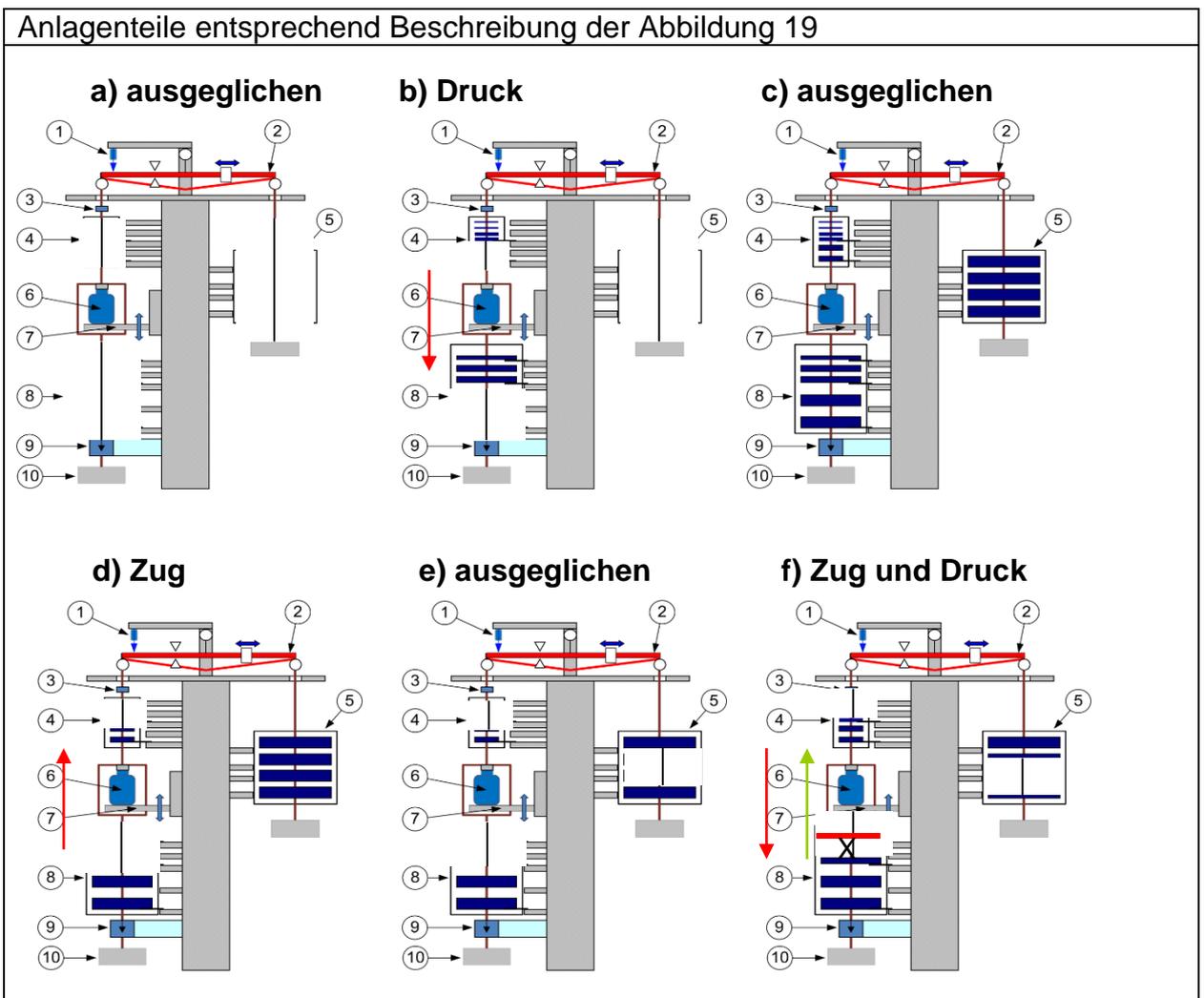


Abbildung 24: Arbeitsprinzip der 2 kN-Totlastkraftanlage

Messanlagengestaltung

- *Realisierung Druck 0 N bis 2 kN:*
 - a) Das TransfERNormal ist auf dem justierbaren Arbeitstisch befestigt und hat Kontakt zum Gehängesystem der Maschine. Das Waagensystem ist ausgeglichen (Stellgewichte) und in Nullposition. Keine Gewichtscheibe ist am Gehänge positioniert, es wird daher keine Kraft übertragen.
 - b) Gewichtscheiben werden auf der Arbeitsseite in das Gehänge eingeklinkt. Da vorerst keine zusätzlichen Kräfte entstehen, wird das Eigengewicht der Massen somit als Kraft in den Kraftsensor abgeleitet. Diese Kraft wird als Druckkraft auf das TransfERNormal realisiert (roter Pfeil).
- *Realisierung Zug 0 N bis 2 kN:*
 - c) Auf beiden Seiten des Waagensystems sind alle Gewichtscheiben (je 2000 N) in das Gehängesystem bzw. Balkensystem eingeklinkt. Das Waagensystem ist hiermit ausgeglichen und in Nullposition. Die Kraft, die in Summe auf das TransfERNormal ausgeübt wird, ist 0.
 - d) Gewichtscheiben werden nun von der Arbeitsseite des Systems abgehoben. Da vorerst keine zusätzlichen Kräfte entstehen, wird das fehlende Eigengewicht der Massen somit als Kraft in den verbundenen Kraftsensor abgeleitet. Diese Kraft wird auf das TransfERNormal als Zugkraft realisiert (roter Pfeil).
- *Realisierung Zug 1 kN (-1kN) bis Druck 1 kN:*
 - e) Auf beiden Seiten des Waagensystems sind je 1000 N in Gewichtscheiben (1000 N links und 1000 N rechts) in den Gehängesystemen positioniert. Das Waagensystem ist in der ausgeglichenen Position gehalten und in Nullposition; die Kraft auf das TransfERNormal ist 0.
 - f) Werden Gewichtscheiben auf der Arbeitsseite wahlweise eingeklinkt oder ausgeklinkt (bis zu 1000 N), kann analog zur vorher beschriebenen Arbeitsweise kontinuierlich Zug und Druck ohne Unterbrechung realisiert werden (roter und grüner Pfeil).

Unter Verwendung der oben beschriebenen Gewichte ist es möglich, den kompletten Messbereich in 5 N Schritten zu durchfahren. Das hydraulische Hebesystem setzt separat jedes Gewicht auf den Gewichtshalter. Während der Veränderung der Masselasten werden zur konstanten Kraftübertragung auf das TransfERNormal Teile entkoppelt, wobei die Kraft auf das Normal hydraulisch konstant gehalten werden kann. Das garantiert bei jedem Lastwechsel einen homogenen und fließenden Kraftanstieg oder eine Kraftreduzierung auf das TransfERNormal innerhalb eines Toleranzbereiches.

Die Einspannung des TransfERNormals erfolgt bei Druck direkt über Kugelscheiben und bei Zug über herkömmliche Zug-Einspannteile, über Kugelstücke oder Gelenkaugen. Werden Zug-Druck-Messungen vorgenommen, wird das TransfERNormal direkt über arretierbare Spannkugeln form- und kraftschlüssig mit den Druckplatten der Maschine verbunden (siehe auch Kapitel 6.1.2). Die Nullpunktfindung und die Kompensation der Deformation erfolgt analog zu Kapitel 6.2.1.

4.6.2 Gewichtskompensation der Tragekonstruktion

Unter der Bedingung, dass der störkräftemäßige Einfluss beherrscht wird, ist es bei Totlastanlagen möglich, Lasten (Kräfte) zu realisieren, die durch Massen (Massescheiben) erzeugt werden, die geringer sind als die Eigenmasse der die

Messanlagengestaltung

Gewichtscheiben tragenden Konstruktion. Das heißt, eine Gewichtskraft wird realisiert, die unter dem Eigengewicht der konstruktiv notwendigen Ausfertigung der Gewichtsaufnahme (Gehänge) der Massen liegt. Um Massen mit Gewichtskräften von 2 kN bzw. 250 kN aufnehmen zu können, ist eine Tragekonstruktion notwendig, deren Eigengewicht jeweils bei etwa 60 kg bzw. 1000 kg liegt. Dieses Eigengewicht der Tragekonstruktionen ergibt sich, bedingt durch die Verteilung der Massen und der daraus resultierenden Kraftverteilung, aus konstruktiver Sicht. Das bedeutet, dass ohne weitere Vorkehrungen die geringste realisierbare Last etwa bei 600 N bzw. 10 kN zu liegen kommt. Eine Kompensation dieses Eigengewichtes erfordert natürlich eine zusätzliche Konstruktion sowie eine Vervielfachung der notwendigen Massen durch die Gegengewichte. Weiters wird dadurch auch im Hinblick auf die Einflussgrößen bei der Messunsicherheitsbetrachtung eine Reihe zusätzlicher Einflussfaktoren wirksam. Auf der anderen Seite ist es erst durch die Kompensation des Tragekonstruktionsgewichtes möglich, den Messbereich entsprechend der Kompensation zu erweitern. Auf ähnlichem Weg wäre auch eine teilweise Kompensation und somit eine Verringerung des Eigengewichtes des Gehänges möglich. Der notwendige Aufwand für eine bloße Reduzierung wäre zwar etwas geringer als eine umfassende Kompensierung, wird aber im gegenständlichen Fall nicht in Betracht gezogen, da die damit verbundene Messbereichserweiterung nicht umfassend genug wäre.

In Gegenüberstellung der Nachteile einer Gewichtskompensation des Gehänges bringt diese aber den Vorteil, dass das gesamte Gehänge entsprechend der aufzunehmenden Lasten konzipiert werden kann. Das heißt, es sind keine Überlegungen aus konstruktiver Sicht zur Reduzierung des Eigengewichtes und somit der realisierbaren Minimallast in Bezug auf die Tragfähigkeit des Gehänges notwendig. Damit sind auch Lösungen gemeint, wie sie bei ähnlichen Anlagen öfter umgesetzt sind, wie z.B. die Unterteilung des Gehänges in einzelne Teilabschnitte, wobei die Eigenmasse von jedem Teil bereits eine Laststufe darstellt. Damit können auch die konstruktiven Probleme der Koppelung der Einzelteile vermieden werden. Es entfallen ebenfalls die obligatorischen Optimierungen und notwendigen Möglichkeiten zur Justage der Gehängeteile in Bezug auf das Eigengewicht. Dieses hat exakt in Relation zu den Nominalwerten der Laststufen zu stehen. Die einzige Problematik die sich bei diesem Ansatz, wie später in 5.2.1 gezeigt wird, ergibt, ist eine verhältnismäßig aufwendige Abstimmung der Materialdichte von Einzelteilen.

Abbildung 25 zeigt den Ausführungsansatz des Balkensystems zur Kompensation des Gehänges der 250 kN-Totlastanlage. Der Waagebalken ist über Festkörperlager (Biegelager) mit der Arbeitsbrücke auf der linken Seite und mit den Gegengewichten auf der rechten Seite verbunden, wobei die Lager so ausgeführt sind, dass bei einer Bewegung die axialen Positionen der beiden Seiten erhalten bleiben.

Die verwendeten Festkörperlager sind in Form von Dünnscheiben (Folien) ausgeführt, wobei die zu übertragenden Kräfte ausschließlich über Klemmung der Folienenden eingebracht werden. Bei Lagern, die rein radiale Bewegungen zu gewährleisten haben (Mittellager), sind die Längen der Folien zur Reduzierung einer störenden Querbewegung begrenzt und minimiert; dadurch wird die Drehachse besser definiert.

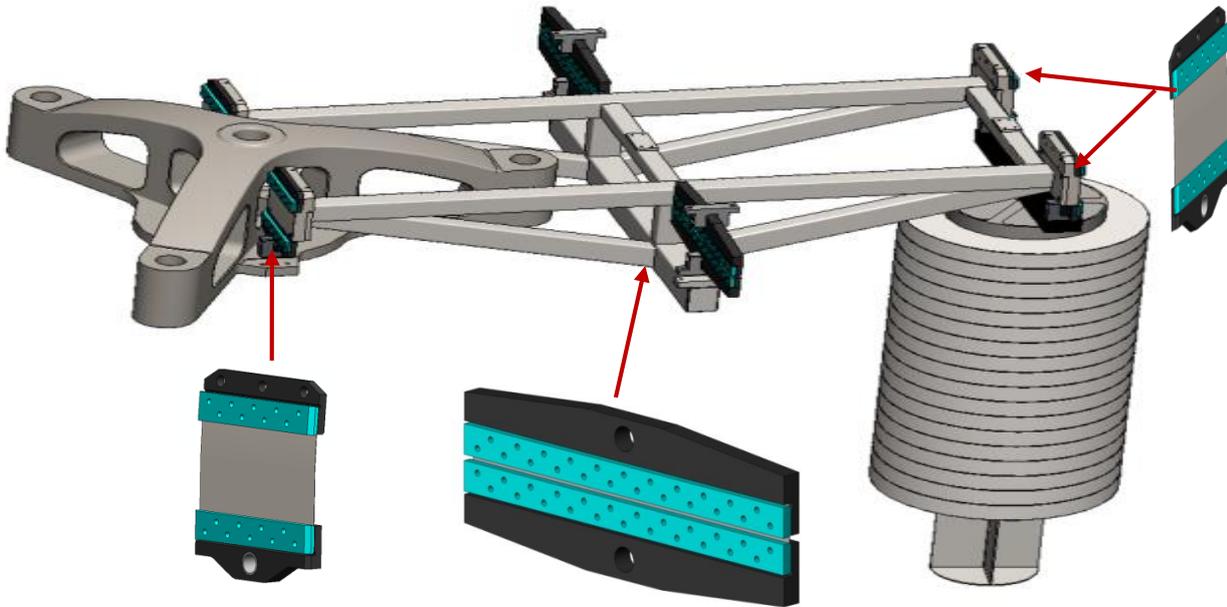


Abbildung 25: Kompensation Gehänge 250 kN-Anlage mit Festkörperlager auf Dünnsblechbasis [36]

Die Festkörperlager auf beiden Seiten des Waagebalkens müssen zusätzlich zu einer definierten axialen auch eine radiale Bewegung gewährleisten. Dazu bewegen sie sich selbst auf einer Kreisbahn. Die Folien werden über eine Zylinderfläche abgeleitet um die axiale, lineare Bewegung in der Lotrechten nicht zu beeinflussen. Der Mittelpunkt dieser Zylinderflächen entspricht exakt dem Drehmittelpunkt des Waagebalkens (analog der Ausführungsform einer Gestängetiefpumpe (Pferdekopfpumpe), siehe auch Abbildung 36). Die Anbindung der Biegelager erfolgt mittels zentralem Drehbolzen um ein selbstständiges Ausrichten der Biegelager zu ermöglichen.

5 Umsetzung eines Anlagensystems zur Realisierung der Kraft

Ausgehend von den definierten Anforderungen für eine Totlastkraftanlage wurde ein Grundkonzept für eine derartige Anlage erstellt, die den gesetzten Rahmenbedingungen gerecht wird. Bevor diese Konzeptionierung in eine Konstruktion übergeführt werden kann, sind vor allem jene gewählten Lösungsansätze im Detail zu verifizieren, die neuartig sind und bei denen man nicht in der Lage ist, auf Erfahrungswerte zurückzugreifen. Zu klären ist, ob diese Anforderungen erfüllt werden und damit im Umkehrschluss die definierten Anforderungen als ausreichend erachtet werden. Im Konkreten ist zu verifizieren, ob jene ausgearbeiteten Kernfunktionen aus der Analyse der Anforderungen an diese Totlastkraftanlage soweit erfüllt werden, dass die vorliegenden Rahmenbedingungen dadurch eingehalten werden. Sowohl in der Verifikation des Konzeptes als auch in der anschließenden Verifikation der umgesetzten Lösungen werden zuerst rechnerisch, dann messtechnisch, systematisch alle Faktoren dieser Anlage analysiert und erfasst, die Einfluss auf die Realisierung der Kraft haben. Als Kernteil der Arbeit wird dabei spezielles Augenmerk vor allem auf jene Methoden und Lösungen gelegt, die auf innovativen Ansätzen beruhen und somit eine Weiterentwicklung auf dem Gebiet der Kraftmessung darstellen.

5.1 Rückführung der Kraftrealisierung auf SI-Einheiten

Nach der zu Beginn der Arbeit erläuterten Definition spricht man von Rückführbarkeit, wenn die Eigenschaft von Messgrößen durch eine ununterbrochene Kette von Vergleichsmessungen mit angegebener Messunsicherheit auf nationale oder internationale Normale bezogen wird. Das bedeutet aber, dass nicht nur die Hauptkomponenten (Masse und Schwere) der Kraftrealisierung auf die nationalen Normale bezogen sein müssen, sondern es sind alle Messgrößen und Größen nach Kapitel 5.1 und Abbildung 13 auf anerkannte Normale zurückzuführen.

5.1.1 Rückführung auf die Masse

Grundlegende Informationen zum Thema Masse und Wägewert sind in [13], [39], [8] et alt. beschrieben. Aufgrund des Auftriebes, den bei jeder Wägung in Luft sowohl das Wägegut als auch die Gewichtstücke erfahren, besteht die Kräftegleichung:

$$m_G \cdot g - \rho_L \cdot V_G \cdot g = m \cdot g - \rho_L \cdot V \cdot g$$

wobei m_G die Masse der Gewichtstücke, g die Fallbeschleunigung, ρ_L die Luftdichte, V_G das Volumen der Gewichtstücke, sowie m und V Masse und Volumen des Wägeguts bedeuten.

Der bei der Wägung des Wägeguts erhaltene Wägewert W ist gleich der Masse der verwendeten Gewichtstücke, d.h. es ist $W = m_G$. Daher gilt die Beziehung:

$$W - \rho_L \cdot V_G = m - \rho_L \cdot V$$

Nur wenn das Volumen V des Wägeguts gleich dem Volumen der Gewichtstücke ist, haben Masse und Wägewert gleiche Werte. Ist das Volumen des Wägeguts, wie z.B. im

Verifizierung des Konzepts

Fall von Mineralölen, etwa zehnmal größer als das Volumen der entsprechenden Gewichtstücke, unterscheiden sich Wägewert und Masse um mehr als 0,1 %.

Bei Wägungen in Luft wird zumeist eine Gleichung verwendet, die die Dichte $\rho_G (= m_G / V_G)$ der Gewichtstücke und die Dichte ρ des Wägeguts enthält:

$$W \cdot \left(1 - \frac{\rho_L}{\rho_G}\right) = m \cdot \left(1 - \frac{\rho_L}{\rho}\right)$$

Um die Masse m des Wägeguts ermitteln zu können, müssen also außer dem Wägewert W auch die drei Dichten der Luft, der Gewichtstücke und des Wägegutes (ρ_L , ρ_G und ρ) bekannt sein.

In der Praxis dient als Wägewert W die Waagenanzeige. Um eine elektromagnetische Waage zu justieren, wird ein geeichtes Gewichtstück auf die Waage gelegt; dann bedeutet die Waagenanzeige W den konventionellen Wägewert und m_{kG} die konventionelle Masse des Gewichtstücks.

$$m_{kG} = m_G \cdot \frac{\left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_{G20}}\right)}{\left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_k}\right)}$$

ρ_0 : konventionelle Luftdichte, ρ_{G20} : Dichte des Gewichtstücks bei 20 °C, ρ_k : konventionelle Dichte. In diesem Fall muss in den benutzten Wägleichungen für ρ_G der Wert für die konventionelle Dichte eingesetzt werden. Mit der konventionellen Masse schafft man einen Vergleichswert für weitere Betrachtungen. Durch die Abhängigkeit von der Dichte bezieht man sich dabei auf eine fiktive Materialdichte (konventionelle Dichte) $\rho_k = 8000 \text{ kg/m}^3$ und eine fiktive Luftdichte (konventionelle Luftdichte) von $1,2 \text{ kg/m}^3$.

Die hierdurch bedingte Unsicherheit bei der Ermittlung des Ausdrucks $m \cdot (1 - \rho_L/\rho)$ ist für fast alle Anwendungen vernachlässigbar klein. Weichen die Luftdichte ρ_L von der Normluftdichte $\rho_0 = 1,2 \text{ kg/m}^3$ um einen Betrag $\Delta\rho_L$ der Luftdichte und die tatsächliche Dichte ρ_G der Gewichtstücke von der konventionellen Dichte $\rho_k = 8000 \text{ kg/m}^3$ um einen Betrag $\Delta\rho_G$ der Materialdichte ab, so entsteht ein Messfehler, behaftet mit der relativen Unsicherheit:

$$u = \frac{m_G \cdot \left(1 - \frac{\rho_L}{\rho_G}\right) - m_{kG} \cdot \left(1 - \frac{\rho_L}{\rho_k}\right)}{m_G \cdot \left(1 - \frac{\rho_L}{\rho_G}\right)}$$

oder näherungsweise

$$u = \Delta\rho_L \cdot \frac{\Delta\rho_G}{\rho_k^2}$$

Das heißt, weicht die Luftdichte ρ_L um 10 % von ρ_0 ab und beträgt $\Delta\rho_G$ bis zu $66,7 \text{ kg/m}^3$ (wie z.B. bei Gewichtstücken der Massen von 100 g bis 50 kg der Fehlergrenzenklasse E1 möglich), so erreicht die Unsicherheit u maximal nur $u = 1,25 \cdot 10^{-7}$, d.h. es entspricht einem Viertel der relativen Eichfehlergrenze der Gewichtstücke der Genauigkeitsklasse E1.

Alle Massescheiben werden über die Bestimmung des konventionellen Wägewerts und in weiterer Folge der Masse an den nationalen Etalon der Masse angeschlossen. Somit

Verifizierung des Konzepts

erfolgt die Rückführung auf den nationalen Ir-Pt-Prototypen der Masse Nr. 49. Massescheiben für einen Nominalwert von 1000 N bis 5000 N entsprechen einer Masse von mehr als 101,969 kg und werden daher mittels einer 600 kg Waage mit der Auflösung 0,01 g an Normalgewichtstücke bis 500 kg angeschlossen. Als 500 kg-Normal wird im BEV ein Set aus 25 Stück 20 kg Edelstahlgewichten der Genauigkeitsklasse E2 verwendet. Als Messverfahren werden für jede Gewichtsscheibe entsprechend OIML R111 [8] mehrere N-P-P-N (Normal-Prüfling-Prüfling-Normal) Zyklen durchgeführt und nach der Standardauswertung der konventionelle Wägewert bestimmt. Die erreichte Messunsicherheit der Masse ist in der Regel für jede 500 kg-Scheibe kleiner als 0,8 g mit $k=2$. Für Gewichtsscheiben mit einer Masse unter 50 kg werden entsprechende Massekomparatoren mit höherer Auflösung verwendet.

Zur Bestimmung der Masse der Gewichtsscheiben aus den Wägewerten und somit zur Bestimmung der Luftauftriebskorrektur ist die genaue Kenntnis des Volumens bzw. der Dichte der Gewichtsscheiben von Nöten. Die Dichtebestimmung wird in der Regel nach nachfolgender Abhandlung mittels hydrostatischer Wägung vorgenommen. Aufgrund der Größe der Gewichtsscheiben ist eine direkt hydrostatische Dichtebestimmung der Gewichtsscheiben nicht möglich. Da alle Gewichtsscheiben aus einer einzigen Stahlcharge produziert worden sind (alle Gewichtsscheiben wurde aus demselben Stahl geschmiedet), wurden fünf Stück Stahlproben (Stahlzylinder mit 60 mm Durchmesser und 500 g Masse) entnommen. Die Materialdichte dieser Stahlproben wurde hydrostatisch bestimmt. Nach [40] ist das Volumen eines Prüfkörpers:

$$V_P = \frac{\left[-W \cdot \left(1 - \frac{\rho_L}{\rho_K} \right) - m_G \cdot \frac{\left(1 - \frac{\rho_L}{\rho_K} \right)}{\left(1 - \frac{\rho_L}{\rho_G} \right)} + V_G \cdot \rho_L \right] \cdot \frac{g_g}{g_{Si}} + V_D \cdot \rho_L + W_L \cdot \left(1 - \frac{\rho_{LP}}{\rho_K} \right) + V_D \cdot \rho_{Fi}}{\rho_{Fi} - \rho_{LP}},$$

wobei sich aus der Wägleichung die Masse und die Festkörperdichte ergeben:

$$m_P = W_L \cdot \left(1 - \frac{\rho_{LP}}{\rho_K} \right) + \rho_{LP} \cdot V_P \quad \text{mit} \quad \rho = \frac{m_P}{V_P}.$$

Es ist dabei:

W_L : [kg] Wägewert des Prüflings in Luft, ρ_{LL} : [kg/m³] Luftdichte zum Zeitpunkt der Wägewertsbestimmung in Luft, ρ_{LF} : [kg/m³] Luftdichte zum Zeitpunkt der Wägewertsbestimmung in der Prüfflüssigkeit, ρ_K : konv. Dichte (Bezugsdichte) der Gewichtstücke 8000 kg/m³, ρ_{Fi} : [kg/m³] Dichte Prüfflüssigkeit, ρ : [kg/m³] Dichte des Festkörpers, m_P : [kg] Masse des Prüflings, V_P : [m³] Volumen des Prüflings, ρ_{LP} : [kg/m³] Luftdichte zum Zeitpunkt der Wägewertsbestimmung, V_{K0} : [m³] Volumen der Normal-Siliziumkugel V bei 20°C und 1013,25 mbar, V_G : [m³] Volumen der Gewichte, m_G : [kg] Masse des Gewichtes, W_G : [kg] Wägewert des Gewichtes, ρ_{Si} : [kg/m³] Dichte der Si-Kugel, ρ_G : [kg/m³] Dichte des Substitutionsgewichtes, γ_B : Oberflächenspannung der Bezugsflüssigkeit, γ_{Fi} : Oberflächenspannung der Messflüssigkeit, T_L : [°C] Temperatur der Luft, T : [°C] Temperatur der Prüfflüssigkeit, g_g : [m/s²] Erdbeschleunigung bei Gewicht, g_{Si} : [m/s²] Erdbeschleunigung bei Siliziumkugel, V_D : [m³] Volumen des Drahtsegmentes bei Drahtdehnung.

Verifizierung des Konzepts

Bezeichnung	Nennwert	Kennzeichnung	konventioneller Wägewert in [kg]	Masse in [kg]	Messunsicherheit U (k=2) in [g]	Volumen in [m ³]
Gew5	5 N	1	0,50984	0,50984	0,0016	0,000064537
Gew10	10 N	1	1,01969	1,01969	0,0021	0,000129074
Gew20	20 N	1	2,03937	2,03937	0,0036	0,000258149
Gew20	20 N	2	2,03937	2,03938	0,0029	0,000258149
Gew50	50 N	1	5,09841	5,09842	0,0044	0,000645370
Gew100	100 N	1	10,19686	10,19688	0,005	0,001290744
Gew200	200 N	1	20,39379	20,39383	0,044	0,002581497
Gew200	200 N	2	20,39380	20,39384	0,042	0,002581499
Gew500	500 N	1	50,98417	50,98426	0,052	0,006453704
Gew500	500 N	2	50,98428	50,98438	0,045	0,006453719
Gew500	500 N	3	50,98435	50,98444	0,048	0,006453727
Gew-500	500 N	Gegengewichtscheibe 1	50,98886	50,98895	0	0,006454298
Gew-500	500 N	Gegengewichtscheibe 2	50,99323	50,99332	0	0,006454851
Gew-500	500 N	Gegengewichtscheibe 3	50,97392	50,97401	0	0,006452407
Gew-500	500 N	Gegengewichtscheibe 4	50,94239	50,94249	0	0,006448416

Tabelle 8: Exemplarische Wägewerte, Massen und Volumina der Massescheiben 5 N bis 500 N-Nominalwerte der Kraftnormalanlage bis 2 kN mit Messunsicherheitsangabe der Masse

Eine Auswertung aller fünf Stahlproben ergab eine mittlere Stahldichte von 7920,25 kg/m³, wobei aufgrund von Vergleichsmessungen eine Gesamtunsicherheit auf die Stahldichte bei k=2 von 0,2 kg/m³ angenommen werden kann. Die Abschätzung der Messunsicherheit erfolgte dabei nach den Richtlinien des GUM [9].

Die Kalibrierwerte der konventionellen Wägewerte und Volumina (Dichtebestimmung) wurden entsprechend der Vorgaben bestimmt. Für die Gegengewichte wurde keine Messunsicherheit auf die Masse ermittelt, da sie während einer Messung in ihrem Zustand bzw. in der Position nicht verändert werden und somit keinen messtechnischen Direkteinfluss darstellen. Von Interesse ist bei der Änderung von Umgebungsbedingungen nur die Unsicherheit des Luftauftriebes und somit der Materialdichte. Die Berechnung der Unsicherheit des Volumens erfolgt erst bei der thermischen Volumenkorrektur.

Durch die Abhängigkeit des Volumens von Temperatur und Druck werden Dichteangaben immer für eine Bezugstemperatur von $t_0 = 20 \text{ °C}$ und für einen Normalbezugsdruck von 1013,25 mbar gemacht. Wird das Volumen bzw. die Dichte bei einer anderen Temperatur t ermittelt, kann sie gemäß der Beziehungen:

$$\rho(t) = \frac{m}{V(t)} \quad \rho(t_0) = \frac{m}{V(t_0)}$$

$$V(t) = V(t_0) \cdot [1 + \alpha_V \cdot (t - t_0)]$$

und

$$\rho(t_0) = \rho(t) \cdot [1 + \alpha_V \cdot (t - t_0)]$$

umgerechnet werden.

Analoges gilt für die Kompressibilität des Festkörpers unter Druck.

Verifizierung des Konzepts

Zieht man Temperatur und Druck zusammen, ergibt sich als Funktion $V(t, p)$ bzw. $\rho(t, p)$

$$V(t, p) = V_0 \cdot [1 - \kappa(p - p_0)] \cdot [1 + \alpha_V(t - t_0)]$$

bzw.

$$\rho(t, p) = \frac{m}{V_0 \cdot [1 - \kappa(p - p_0)] \cdot [1 + \alpha_V(t - t_0)]}$$

wobei V_0 das Volumen bei 20 °C und 1013,25 mbar ist, m die Masse, κ die Kompressibilität, α_V der Volumenausdehnungskoeffizient, p der aktuelle Druck, t die aktuelle Temperatur, $p_0 = 1013,25$ mbar und $t_0 = 20$ °C darstellt.

Bei isotropen Festkörpern ist der Volumenausdehnungskoeffizient α_V in guter Näherung gleich dem dreifachen mittleren linearen Ausdehnungskoeffizienten α .

Der mittlere Volumenausdehnungskoeffizient für Gewichtstücke aus Stahl oder Messing beträgt z.B. $\alpha_V = 5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Der Volumenausdehnungskoeffizient von Flüssigkeiten ist deutlich größer als der von Festkörpern. Daher ist bei fast allen hydrostatischen Dichtebestimmungen eine genauere Temperaturmessung unerlässlich.

5.1.2 Rückführung auf die lokale Erdbeschleunigung (Erdschwere)

An genau definierten Stellen wird das Absolutgravimeter des BEV als Bezugsnormale und nationales Normal für die Bestimmung der Schwere verwendet. Diese definierten Stellen (Basisstationen) sind Teil des Österreichischen Schweregrundnetzes ÖSGN (Vergleiche dazu die analoge Vorgehensweise der BRD in [40]). Die Rückführung des Absolutgravimeters erfolgt auf die nationalen Normale der Länge und der Frequenz. In regelmäßigen Abständen wird das Absolutgravimeter mit anderen Absolutgravimetern in Vergleichskampagnen am BIPM in Sevres verglichen. Bei den Schweremessungen werden eine Reihe von Basis-Stationen im Amtsgebäude BEV bestimmt, an die der Anschluss der Schwerewerte für die Krafthalle erfolgte.

Als Arbeitsnormale werden im BEV kalibrierte Relativgravimeter im Zusammenhang mit genau definierten Messstationen bezeichnet. Für die Kalibrierung der Relativgravimeter (Federgravimeter) werden Kalibrierstrecken an den ausgewählten Basisstationen verwendet. An der 250 kN-Totlastanlage werden in drei Höhen derartige Messstationen definiert und der Schwerewert mittels Relativgravimeter Scintrex CG5 bestimmt.

Punkt	Beschreibung Ort	rel. Höhe Δh [m]	g-Wert [mm/s ²]	U bei $k=2$
1-058-21	OESGN vor Messschacht, Erdgeschoß	-	9808,41141	0,00010
1-058-22	OESGN auf Stufe, Hof, Westseite	+0,42	9808,41266	0,00010
KML01	Kraftmessanlage, Laborebene	0,00	9808,41246	0,00012
KML02	Kraftmessanlage, Bühne	+3,04	9808,40358	0,00014
KML03	Kraftmessanlage, Schachtboden	-2,13	9808,41685	0,00014

Tabelle 9: Auszug aus Bekanntgabe der Schwerewerte vom 20. 09. 2012, BEV Abt. V1

Die Schwerewerte sind von den bekannten variablen Größen (Erdzeiten, Polschwankung, Luftmassen (Luftdruck)) befreit. Die tägliche Variation durch die Erdzeiten beträgt bis zu $2 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}^2$, wobei der Einfluss von Polschwankung und Luftdruck maximal je $1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}^2$ ausmacht.

Die beiden ÖSGN-Punkte 1-058-21 und 1-058-22 wurden von den Absolutschweremessungen der Jahre 1999-2001 im damals bestehenden Längenmesskeller des BEV abgeleitet. Der Absolutschwerpunkt ging im Zuge des

Verifizierung des Konzepts

Laborneubaues verloren. An den genannten ÖSGN-Punkten kann infolge des Laborneubaues (Masseverschiebungen; Kellerneubau) eine geringfügige Änderung der Schwerewerte in der Größenordnung von einigen 10^{-7} m/s^2 bewirkt worden sein. Eine Neubestimmung der ÖSGN-Punkte wird voraussichtlich im Jahr 2016 erfolgen.

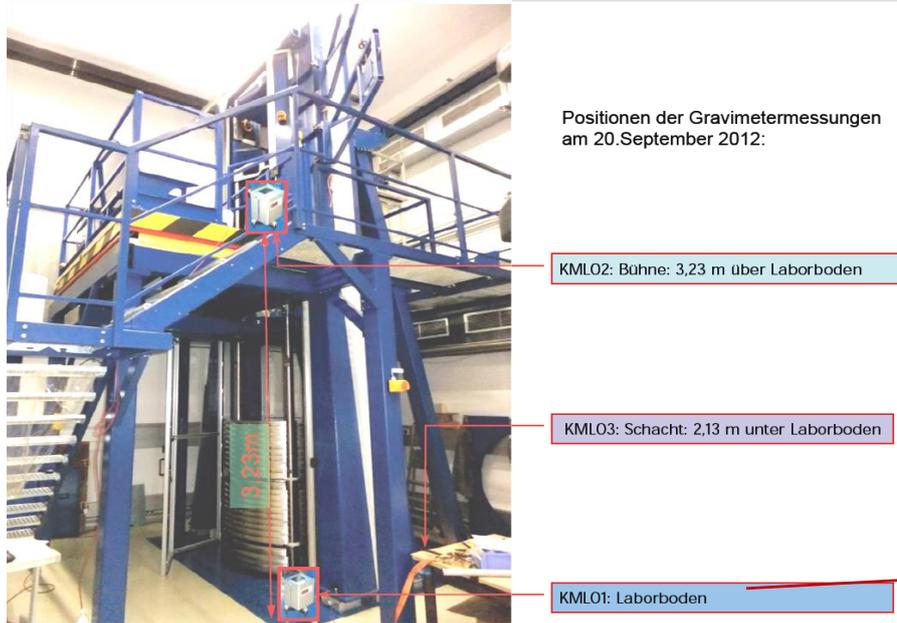


Abbildung 26: Messstationen an der Kraftnormalanlage



Abbildung 27: Messpunkt KML 01 Laborboden, Höhe: 0,0 m

5.1.3 Rückführung der Sensoren

Zur Bestimmung der Umgebungsparameter für Temperatur, Luftfeuchte und Luftdruck werden eine Reihe von Temperatur-Feuchtesensoren sowie ein Drucksensor eingesetzt. Diese sind so platziert, dass in den einzelnen Abschnitten der Kraftmessanlagen die relevanten Parameter gemessen werden können.

Die Temperatur-Feuchtesensoren werden im Temperaturlabor des BEVs jeweils in zwei Temperaturpunkten ($20 \text{ }^\circ\text{C}$ und $21 \text{ }^\circ\text{C}$) bzw. in zwei Feuchtepunkten (40 \%rH und 50 \%rH) an den nationalen Etalon der Temperatur und der Feuchte angeschlossen. Durch lineare Interpolation zwischen den beiden Punkten wurde für jeden Sensor eine Ausgleichsgerade sowohl in der Temperatur als in der Feuchte geschaffen.

Der Drucksensor ist ebenfalls nach dem Standardverfahren auf den nationalen Etalon des Druckes rückgeführt.

5.2 Beurteilung der Massenkompensation

Aus der Trendanalyse der Beiträge zur Messunsicherheit des Kapitels 4.2 wird abgeleitet, dass ein gravierender Anteil der Gesamtunsicherheit aus einer Veränderlichkeit der Größenverhältnisse der bewegten Teile hervorgeht. Das Konzept des Waagensystems ist zur Erreichung des Messumfanges absolut notwendig, aber damit liegt einer der Haupteinflüsse dieser speziellen Konstruktion auf die Messgenauigkeit und deren Messunsicherheit vor allem in den Wägaufnahmen der Gewichte. Wie nachgewiesen werden kann, sind maßgeblich die Zustandsgrößenänderungen (vor allem der Dichteveränderungen) innerhalb des Gehänges dafür verantwortlich. Daher sind bei einer

Verifizierung des Konzepts

Änderung der Umgebungsbedingungen (in erster Linie einer Änderung der Luftdichte) die Materialdichteverhältnisse der Waagenkonstruktion von grundlegender Bedeutung. Zur Ermittlung von Dichteverhältnissen innerhalb der Konstruktion der krafteinleitenden Teile, wie dem Gehängesystem, der Arbeitsbrücke des Gehängesystems und des Kastenrahmens, ist es notwendig, vorerst die Bauweise des Systems zu betrachten.

Wie in [36] umfangreich beschrieben wird und aus den Ergebnissen der Simulationen ersichtlich ist (z.B. der Querhäupter, wie in der Abbildung 28 gezeigt), wird vor allem Wert darauf gelegt, dass durch Verformungen in vertikaler Richtung, bedingt durch das Aufbringen der Kraft, keine Störgrößen in Form von Drehmomenten in den Knotenpunkten um den zentralen Auflagepunkt verursacht werden. Durch die konsequente Verfolgung dieses Zieles und durch Simulationen erprobt, konnte eine symmetrische Verformung ohne störende Nebengrößen nur in vertikaler bzw. axialer Richtung erreicht werden. Wie in der Abbildung ersichtlich ist, wurde bewusst auf eine rotationssymmetrische Konstruktionsform zurückgegriffen, die derart ausgeführt wurde, dass sie einer Verformung in Querrichtung entgegenwirkt. Durch die gewölbte, fachwerksähnliche Ausführung, kommt es bei einer Verformung in axialer Richtung zu keinem seitlichen Einzug des Gehängegestänges.

Die Simulationen der Abbildung 28 zeigen im oberen Querhaupt unter Volllast von 250 kN eine maximale Spannung von 65 N/mm^2 und eine maximale Verformung von $0,283 \text{ mm}$, im mittleren Querhaupt beträgt die maximale Spannung dabei 95 N/mm^2 und die maximale Verformung $0,289 \text{ mm}$. Die ermittelten Verformungswerte waren nicht nur zur Abschätzung des Gesamtverzuges notwendig, sondern auch zur Ermittlung notwendiger Arbeitswege und Toleranzen von Baugruppen.

In der Praxis bedeutet eine rein axiale Verformung, dass sich unter Last sämtliche kraftbeaufschlagten Komponenten der Kraftnormalanlage nur in axialer Richtung dehnen und dabei keinen seitlichen Verzug aufweisen. Die Gestaltung der Form der Arbeitsbrücke erfolgte auch unter dem Gesichtspunkt, dass bei einer Deformation in axialer Richtung kein Drehmoment in den Knotenpunkten zum Gehänge entsteht. Das bedeutet, dass der Einzug in den vertikalen Säulen des Gehänges durch entsprechende konstruktive Ausführung der Arbeitsbrücke selbst minimiert wird.

Bei den verwendeten Materialien der tragenden Teile des Gehänges werden unterschiedliche, zum Teil hochlegierte Stähle mit einer Dichte zwischen 7860 kg/m^3 und 8050 kg/m^3 verwendet. Bei der Auswahl musste in erster Linie auf Korrosionsfestigkeit, Zugfestigkeit, Bearbeitbarkeit sowie gegebenenfalls auch Schweißbarkeit wertgelegt werden. Weiters wird Aluminium (vor allem bei der 2 kN-Totlastanlage) und Polyethylen als Schutzaufgabe verwendet.

Ein Problem bei der Materialdichtebestimmung des Gehänges ergibt sich bei der 250 kN-Totlastanlage. Zur Optimierung des Verhältnisses aus Zugfestigkeit und Eigengewicht werden manche Zugstäbe des Gehänges in Rohrform ausgeführt. Da das gesamte Gehänge zur besseren Manipulation der Gewichtscheiben als Schraubkonstruktion ausgeführt ist, sind einzelne Teile im eingebauten Zustand als Hohlkörper zu betrachten. Bei der Festlegung der Gesamtdichte (Stahldichte 7880 kg/m^3) wurde auf die Auflistung der Materialdichten des Konstruktionsprogramms (Solid Works) zurückgegriffen. Die verwendete mittlere Dichte betrug dabei 5410 kg/m^3 .

Verifizierung des Konzepts

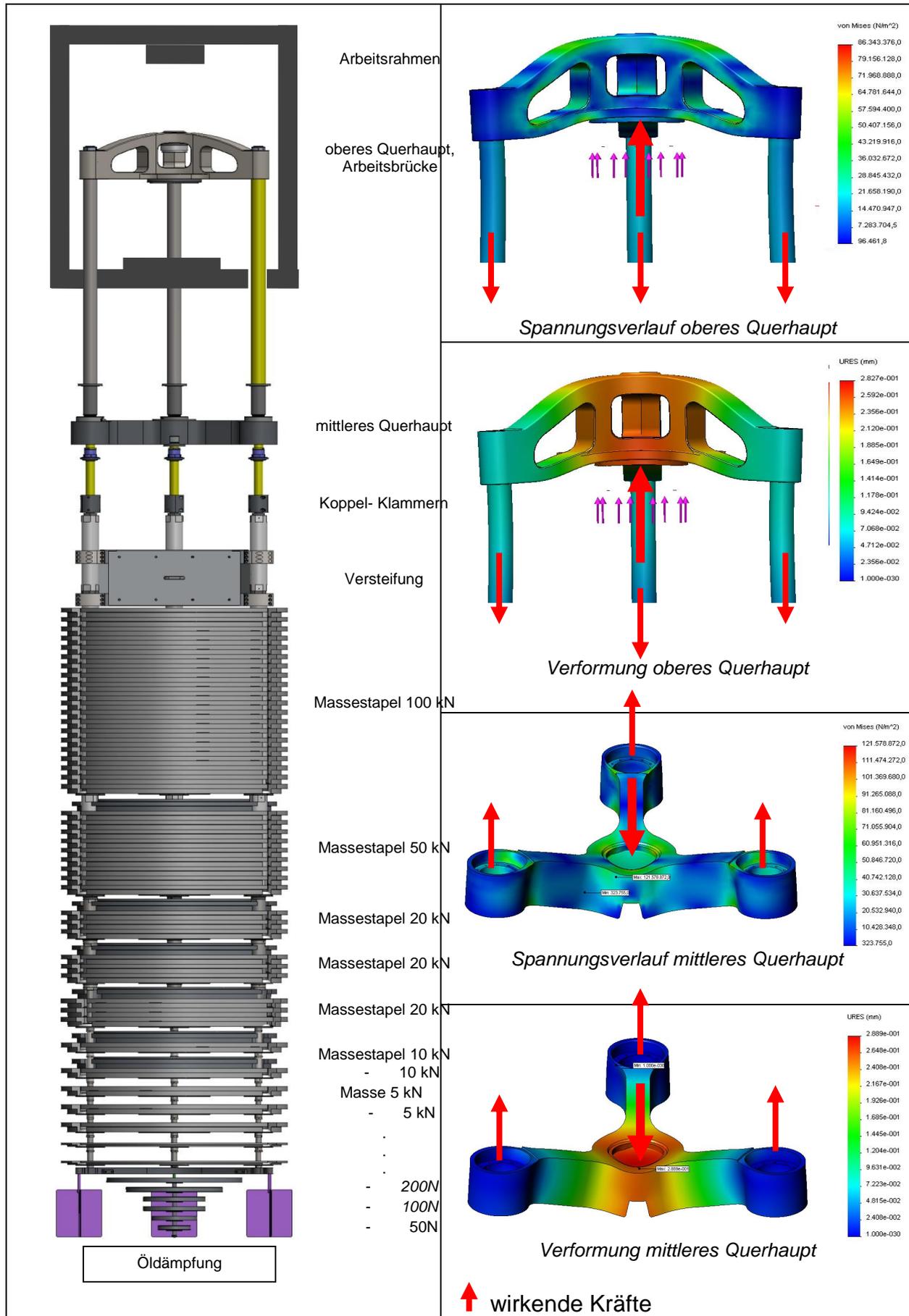


Abbildung 28: Gehängedesign der 200 kN-Kraftanlage mit Visualisierung des Spannungverlaufes und der Verformung durch die Kräfteinleitung in die Querhäupter (Arbeitsbrücken) [36]

5.2.1 Abhängigkeit von der Luftdichte

Wie beschrieben, basieren beide Anlagen auf dem Prinzip einer gleicharmigen Balkenwaage. Das bedeutet, dass sich um einen zentralen Drehpunkt bewegte Massen befinden, die Auslöser von Kräften und Momenten sind. Um eine Aussage bezüglich auftretender Ausgleichsmomente in den Waagebalken (zwischen Gehängeteilen und Gegengewichtteilen), im Speziellen durch unterschiedlichen, sich ändernden Luftauftrieb, treffen zu können, ist eine Bestimmung des konventionellen Wägewertes (Massenbestimmung) sowie eine Abschätzung der tatsächlichen Materialdichte aller bewegten Teile notwendig. Zu diesem Zwecke sind vor der Montage alle Teile des Gehänges sowie des Gegengewichte-Apparates einer Wägewertbestimmung durch Vergleich mit rückgeführten Normalgewichten zu unterziehen. Bei der Massebestimmung bezieht man sich in der Regel auf diese konventionellen Wägewerte.

Die in den nachfolgenden Tabellen angegebenen Massen der Bauteilgruppen bei der 250 kN-Totlastanlage entsprechen der Summe der bestimmten Massen der Einzelteile. Die Bauteilgruppen sind entsprechend gleicher verwendeter Materialien und somit gleicher Materialdichten zu bestimmen. Die in den nachfolgenden Tabellen angegebenen Volumina sind Rechenwerte aus Masse und Dichte.

Gehänge	Masse [kg]	Dichte [kg/m ³]	Volumen [m ³]	Masse verdrängte Luft [kg]
Kreuze Massiv	600,57096	7855,0	0,0764572	0,09060
Arbeitsbrücke	261,66660	7950,0	0,0329140	0,03900
Gestänge hohl	330,67043	5410,0	0,0611221	0,07243
Gewichtauflagen	2,34525	950,0	0,0024687	0,00293
Knotenelemente	139,53866	7900,0	0,0176631	0,02093
Justage Gewicht	0,00500	7900,0	0,0000006	0,00000
Summe	1334,79690	7002,2	0,1906257	0,22589
Gegengewicht	Masse [kg]	Dichte [kg/m ³]	Volumen [m ³]	Masse verdrängte Luft [kg]
Haltevorrichtung	132,30220	7900,0	0,0167471	0,01985
Gewichte	1117,95100	7890,0	0,1416921	0,16791
Justierkammer	78,85353	7850,0	0,0100450	0,01190
Justage: Blei	5,66452	11342,0	0,0004994	0,00059
Summe	1334,77125	7898,8	0,1689837	0,20025

Tabelle 10: Masse, Dichte und Volumen der Bauteilgruppen der Gehängeseite und der Gegengewichtseite der 250 kN-Totlastanlage

Die mittlere Dichte von 7002,2 kg/m³ ergibt sich aus dem Quotienten der Massen des Gehänges und der Summe der Volumina der entsprechenden Bauteile bei der 250 kN-Totlastanlage. Auf der Seite des Gegengewichtes (Gewichtskompensation des Gehänges) ergibt sich eine Dichte von 7898,8 kg/m³. Zu beachten ist, dass trotz ähnlicher Massen zwischen Gehänge und Gegengewicht ein Dichteunterschied von etwa 900 kg/m³ besteht.

Auch bei der 2 kN-Totlastanlage entspricht die Summe der bestimmten Massen der Einzelteile der Masse der Bauteilgruppen. Auch bei der 2 kN-Totlastanlage besteht durch die verwendeten Materialien ein gravierender Unterschied in den Volumina zwischen den Seiten. Hier steht die mittlere Dichte von 6812,6 kg/m³ des Gehänges einer Dichte von 7744,6 kg/m³ des Gegengewichtes gegenüber. Es ist trotz ähnlichen Massen von Gehänge und Gegengewicht ein Dichteunterschied von etwa 900 kg/m³ zu verzeichnen.

Verifizierung des Konzepts

Gehänge	Masse [kg]	Dichte [kg/m ³]	Volumen [m ³]	Masse verdrängte Luft [kg]
Gestänge	22,24680	7855,0	0,0028322	0,00336
Arbeitsbrücke	48,48760	7950,0	0,0060991	0,00723
Gew.auflagen Alu	5,26193	2710,0	0,0019417	0,00230
Gewichtauflagen	0,44525	950,0	0,0004687	0,00056
Knotenelemente	5,98135	7900,0	0,0007571	0,00090
Justage Gewicht	0,00500	7900,0	0,0000006	0,00000
Summe	82,42793	6812,6	0,0120994	0,01434
Gegengewicht	Masse [kg]	Dichte [kg/m ³]	Volumen [m ³]	Masse verdrängte Luft [kg]
Haltevorrichtung	15,623840	7900,0	0,0019777	0,00234
Gewichte	57,542350	7890,0	0,0072931	0,00864
Gew.auflagen Alu	1,016534	2710,0	0,0003751	0,00044
Gewichtauflagen	0,095423	950,0	0,0001004	0,00012
Justierkammer	4,547950	7850,0	0,0005794	0,00069
Justage: Blei	3,600107	11342,0	0,0003174	0,00038
Summe	82,42620	7744,6	0,0106431	0,01261

Tabelle 11: Masse, Dichte und Volumen der Bauteilgruppen der Gehängeseite und der Gegengewichtseite der 2 kN-Totlastanlage

Auf der Gehängeseite werden hier bei beiden Kraftanlagen 5 g als Justagegewicht angegeben. Dieser Wert ist in dieser Betrachtung vorerst fiktiv angenommen, da sich in der Praxis diese Justagemasse direkt aus der Justage der Nullposition vor jeder Messserie ergibt. Der Wert selbst geht nicht in die Berechnung der Kraft ein, da er nur eine Korrektur zu vorherrschenden Kräfteverhältnissen (verursacht durch sich ändernde Umgebungsbedingungen) darstellt.

Als Ausgangswerte für weitere Berechnungen dienen die Massen der Scheiben und deren Volumina. Dazu ist anzumerken, dass sowohl in der 2 kN-Kraftanlage als auch in der 250 kN-Kraftanlage in Summe fünf über die Höhe der Anlage verteilte Temperatursensoren sowie ein Luftdrucksensor vorgesehen wurden. Das Volumen wird für jede Messung über den thermischen Ausdehnungskoeffizienten sowie über die Materialkompressibilität korrigiert. Zur Ermittlung des aktuellen Volumens wird jeder Masse bzw. jedem Massestapel ein positionsabhängiger Gewichtungsfaktor eines Temperatursensors zugeordnet, in dessen Bereich sich der Stapel befindet. Über diese Gewichtungsfaktoren werden die aufgezeichneten Temperaturmesswerte für die weitere Berechnung korrigiert und herangezogen. Ein weiterer fixer Faktor, der in die Berechnung eingeht, ist die Festlegung der Höhenabweichungen der Gewichtschwerpunkte zu einem Bezugspunkt (Oberkante Bodenplatte) der Anlage. Diese Höhenabweichungen werden für die Korrektur bzw. die wertmäßige Zuordnung zum einen der Gravitation, zum anderen des Luftdruckes verwendet. Bei der Luftdruckmessung wird von einem Drucksensor in etwa 2 m Höhe über Niveau ausgegangen und zur weiteren Berechnung eines aktuellen und positionsabhängigen Wertes für die Luftdichte herangezogen. Dabei werden ebenfalls Höhenkorrekturen für den gemessenen Luftdruck verwendet. Als Ausgangsbasis für die Volumenberechnung dient immer jenes Volumen eines Gewichtstapels bei einer Bezugstemperatur von 20 °C und einem Bezugsluftdruck von 1013,25 hPa.

Die Gewichtskompensation des Gehänges durch das Gegengewicht bedeutet einerseits die Ermöglichung des beabsichtigten Messbereichumfanges, zugleich aber auch zusätzliche Ausgleichskräfte als Störgrößen, die wie in Kapitel 7.2.4 gezeigt, an die Grenzen des Möglichen gehen. Um eine Aussage bezüglich auftretender

Verifizierung des Konzepts

Ausgleichsmomente in diesem gleicharmigen Balkenwaagesystem (zwischen Gehängeteilen und Gegengewichtsteilen), im Speziellen durch sich ändernden Luftauftrieb, treffen zu können, ist eine Bestimmung des konventionellen Wägewertes (Massenbestimmung) sowie eine Abschätzung der tatsächlichen Materialdichte aller bewegten Teile notwendig. Eine Volumenänderung (und somit Materialdichteänderung) der bewegten Konstruktion durch eine Änderung der Temperatur oder eine Luftdichteänderung (durch Änderung der Lufttemperatur, der Luftfeuchte oder des Luftdruckes) ergibt eine Auftriebsänderung aller bewegten Teile entsprechend der Materialdichte.

Entsprechend Kapitel 5.2.1 werden sowohl für die 250 kN-Totlastanlage als auch für die 2 kN-Totlastanlage exemplarisch je zwei Situationen simuliert, bei denen die Auftriebswerte der aktuellen Volumina der einzelnen Komponenten berechnet werden. Zur Vereinfachung wird dabei die Annahme getätigt, dass die Lufttemperatur gleich der Temperatur des Materials ist, und dass die Temperatur über die Höhe der Anlage denselben Wert aufweist.

Nach [31] lässt sich die Luftdichte aus der Lufttemperatur, der Luftfeuchte, dem Luftdruck und dem Kohlendioxidgehalt berechnen. Betrachtet man zwei mögliche Umgebungsparameterzustände im Labor, z.B. fällt der Luftdruck um 20 mbar, die Lufttemperatur steigt um 2 °C und die Luftfeuchte steigt um 20 %rH, so ergibt sich eine Änderung der Luftdichte um etwa 0,035 kg/m³. Durch die Laborklimatisierung sind Schwankungen in der Temperatur und der Feuchte zwar reduziert, aber auch wenn die Temperatur, die Luftfeuchte und der Kohlendioxidgehalt konstant gehalten werden, ändert sich die Dichte in Abhängigkeit des Luftdruckes. Bei realen Laborbedingungen wie einer Temperatur von 21 °C und einer Luftfeuchte von 42 %rH ändert eine Luftdruckschwankung von 20 mbar (z.B. von 1000 mbar auf 980 mbar) die Luftdichte von 1,183 kg/m³ auf 1,156 kg/m³, also um etwa 0,025 kg/m³. Das bedeutet, dass sich vor allem durch Luftdruckänderung die Luftdichte verändern kann, ohne dass z.B. durch die Laborklimatisierung wesentlich eingegriffen oder gegengesteuert werden kann.

Zu Beginn jeder Messserie wird eine Justage des Gehänges (Justage Gewicht) zum Ausgleich der Auftriebsschwankungen durchgeführt bzw. stellt sich automatisch eine Gleichgewichtsposition innerhalb gegebener, konstruktiver Grenzen ein. Daher ist die Rückstellkraft zu Beginn der Vergleiche bzw. der Messserie null (ausgeglichener Waagenzustand).

Werden jetzt die Verhältnisse der zugrundeliegenden Dichten aus Tabelle 10 und Tabelle 11 herangezogen und aus den Massen und den Volumina die Auftriebswerte durch die Luftdichte berechnet, so erhält man nachfolgende Gegenüberstellung der Wägewerte zwischen Gehängeseite und Gegengewichtseite des Balkensystems der Waage:

In der Berechnung wird über die Addition der Massen und der Volumina eine mittlere Dichte berechnet bzw. über die Volumina der einzelnen Baugruppen ein Luftauftrieb bestimmt. Dieser Luftauftrieb ergibt einen, in der Praxis nicht messbaren, tatsächlichen Wägewert (er wird mathematisch bestimmt) der Masse des Gegengewichtes und der Masse des Gehänges, die miteinander verglichen werden (Differenz Wägewerte). Diese Differenz der Wägewerte wird unter Einbeziehung der Erdschwere auf die Rückstellkraft umgelegt. Tabelle 12 zeigt das Ergebnis der Berechnung der Wägewertdifferenz sowie der Rückstellkraft bei der 250 kN-Totlastanlage und einer angenommenen Ausgangsluftdichte von 1,185 kg/m³. Die Rückstellkraft ist hier aufgrund der zuvor

Verifizierung des Konzepts

erfolgten Justage der Masseverhältnisse (besser bezeichnet eigentlich der Wägewertverhältnisse) natürlich null.

Gehänge	Masse [kg]	Dichte [kg/m ³]	Volumen [m ³]	Masse verdrängte Luft [kg]
Kreuz Massiv	600,57096	7855,0	0,0764572	0,09060
Arbeitsbrücke	261,66660	7950,0	0,0329140	0,03900
Gestänge hohl	330,67043	5410,0	0,0611221	0,07243
Gewichtauflagen	2,34525	950,0	0,0024687	0,00293
Knotenelemente	139,53866	7900,0	0,0176631	0,02093
Justage Gewicht	0,00500	7900,0	0,0000006	0,00000
Summe	1334,79690	7002,2	0,1906257	0,22589
Massen mit Auftrieb	1334,57101	Wägewert [kg]		
Gegengewicht	Masse [kg]	Dichte [kg/m ³]	Volumen [m ³]	Masse verdrängte Luft [kg]
Haltevorrichtung	132,30220	7900,0	0,0167471	0,01985
Gewichte	1117,95100	7890,0	0,1416921	0,16791
Justierkammer	78,85353	7850,0	0,0100450	0,01190
Justage: Blei	5,66452	11342,0	0,0004994	0,00059
Summe	1334,77125	7898,8	0,1689837	0,20025
Massen mit Auftrieb	1334,57101	Wägewert [kg]		
		Differenz Wägewerte (Massenscheiben mit Auftrieb) [g]:	0,0000	
		aktuelle Luftdichte [kg/m ³]:	1,19	
		g aktuell (in 2,25 m) [m/s²]:	9,808412623	Ausgleichskraft [N]: 0,0000

Tabelle 12: Massenauftriebe und Wägewertdifferenz bei der 250 kN-Totlastanlage

Wird in Tabelle 13 die Berechnung der Wägewertdifferenz sowie der Rückstellkraft bei der 250 kN-Totlastanlage mit geänderter Luftdichte (Endluftdichte von 1,15 kg/m³) erneut durchgeführt, zeigt sich ein deutlicher Unterschied zu den Wägewerten vor der Luftdichteänderung.

Wird diese Luftdichtedifferenz in die Auftriebsbestimmung eingesetzt, ergibt sich ein Unterschied im Wägewert zwischen Gehänge und Gegengewicht von gerundet 0,758 g. Praktisch gesehen heißt das: Allein durch Änderung der Umgebungsbedingungen weicht man vom ausgeglichenen Waagenzustand um 0,758 g ab, die Gegengewichtseite wurde während der Messung um diesen Betrag leichter. Legt man diese Differenz im Wägewert mit der lokalen, auf die Höhe korrigierten Erdbeschleunigung auf die Kraft um, bedeutet dies bei der 250 kN-Totlastanlage, dass durch die Änderung der Luftdichte während der Messserie eine zusätzliche Kraft von 7,4 mN auftreten kann (siehe Ergebnis Tabelle 13: Ausgleichskraft 0,0074 N). Betrachtet man diese 7,4 mN als Anteil der absoluten, erweiterten Unsicherheit der Laststufen und vergleicht diesen Anteil mit den Ergebnissen der Messunsicherheitsberechnung aller Laststufen, stellt man fest, dass der ermittelte Anteil etwa die Hälfte der relativen, erweiterten Unsicherheit der 0,5 kN-Laststufe beträgt. Zieht man damit Rückschlüsse von der Kraft auf die Luftdichte, heißt dies, dass eine Rückstellkraft von 1 mN eine Luftdichteänderung von 0,005 kg/m³ zur Ursache hat. Daher müsste bei Messungen sichergestellt werden, sofern man nur eine Rückstellkraft von 1 mN akzeptiert, dass sich die Luftdichte während einer Messserie bei Laststufen unter 0,5 kN nicht mehr als 0,005 kg/m³ über die Zeitdauer der Messung ändert. Kann dies nicht sichergestellt werden, wären Messserien, bei denen sich die Luftdichte um mehr als 0,005 kg/m³ geändert hat, zu verwerfen.

Verifizierung des Konzepts

Gehänge	Masse [kg]	Dichte [kg/m ³]	Volumen [m ³]	Masse verdrängte Luft [kg]
Kreuze Massiv	600,57096	7855,0	0,0764572	0,08793
Arbeitsbrücke	261,66660	7950,0	0,0329140	0,03785
Gestänge hohl	330,67043	5410,0	0,0611221	0,07029
Gewichtauflagen	2,34525	950,0	0,0024687	0,00284
Knotenelemente	139,53866	7900,0	0,0176631	0,02031
Justagegewicht	0,00500	7900,0	0,0000006	0,00000
Summe	1334,79690	7002,2	0,1906257	0,21922
Massen mit Auftrieb	1334,57768	Wägewert [kg]		
Gegengewicht	Masse [kg]	Dichte [kg/m ³]	Volumen [m ³]	Masse verdrängte Luft [kg]
Haltevorrichtung	132,30220	7900,0	0,0167471	0,01926
Gewichte	1117,95100	7890,0	0,1416921	0,16295
Justierkammer	78,85353	7850,0	0,0100450	0,01155
Justage: Blei	5,66452	11342,0	0,0004994	0,00057
Summe	1334,77125	7898,8	0,1689837	0,19433
Massen mit Auftrieb	1334,576920	Wägewert [kg]		
		Differenz Wägewerte (Massenscheiben mit Auftrieb) [g]:		0,7575
		zu grundlegende aktuelle Luftdichte [kg/m ³]:		1,15
		g aktuell (in 2,25 m) [m/s²]:	9,808412623	Ausgleichskraft [N]: 0,0074

Tabelle 13: Wägewertdifferenz sowie Rückstellkraft bei der 250 kN-Totlastanlage und geänderter Luftdichte

Der 250 kN-Totlastanlage ident ergibt sich auch bei der 2 kN-Totlastanlage konstruktionsbedingt ein Materialdichteunterschied, der die Ursache für zusätzliche Kräfte ist. Allerdings besteht bei dieser Anlage der Unterschied aufgrund der verwendeten Materialien (Aluminium und Stahl). Die Berechnung der Wägewertdifferenz sowie der Rückstellkraft bei der 2 kN-Totlastanlage zeigt einen ähnlich hohen Unterschied bei Luftdichteänderung wie im vorhergehenden Beispiel der 250 kN-Kraftanlage. Dabei wurde eine idente Ausgangsluftdichte von 1,19 kg/m³ sowie eine Änderung auf eine Endluftdichte von 1,15 kg/m³ herangezogen. Exakt entsteht in diesem Fall eine Rückstellkraft von gerundet 0,5 mN. Die Größenordnung dieser Kraft entspricht zur Veranschaulichung bei dieser Anlage etwa der erweiterten Messunsicherheit der kleineren Laststufen (< 50 N). Aus diesem Grund ist hier eine Lösung zur Vermeidung dieses Störeinflusses zu finden.

5.2.2 Dichteausgleich bei der Gewichtskompensation

Im Hinblick auf die angebbaren Messunsicherheiten bei den Ergebnissen der Laststufen im unteren Messbereich (kleiner 10 %) hat sich eine genaue Betrachtung des Verlaufes der Umgebungsparameter und der Entwicklung der Luftdichte als zwingend notwendig ergeben. Verfahrenstechnisch ist aber eine Reglementierung unbefriedigend, da die Auslegung und die Dokumentation sich in der Arbeitsroutine als schwierig erweisen. Eine zusätzliche Abschätzung der Rückstellkräfte im Kleinstbereich bedeutet einen zusätzlichen Aufwand und stellt die Richtigkeit der Annahmen bei der Messunsicherheitsberechnung und die Einhaltung der erwünschten Grenze der erweiterten relativen Messunsicherheit von $2 \cdot 10^{-5}$ in Frage.

Da die Problematik der Ausgleichkräfte eine systematische Abweichung darstellt, ist nach den Vorgaben des GUM [9] diese zu eliminieren. Betrachtet man die Einflüsse des Materialdichteunterschiedes zwischen Gehängeseite und Gegengewichtseite, so ist der

Verifizierung des Konzepts

Hauptinfluss die geringe Dichte bezogen auf die Masse der Hohlkörper. Als konstruktive Maßnahme zeigte eine Betrachtung der Gehängekonstruktion, dass eine Verhinderung von geschlossenen Hohlkörpern möglich ist, ohne die Zugfestigkeit nennenswert zu verringern. Die betroffenen Elemente können aber durch den dadurch möglichen Druckausgleich als Vollmaterial in der Dichteberechnung betrachtet werden.

Durch die Veränderung der gesamten Materialdichte zwischen Gehängeseite und Gegengewichtseite auf eine zulässige Differenz von etwa 100 kg/m^3 , entsteht mit geändertem Hohlkörpergestänge trotz großem Luftdichteunterschied eine Wägewertdifferenz von nur mehr $0,079 \text{ g}$. Diese Wägewertdifferenz bewirkt anstatt der vor der Adaption vorherrschenden Rückstellkraft von $7,4 \text{ mN}$ (siehe Tabelle 13) nur mehr eine Kraft von $0,8 \text{ mN}$.

Durch eine weitere Optimierung des Verhältnisses von Masse zu Volumen auf beiden Seiten ist es möglich, Ausgleichskräfte bei Auftriebsänderung zur Gänze zu vermeiden. Ersetzt man auf der Gegengewichtseite die Masse des Justagebleis von 5 kg und die Masse einer Scheibe des Gegengewichtes von 3 kg (beide mit hoher Dichte) um eine Gegengewichtsmasse von 8 kg aus Aluminium (niedere Dichte), so ist die Summe der Materialdichten der Gehängeseite und der Gegengewichtseite annähernd gleich, siehe Tabelle 14.

Gehänge	Masse [kg]	Dichte [kg/m^3]	Volumen [m^3]	Masse verdrängte Luft [kg]
Kreuz Massiv	600,570958	7855,0	0,0764572	0,08793
Arbeitsbrücke	261,666600	7950,0	0,0329140	0,03785
Gestänge hohl - offen	330,670426	7920,0	0,0417513	0,04801
Gewichtauflagen	2,345250	950,0	0,0024687	0,00284
Knotenelemente	139,538663	7900,0	0,0176631	0,02031
Justagegewicht	0,005000	7900,0	0,0000006	0,00000
Summe	1334,79690	7794,2	0,1712549	0,19694
Massen mit Auftrieb	1334,599954	Wägewert [kg]		
Gegengewicht	Masse [kg]	Dichte [kg/m^3]	Volumen [m^3]	Masse verdrängte Luft [kg]
Haltevorrichtung	132,302200	7900,0	0,0167471	0,01926
Gewichte	1114,951000	7890,0	0,1413119	0,16251
Justierkammer	78,853530	7850,0	0,0100450	0,01155
Gegengewicht Alu	8,000000	2710,0	0,0029520	0,00339
Justage: Blei	0,690004	11342,0	0,0000608	0,00007
Summe	1334,79673	7800,5	0,1711169	0,19678
Massen mit Auftrieb	1334,599949	Wägewert [kg]		
Differenz Wägewerte (Massenscheiben mit Auftrieb) [g]:				0,0048
zu grundliegende aktuelle Luftdichte [kg/m^3]:				1,15
g aktuell (in 2,25 m) [m/s^2]:		9,808412623	Ausgleichskraft [N]: 0,0000	

Tabelle 14: Wägewertdifferenz mit angeglichenen Materialdichten und Rückstellkraft der 250 kN-Kraftanlage bei einer Endluftdichte von $1,15 \text{ kg/m}^3$

Es ergeben sich bei der neuerlichen Berechnung der Werte aus Tabelle 12 und Tabelle 13 bei einer Dichteänderung von etwa $0,035 \text{ kg/m}^3$ keine nennenswerten Wägewertdifferenzen. Wie das Ergebnis der Simulation zeigt, ist die mögliche Differenz der Wägewerte auf unter 5 mg zu senken, was eine unerwünschte Rückstellkraft von weniger als $0,045 \text{ mN}$ bewirkt. Dieser Wert ist außerhalb der Realisierungsmöglichkeiten der 250 kN-Kraftanlage. Eine direkte Berücksichtigung oder Korrektur ist nicht mehr

Verifizierung des Konzepts

notwendig und daher geht die Einflussgröße der Rückstellkraft nur mehr in die Halbwertsbreite der Messunsicherheitsabschätzung ($F_{St C}$ und $F_{St D}$, siehe 7.2.1) ein. Da der Volumenausgleich das gewünschte Ergebnis bringen muss, wurde auch ein entsprechender Ausgleich bei der 2 kN-Totlastanlage geschaffen. Auch bei dieser Totlastanlage wurde beim Gegengewicht eine Masse von 6 kg Stahl gegen Aluminium getauscht. Wie Tabelle 15 zeigt, reduziert sich der Wert der Wägewertdifferenz der beiden Seiten und somit die Entstehung einer zusätzlichen Rückstellkraft im System durch die Luftdichteänderung von einer Ausgangsluftdichte von $1,185 \text{ kg/m}^3$ auf eine Endluftdichte von $1,149 \text{ kg/m}^3$ nahezu auf null. Die mögliche Differenz der Wägewerte ist auf unter $0,09 \text{ mg}$ gesenkt worden, was eine unerwünschte Rückstellkraft von weniger als $0,8 \mu\text{N}$ bewirkt; zum Vergleich, ohne Materialdichteausgleich war die Größe der Kraft $0,5 \text{ mN}$. Auch bei dieser Anlage ist dieser Wert außerhalb der Realisierungsmöglichkeiten der Kraft. Die direkte Berücksichtigung der Rückstellkraft ist auch bei der 2 kN-Totlastanlage nicht mehr notwendig und geht daher auch hier in die Halbwertsbreite der Messunsicherheitsabschätzung ($F_{St C}$ und $F_{St D}$, siehe Kap. 7.2.1) ein.

Gehänge	Masse [kg]	Dichte [kg/m^3]	Volumen [m^3]	Masse verdrängte Luft [kg]
Gestänge	22,246800	7855,0	0,0028322	0,00326
Arbeits Brücke	48,487600	7950,0	0,0060991	0,00701
Gew.auflagen Alu	5,261934	2710,0	0,0019417	0,00223
Gewichtauflagen	0,445250	950,0	0,0004687	0,00054
Knotenelemente	5,981346	7900,0	0,0007571	0,00087
Justage Gewicht	0,005000	7900,0	0,0000006	0,00000
Summe	82,42793	6812,6	0,0120994	0,01391
Massen mit Auftrieb	82,414016	Wägewert [kg]		
Gegengewicht	Masse [kg]	Dichte [kg/m^3]	Volumen [m^3]	Masse verdrängte Luft [kg]
Haltevorrichtung	15,623840	7900,0	0,0019777	0,00227
Gewichte	51,542350	7890,0	0,0065326	0,00751
Alu Gewicht	6,000000	2710,0	0,0022140	0,00255
Gew.auflagen Alu	1,016534	2710,0	0,0003751	0,00043
Gewichtauflagen	0,095423	950,0	0,0001004	0,00012
Justierkammer	4,547950	7850,0	0,0005794	0,00067
Justage: Blei	3,601830	11342,0	0,0003176	0,00037
Summe	82,42793	6814,0	0,0120968	0,01391
Massen mit Auftrieb	82,414016	Wägewert [kg]		
		Differenz Wägewerte (Massenscheiben mit Auftrieb) [g]:		0,0001
		zu grundlegende aktuelle Luftdichte [kg/m^3]:		1,15
	g aktuell (in 2,79 m) [m/s^2]:	9,808412621	Ausgleichskraft [N]:	0,0000

Tabelle 15: Wägewertdifferenz und Rückstellkraft bei der 2 kN-Totlastanlage mit geändertem Dichteverhältnis bei Änderung der Luftdichte

In der Wägetechnik wird der Werkstoff Aluminium für Gewichtstücke aufgrund des ungünstigen Masse-Oberflächenverhältnisses und der vergleichsweise niederen Festigkeit eher vermieden, da diese Gewichtstücke sich als nicht besonders stabil in ihren Massewerten erwiesen haben und aufgrund des großen Volumens einen hohen Einfluss durch Umgebungsbedingungen aufweisen. Aus Überlegungen der Haltbarkeit und Massestabilität wird für konstruktive Verwendung, in diesem Fall einer doppelseitigen Balkenwaage, kein Problem gesehen, da sich auf beiden Seiten der Waage etwa dieselbe Masse Aluminium befindet. Da Wägewertsveränderungen auf beiden Seiten

Verifizierung des Konzepts

etwa in gleich großem Ausmaß erfolgen werden, treten Ausgleichkräfte nur eingeschränkt auf.

5.2.3 Voraussetzung der Kalibrierbarkeit der Massescheiben

Das System für große Kräfte bis 250 kN hat eine Auflösung der Massescheiben von 50 N. Der gesamte Massestapel von mehr als 25 t ist, wie im Bereich der Massebestimmung und Wägetechnik üblich, in mehrere Nominalwertintervalle aufgeteilt (Nominalwerte: 1-2-2-5, 10-20-20-50, etc.). Aus fertigungstechnischen Gründen werden hier speziell geformte Ringgewichte mit einem Masse-Nominalwert von 5 kg bis 100 kg und weitere Scheibengewichte mit Nominalwerten von 200 kg und 500 kg verwendet. Dabei ist die Mehrheit der 500 kg-Scheiben zu Stapeln von bis zu 10 t zusammengefasst. Diese Scheiben haben einen Durchmesser von 1,2 m und bestehen aus einer speziellen Stahllegierung, die für Präzisionsgewichte entwickelt worden ist.

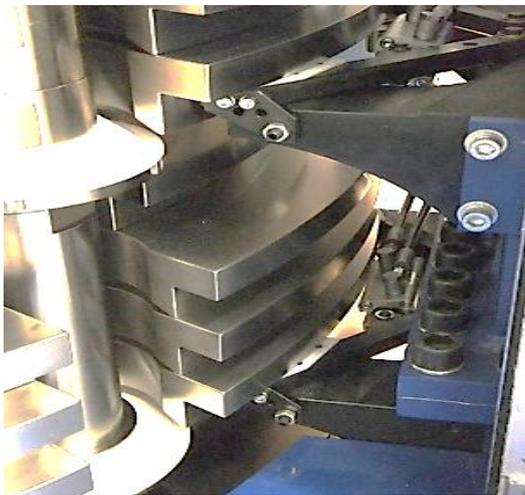


Abbildung 29: Haltekonstruktion der Gewichtsscheiben und Bestückung mit 5000 N Gewichtsscheiben in Verbindung mit dem Systemgehänge

Als Gewichtsedelstahl wird ein hochlegierter, nichtrostender, austenitischer Stahl verwendet, der aufgrund der günstigen ferromagnetischen Eigenschaften speziell für Gewichtstücke in der Metrologie verwendet wird. Die Oberfläche ist poliert, die Dichte des Stahles liegt bei 7960 kg/m^3 . Zur Gewichts- und Schwerpunktsjustage sind mehrere, symmetrisch angeordnete und verschließbare Kammern vorgesehen.

Beide Totlastanlagen sind in der Lage, jedes Gewicht einzeln und jederzeit gezielt zum Eingriff zu bringen. Dabei ist nicht, wie bei vielen herkömmlichen Totlastanlagen, die Zusammenstellung der Gewichtsscheiben aus der vorhergehenden Messung relevant. Beim Gewichtewechsel werden von der 250 kN-Kraftanlage alle Massescheiben mit dem Anlagengehänge gemeinsam angehoben, so dass sich alle einzelnen Scheiben geringfügig über den Magazinplätzen befinden. Durch Ansteuerung der Hydraulikzylinder für das Freigeben oder das Arretieren jedes der Scheibengewichte (siehe auch Abbildung 29) können nun Positionen der Auflageklammern angefahren werden, die nach dem Absenken der Gesamtheit der Massen entscheidend dafür sind, ob eine einzelne Massescheibe wieder auf den Magazinplatz (Arretierposition) zu liegen kommt, oder auf dem Anlagengehänge (Freigabeposition) aufliegt.

Alle Gewichtsscheiben sind in einer Art Schubladensystem untergebracht, so dass sie ohne nennenswerte Demontage oder Montage aus der Anlage entnommen und so

Verifizierung des Konzepts

sämtliche Gewichte einer wiederkehrenden Kalibrierung einfach zugeführt werden können. Entgegen herkömmlicher Bauweisen garantiert diese Konstruktion eine effiziente Methode, die Massescheiben zu entfernen und sie wieder zu retournieren, ohne die Justage und metrologische Historie der Kraftmessanlage zu berühren. Der erhöhte Konstruktionsaufwand auf der einen Seite garantiert auf der anderen Seite die kontinuierliche, wiederkehrende Kalibrierung der Massen. Das Verbringen der Gewichte erfolgt zuerst durch das Öffnen von drei Klammern und drei Schrauben im Gehänge. Dadurch kann das gesamte Gehänge entfernt werden und die Gewichtscheiben mit einer Ladestation entnommen oder wieder eingebracht werden.

Die Notwendigkeit einer wiederkehrenden Kalibrierung der Massen im Fachbereich der Kraft der NMIs ist umstritten. Der Grund dafür ist mit Sicherheit, dass keine existierende Anlage für einen Ausbau der Massescheiben konzipiert ist und eine Nachkalibrierung der Massen eine völlige Demontage der Anlage und somit eine umfangreiche Neujustierung erfordert. Daher wird in der Regel eine Nachkalibrierung mit Hilfe von Vergleichsmessungen als Zwischenprüfungen mit KrafttransfERNormalen „umgangen“. Die Frage einer wiederkehrenden Kalibrierung steht im Fachbereich der Masse außer Diskussion, da die geforderte Genauigkeit selbst bei großen Massen nur einige mg beträgt. Auf die Gesamtmasse umgelegt wird in Anbetracht der Ausführungsqualität der Massescheiben die Änderung nur wenige Gramm und somit in Kraft umgelegt nur wenige mN ausmachen, ein Betrag, der mit dem Umfang der Messunsicherheit abgedeckt ist. Vorausgesetzt wird allerdings eine entsprechende Handhabung und Wartung der Gewichtscheiben in Bezug auf Verunreinigungen. Die Frage, wie weit selbst hochqualitative Massescheiben dieser Größenordnung bei der Verwendung im Laufe der Zeit einer Massenänderung unterliegen, kann erst nach der ersten Rekalibrierung der Gewichtscheiben (nach derzeitiger Festlegung des BEV im Jahre 2018) bestimmt werden.

5.2.4 Sensitivität des Waagensystems

Die Aufteilung der Gewichtscheiben erfolgt in den Dekaden nach dem Schema der Masse: 1-2-2-5- (-10-20-20-50-...). Diese Aufteilung ermöglicht eine Realisierung jeder Laststufe im Abstand der kleinsten Laststufe (50 N). Es ergibt sich aber die Problematik, dass aus dieser Aufteilung heraus eine Maximalbestückung auf 250 kN Nominalwert nicht erreicht werden kann. Es ist daher notwendig, einzelne Laststapel zusätzlich einzufügen. Das bedeutet, einzelne Nominalwerte an Gewichtscheiben sind mehrmals belegt. Demnach werden Massescheiben mit folgenden Kraftnominalwerten verwendet: 50N, 100N, 200N, 200N, 500N, 1000N, 2000N, 2000N, 3 Stk. Massen von je 5000N und weitere Massestapel bestehend aus mehreren 5000 N-Scheiben zusammengefasst: 2 Stk. Massestapel zu je 10 kN, 3 Stk. Massestapel zu je 20 kN, 1 Stk. Massestapel 50 kN und 1 Stk. Massestapel 100 kN.

Daher kann ein interner Vergleich der Gewichtscheiben als Funktionstest zur Überprüfung der Ablaufroutine eingesetzt werden. Der Vorteil dieser Mehrfachbelegung ist, dass auch in späterer Folge aufgrund der separaten Luftauftriebsbestimmung von jeder Gewichtscheibe (wie bereits beschrieben) durch einen Direktvergleich dieser Massestapel in einem Routinemessablauf nicht nur die Maschinenfunktionen, sondern auch Teile der Auswertung überprüft werden können. Zur Überprüfung der Hebemechanik, der Krafthaltung und des Prüfablaufes bzw. zum direkten Vergleich

Verifizierung des Konzepts

einzelner Massescheiben mit gleichem Nominalwert werden wiederkehrende Messabläufe durchgeführt.

Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit werden dabei die einzelnen Gewichtscheiben in unterschiedlicher Reihenfolge angesteuert und zum Eingriff gebracht (siehe Messablauf der Abbildung 67 aus Kap. 6.2.3). Defacto werden bei diesen Tests mit einem geeigneten Kraftsensor entweder aufeinanderfolgend verschiedene Gewichtscheiben mit gleichem Nominalwert direkt verglichen oder in Standardmessabläufen zur Darstellung einzelner Laststufen unterschiedliche Gewichtscheiben mit gleichem Nominalwert verwendet. Durch die Überlagerung der Ergebnisse in Abbildung 30 zeigt sich nicht nur der reproduzierbare Ablauf des Gewichtwechsels, sondern die Auswertung der Verformungswerte ergibt ein sichtbar vergleichbares Ergebnis. Die Größe der dargestellten Streuung ist zu diesem Zeitpunkt nebensächlich, da nur die Funktion des Ablaufes von Bedeutung ist. Die relative Streuung von $2 \cdot 10^{-4}$ der einzelnen Laststufen ist durch die unterschiedliche Art der Belastungsreihenfolge bedingt (siehe auch die Beschreibung des internen Vergleiches der Gewichtscheiben in Kap. 6.2.3). Entscheidend für die Tests der Waagenmechanik ist, dass bei den vorliegenden vier Messreihen ein reproduzierbares Ergebnis erhalten wird.

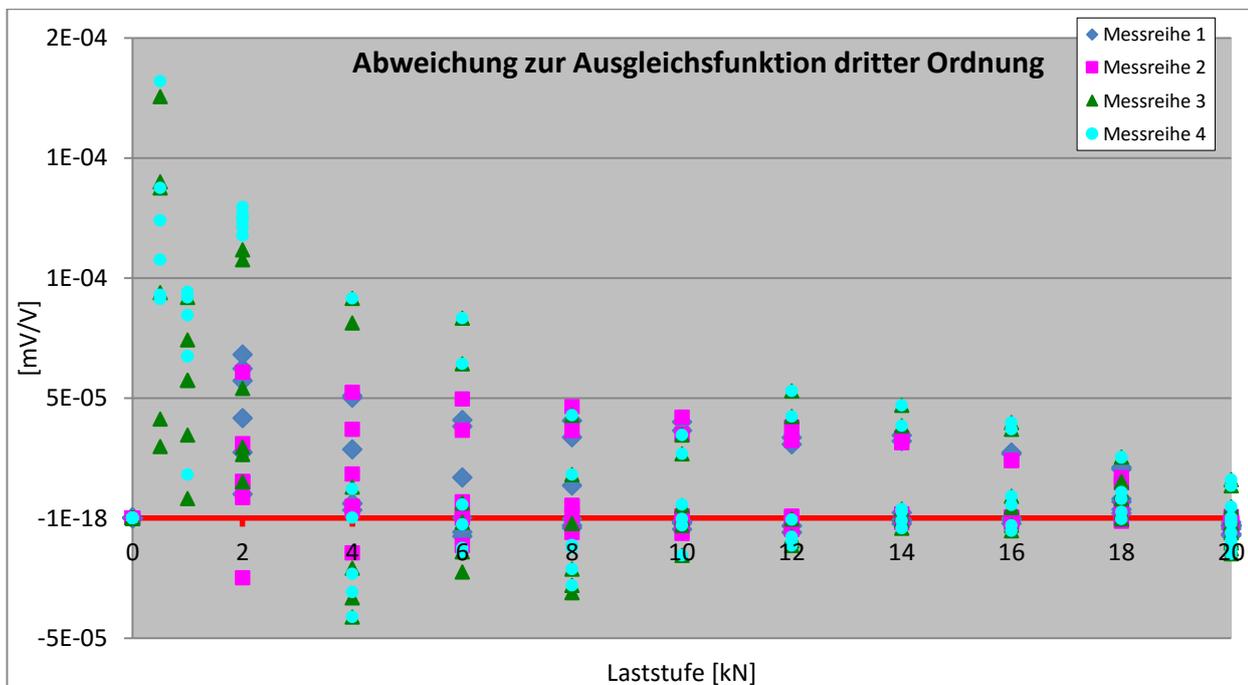


Abbildung 30: Deckungsgleiches Ergebnis unterschiedlicher Laststufen in mehreren Messreihen

Zur Überprüfung der Hebemechanik, der Krafthaltung und des Prüfablaufes bzw. zum direkten Vergleich einzelner Massescheiben mit gleichem Nominalwert wurden mehrere Messabläufe durchgeführt. Die angestrebte Funktionsprüfung der Anlage (hier dargestellt am Beispiel der 250 kN-Totlastanlage) konnte mit diesen Tests erfolgreich abgeschlossen werden. Bei derartigen Funktionstests würden sich Auffälligkeiten bei der Manipulation der Gewichtscheiben, der Arbeitsweise der Krafthaltung, Schwingungen im Gehänge oder mangelnde Schwingungsabsorption der Öldämpfungselemente bemerkbar machen.

Verifizierung des Konzepts

Die Nullpunktfindung gestaltet sich äußerst problematisch, da sich durch die anfängliche Durchbiegung des Waagebalkens der Schwerpunkt des Balkens verändert. Da der Schwerpunkt des Waagebalkens konstruktiv (Fachwerkskonstruktion; Masse: 60 kg) ca. 10 mm unter dem Drehpunkt liegt, muss eine selbst einstellende, stabile Lage möglich sein. Anfängliche Justagen haben auch dieses Ergebnis gebracht, doch zeigte sich in der Verwendung, dass die stabile Position 0 (gemessen durch Laser-Triangulation in Bezug zum Maschinenrahmen) mehr zu einer undefinierten Lage tendiert. Mit eingeschlossen ist das Abkippen und Verweilen in einer der beiden Endpositionen (-2 mm oder +2 mm). Da sich im eingebauten Zustand eine Schwerpunktsbestimmung schwer durchführen lässt, wurde eine gebogene Blattfeder in das Waagebalkensystem so eingefügt, dass sie die Nullpunktfindung unterstützt. In der Ausgangsposition des Systems erfolgt keine Verformung der Blattfeder und somit ist deren Kraftaufbringung null. Aus dieser Position abweichend steigt die Rückstellkraft der Feder degressiv, ein Umstand der durch den äußerst begrenzten Weg des Systems vernachlässigbar ist.

Aufgrund der gestellten Anforderungen ist der Messbereich des Anlageteiles Großkraft von 2 kN bis 250 kN ausgelegt. Das bedeutet, dass eine sinnvolle Aufteilung der einzelnen Messschritte maximal in 200 N-Schritten zu erfolgen hat, um zumindest eine Messreihe konform zur EN ISO 376 [3] durchführen zu können (bei einem Höchstwert von 2 kN sind 10% Schritte, 200 N, obligatorisch). Um die Hysterese der Verformungsmessung in einem Messpunkt bestimmen zu können, wird als kleinste Auflagekraft 50 N realisiert. Bei der Kraft 50 N und der Annahme einer Ungenauigkeit von 1 ‰ wäre das 5 mN und entspräche daher bei der vorliegenden Erdschwere etwa einer Masse von 5,1 g.

Erste Messungen zur Bestimmung der Empfindlichkeit der Waagebalkensysteme wurden mittels herkömmlicher Messuhren durchgeführt. Aufgrund der verhältnismäßig hohen Anstellkraft herkömmlicher Messuhren haben sich diese Messungen aber als nicht besonders aussagekräftig erwiesen. Es hat sich gezeigt, dass die Sensitivität des Gehänges bei einer Masse von 5g einer Auslenkung von etwa 0,1 mm entspricht. Durch die Größe der Anstellkraft der Messuhren bedingt, wurde in weiterer Folge auf die Verwendung gegengleich angestellter induktiver Wegaufnehmer zurückgegriffen.

Zum Minimieren der Einflüsse der Anstellkräfte der Messtaster selbst und somit zur Verhinderung des Verfälschens der zu messenden Verformungen, hat sich als zweckmäßige Anordnungen der Sensoren das gegengleiche Platzieren erwiesen. Dieser Messaufbau wie in Abbildung 31 dargestellt wird in [36] näher beschrieben. Diese gespiegelte Anordnung von bauartsgleichen Messtastern hebt den Einfluss der Anstellkraft der Wegaufnehmer zueinander auf. Eine derartige Wegmessung erfolgte aber nur zu Testzwecken, im Messeinsatz der Anlagen erfolgt die laufende Messung der Position und der Verformung mittels der kontaktlosen Messung durch Laser-Triangulation (siehe auch Kapitel 6.2.1., Verformung und Rückstellkraft).

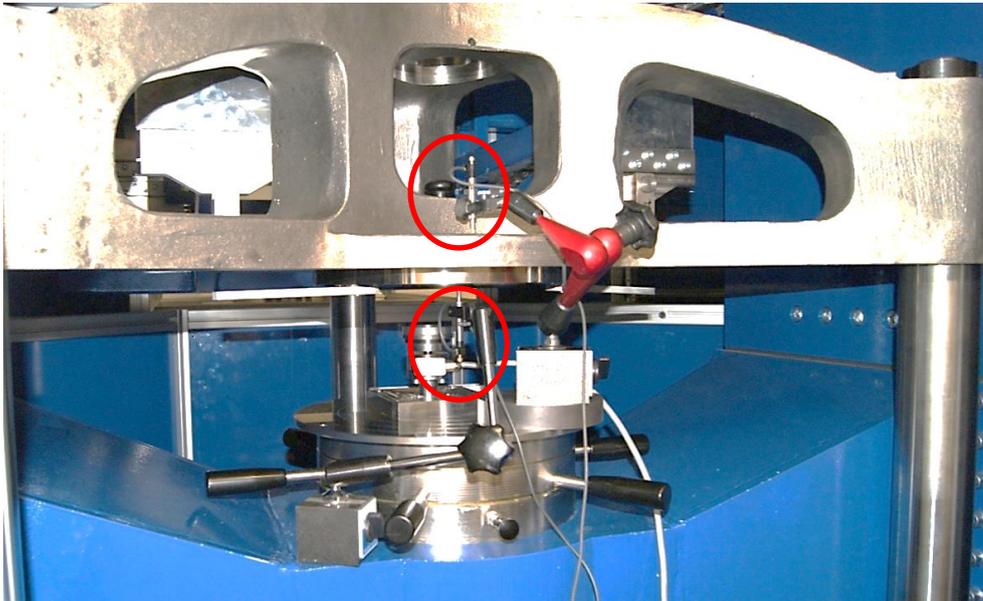


Abbildung 31: Messaufbau zur Ermittlung des Rückstellmomentes der Waagenkonstruktion bei der Arbeitsbrücke [36]

Versuche zeigten, dass eine Änderung der Masseverhältnisse im Waagensystem um 5 g mit dieser Form der Aufhängungen des Waagensystems durch Folien (als Festkörperlager) eine reproduzierbare Auslenkung des Waagensystems (Waagebalken) von 0,12 mm ergab. Zur Ermittlung der Auslenkung wird das interne Messsystem der Laser-Triangulation mit einer verwertbaren Auflösung von 1 μm verwendet. Diese Auslenkung wird durch wiederholtes Aufbringen und Entfernen eines 5 g Gewichtstückes der Genauigkeitsklasse F1 (nach OIML-Rekommandation R111 [39]) verwendet.

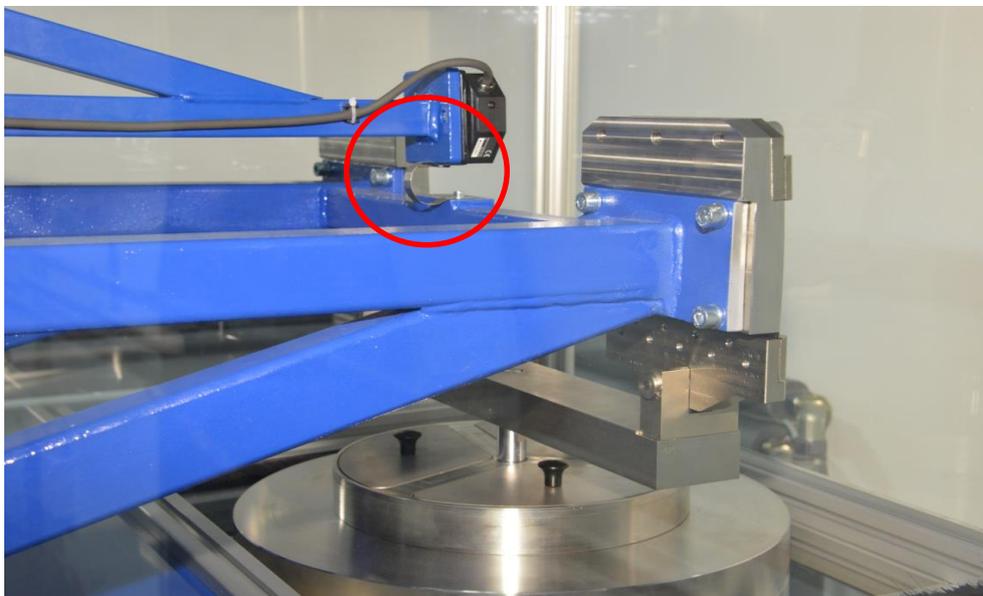


Abbildung 32: Dämpfungsfeder an der Gegengewichtseite der Waagenkonstruktion mit Abstandssensor der 250 kN-Totlastanlage

Versuche mit einer eingebauten Rückstellfeder im Waagensystem ergaben eine Auslenkung von 0,05 mm unter gleichen Bedingungen. Diese Feder verkürzt aber in Kombination mit den Flüssigkeitsdämpfern zur Vermeidung von Schwingungen (siehe 6.1.5, Abbildung 42) die Zeit der Rückstellung des Waagensystems in die Nullposition.

5.3 Aufbau eines Kraftnormalanlagensystems

In einem kooperativen Projekt zwischen dem BEV und dem IFT der TU Wien wurde das entwickelte Konzept mit dem Ziel herangezogen, die Konstruktion für eine derartige Anlage im BEV nach den gesetzten Anforderungen umzusetzen. Dem Konzept folgend, wurde diese primäre Kraftnormalanlage im Messbereich von 5 N bis 5 MN realisiert. Das Ergebnis wurde bereits auf der Internationalen Metrologiekonferenz 2012 bzw. auf Fachtagungen der EURAMET TCM vorgestellt (siehe [34], [35]).



Abbildung 33: Realisierung der Totlastkraftanlagen 2 kN und 250 kN mit der verbundenen hydraulischen 1MN-Maschine [34], [35]

Entsprechend dem Konzept hat die Realisierung dieses 250 kN-Systems zwei unabhängige Einspannbereiche. Auf der einen Seite kann die Kraft in Form von Druck abgeleitet werden, auf der anderen Seite als Zug. Die Realisierung der Kraft ist hier mit Schritten von 50 N im Bereich von 50 N bis zu 250 kN möglich. Die Kraft wird direkt durch Massescheiben realisiert, die alle einzeln, hydraulisch, über spezielle Kupplungselemente manipuliert werden können. Das Transfornormal wird direkt zwischen der Druckplatte eines Kastenrahmens und der Druckplatte des Querhauptes (Arbeitsbrücke) als oberes Ende des Gehängesystems zentrisch positioniert. Von der Druckplatte des Kastenrahmens wird die Kraft direkt über zwei Spindelachsen in das Säulensystem der Anlage abgeleitet. Die Gewichtskraft der Massescheiben wird nun direkt über das Gehängesystem und das Querhaupt in das Transfornormal eingeleitet, wobei das Gehängesystem und somit auch die gekoppelten Massescheiben keine zusätzliche Verbindung zur Kraftnormalanlage aufweisen.

Umsetzung des Konzeptes

Konstruktionsübersicht:

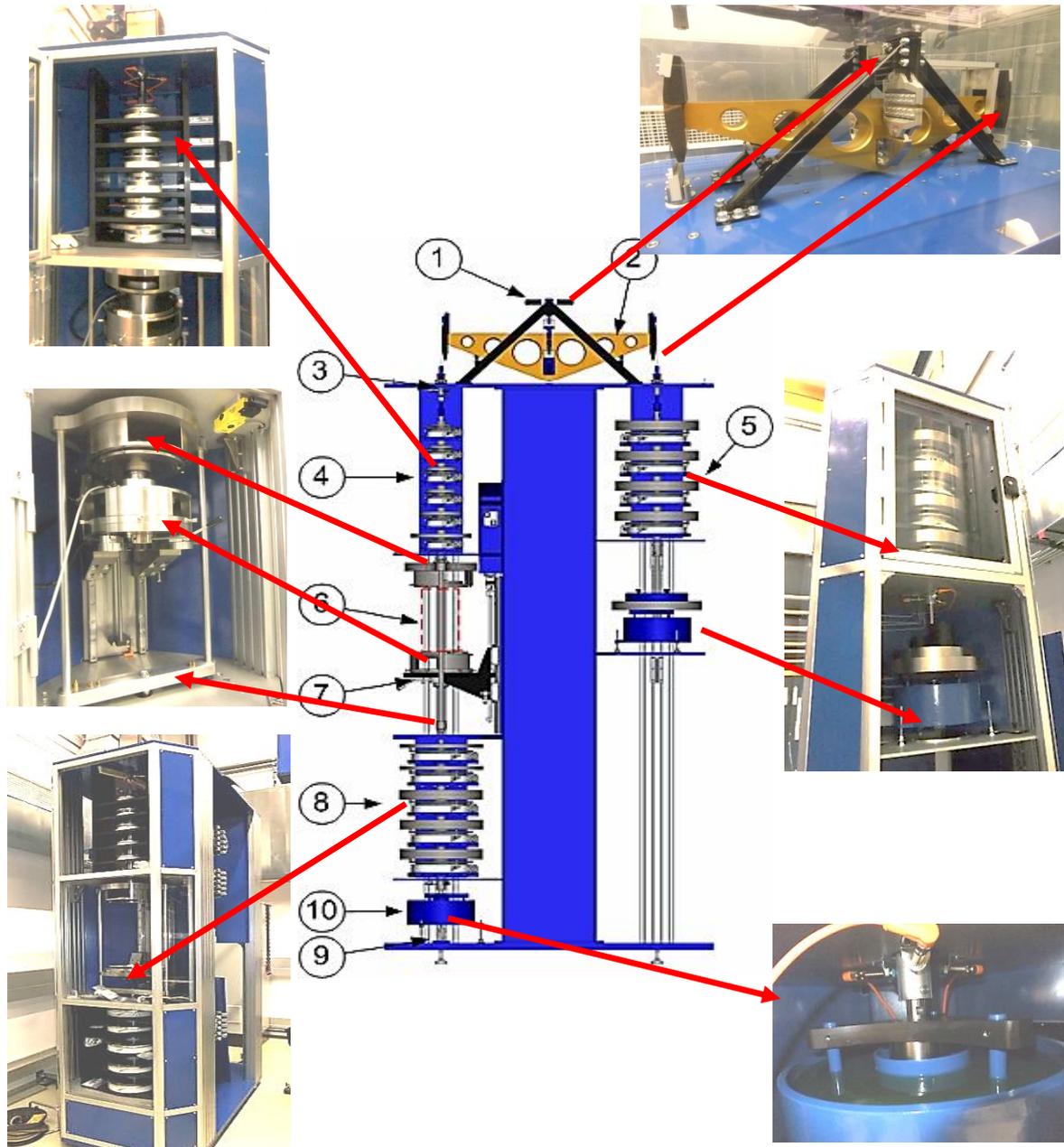


Abbildung 34: Konstruktionsübersicht der 2 kN-Totlastanlage auf Basis einer gleicharmigen Balkenwaage

1. Abstandssensorsystem (Laser-triangular-distance-system)
2. Waagebalken
3. internes Kraftmesssystem zur Steuerung
4. Systemgehänge und 6 Stk. Gewichte von 5 N bis 100 N
5. Transfornormal /Arbeitsraum
6. justierbarer Arbeitstisch mit linearem Achsantrieb
7. 4 Stück Gegengewichte 50 kg
8. Gewichte von 200 N bis 500 N
9. hydraulisches Kraft-Haltesystem
10. Bewegungsdämpfung

Umsetzung des Konzeptes

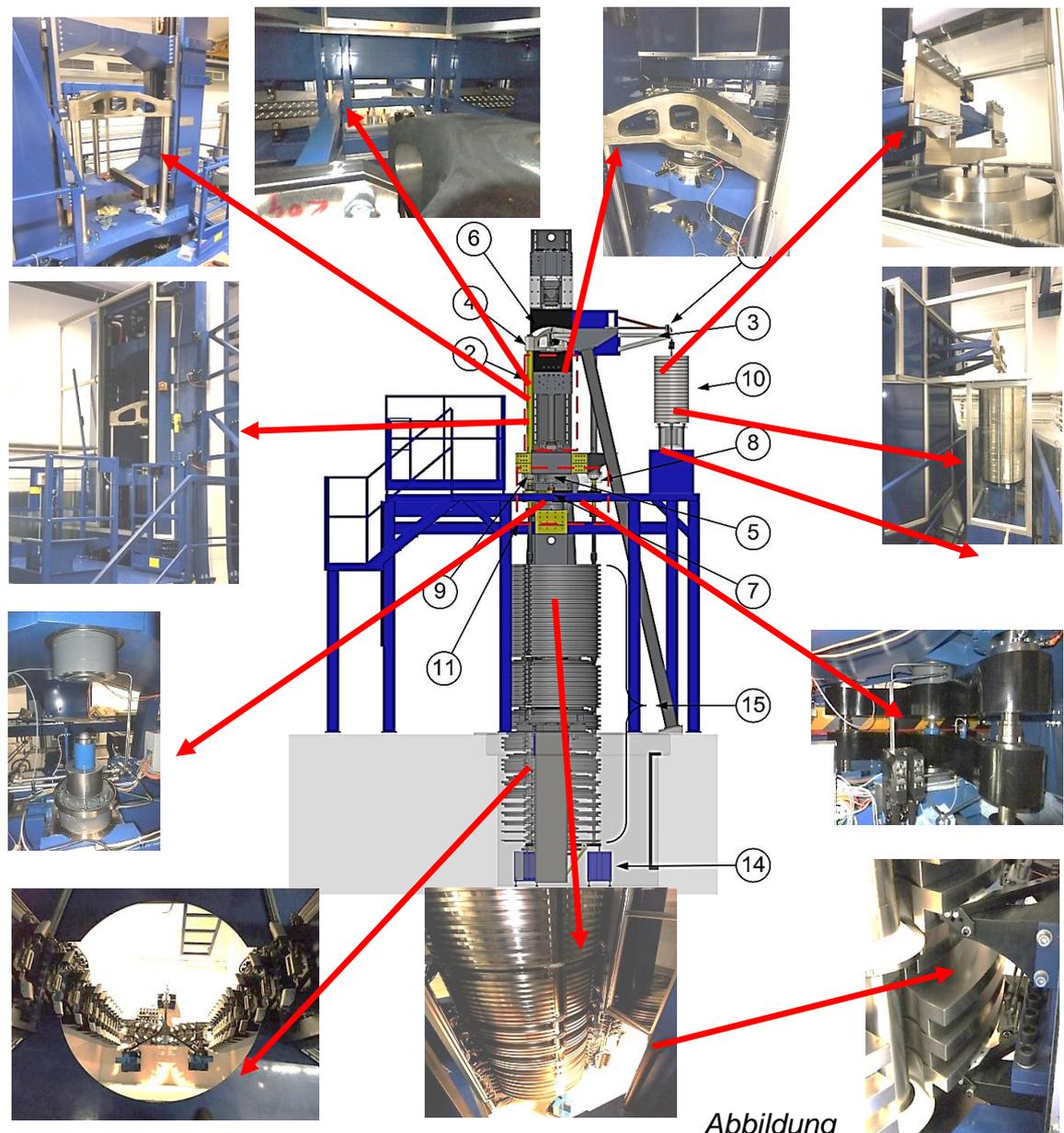


Abbildung
35: Konstruktionsübersicht der 250 kN-Totlastanlage auf Basis einer gleicharmigen Balkenwaage

1. Abstandssensorsystem (Laser-triangular-distance- system)
2. TransfERNormal auf Druck belastet
3. Waagebalken mit Festkörperlager
4. Gehängebrücke mit oberem Gehängeteil
5. hydraulisches Krafthaltesystem
6. justierbarer Kastenrahmen mit Druckplatte
7. Druckübersetzer Hydraulik
8. Koppel-element unterer Gehängeteil – oberer Gehängeteil
9. internes Kraftmesssystem zur Steuerung
10. Gegengewichte 1300 kg
11. Systemgehänge unterer Gehängeteil
12. Gewichtsscheiben mit Halteapparaturen
13. Gewichtsmantipulatoren
14. Pendeldämpfungselemente
15. Gewichtsscheiben von 50 N bis 100 kN

Umsetzung des Konzeptes

Das mechanische Grundprinzip dieser Totlastkraftanlage basiert auf einem Waagebalkensystem. Auf der einen Seite befindet sich das Gehängesystem für die Arbeitsgewichtscheiben und auf der anderen Seite die Gegengewichte zur Kompensation des Eigengewichtes des Gehängesystems. Durch diese Form der Konstruktion und der Kompensation der Gehängemasse ist es möglich, den geforderten Umfang des Messbereiches zu ermöglichen.

Beide Anlagen, sowohl die 2 kN-Totlastanlage als auch die 250 kN-Totlastanlage sind auf einer Säulenkonstruktion aufgebaut. Zentrale Säulen tragen nahezu symmetrisch angeordnet das Waagensystem, die Massen zur Realisierung der Kraft, deren Haltekonstruktionen und zusätzliche Elemente, die für den Messablauf notwendig sind.

Die Hauptlasten werden von einem zentralen Steher bzw. bei dem großen Anlagenteil von zwei symmetrisch angeordneten Säulen getragen. Diese Säulen nehmen zum einen direkt die Massen der Gewichtscheiben auf und zum anderen schaffen sie eine Verbindung zu den verfahrbaren Querhäuptern. Diese bilden die kraftschlüssige Aufnahme der Kraftaufnehmer. Zur Erhöhung der Tragfestigkeit und der Steifigkeit sowie zur verbesserten Dämpfung ist das gesamte Hohlkammernsystem der Tragekonstruktion mit Hydropol gefüllt [36].

Eine Reihe von Sensoren überwacht die Position aller bewegten Teile und trägt so zur Ablaufsteuerung bei.



*Abbildung 36: Konstruktion der Balkenwaage mit Festkörperlager
2 kN-Totlastkraftanlage und 250 kN-Totlastkraftanlage*

Alle bewegten Teile sind mittels Festkörperlager in Form von Dünoblechen verbunden. Abbildung 36 zeigt die Festkörperlager zu den Gehängeteilen, wobei in beiden Bildern der Anschluss zu den Gegengewichten für den Ausgleich des Gehängegewichtes sichtbar sind. Auf jedem der Gegengewichte befinden sich auf dessen Oberseite verschließbare Kammern (siehe Abbildung 32 und Abbildung 36 am Beispiel der 250 kN-Anlage, Deckel mit schwarzen Griffen). Diese dienen für die Anpassung der Masse des Gegengewichtes auf die Masse des Gehänges (Justage der Masse). Zwischen den Festkörperlagern befindet sich der Reflektor und das Laser-Messsystem für die Positionsbestimmung des Waagebalkens (zu erkennen jeweils an der schwarzen Box). Um störende elektrostatische und magnetische Einflüsse zu verhindern, wird der überwiegende Teil der Einhausung beider Kraftanlagen aus Aluminium gefertigt. Glas wird nur dort verwendet, wo es zweckmäßig ist, den Ablauf einer Messung zu beobachten (erfolgte nur bei den Fronttüren der Gewichts-Magazine und der Frontseite der Messkammer). Die äußere Einhausung wird zusätzlich mit Dichtungen und Bürsten zur

Umsetzung des Konzeptes

Abdeckung versehen, um das Eindringen von Staub und den damit verbundenen Einfluss zu verhindern.

Bei Anlagen dieser Größenordnung ist eine Ablaufsteuerung mittels SPS obligat. Die Kommunikation mit dem Bediener-PC (Steuerrechner) und den peripheren Anlagenteilen (Ventile, Sensoren) erfolgt via Ethernet. In der Bedienung als komfortabel hat sich die Verwendung eines Notebooks erwiesen, das mittels WLAN mit dem Steuer-PC kommuniziert.

Nach Einbringung der Transfernormale in den Arbeitsraum können vollautomatische Messzyklen gestartet werden. Diese Vorgehensweise ermöglicht auf der einen Seite eine vollautomatische Kalibrierung entsprechend der ISO-Normen, auf der anderen Seite können für wissenschaftliche Zwecke spezielle Messprogramme gestaltet und sogar in einer Art Einzelschritt-Mode Kräfte realisiert werden. Dadurch ist es möglich, abweichend von Standardkalibrierungen auch spezielle Ablaufanforderungen zu realisieren, die für spezielle wissenschaftliche Untersuchungen und Forschungsprojekte notwendig sind.

6 Verifizierung des Kraftnormalanlagensystems

Das Ziel dieser Arbeit war es, nicht nur eine Methode zu entwickeln, die Anforderungen zur Verwirklichung einer Anlage zur Realisierung der Kraft zu definieren, sondern auch methodisch die Lösungen des entstandenen Pflichtenheftes zu verifizieren. Im ersten Schritt werden die gesetzten Anforderungen dahingehend verifiziert, ob sie geeignet sind, die gestellten Rahmenbedingungen einzuhalten. In einem weiteren Schritt verifiziert man die entwickelten Lösungskonzepte, vor allem die der Kernfunktionen, ob die definierten Anforderungen erfüllt werden. In einem dritten Schritt werden die aus den Konzepten abgeleiteten Lösungen der Konstruktion dahingehend untersucht, ob auch diese die definierten Anforderungen erfüllen. Diese Verifikation der Lösungen dient als Grundlage zur Überprüfung der Einsatztauglichkeit der umgesetzten Lösungskonzepte.

Gemeinsam mit der abschließenden Validierung muss vor der internationalen Gemeinschaft der Metrologen der Nachweis erbracht werden, der die Eignung der Anlage unter den offengelegten Bedingungen belegt. Vereinfacht gesagt ist der Beweis zu erbringen, dass nicht nur die realisierte Kraftnormalanlage, sondern alle verwendeten Lösungsmethoden den Anforderungen entsprechen.

Durch Zusammenführung und Interpretation der Messergebnisse wird die Prozessfähigkeit der neuen Anlage belegt. Zur Darstellung der Ergebnisse wurde dabei auf anerkannte Werkzeuge der Metrologie zurückgegriffen.

6.1 Verifizierung technischer Konstruktionslösungen

6.1.1 Messtechnischer Arbeitsraum

Als messtechnischer Arbeitsraum wird der zur Verfügung stehende Hub des Querhauptes des Gehänges zwischen den Endpositionen definiert. Die untere Endposition ergibt sich durch die Begrenzung des Tellerfeder-Paketes (sicherheitstechnische Einrichtung zur Abfederung des Gehänges und der Gewichte im Notfall, z.B. Bruch eines Transfernormals). Die obere Endposition ergibt sich schlicht durch die Anschlagpuffer des Gegengewichtes bzw. durch die Hubbegrenzung des Gehänges (entspricht dem oberen Anschlag zur Realisierung der Krafthaltung bei Verwendung der gekoppelten hydraulischen Maschinen).

Die Festlegung des Arbeitsraumes erfolgte in erster Linie aus sicherheitstechnischen Aspekten in Abhängigkeit konstruktiver Möglichkeiten. Zum einen ist die ungehinderte und freie Beweglichkeit des gesamten Gehängesystems während der Messung zu gewährleisten, zum anderen ist im Falle des Bruches eines Bauteils der Gewichtaufnahmekonstruktion oder auch des Versagens eines Transfernormals (z.B. Kraftsensorbruch) durch die konstruktive Gestaltung der Kontaktflächen vor allem zu den Gewichten und zu den Koppelstellen des Gehänges der freie Fall der Gewichtscheiben zu verhindern. Alle Koppelstellen sind selbstzentrierend durch einen 45° Aufnahmekegel ausgeführt. Dadurch ist eine maximale Bewegungsfreiheit des Gehänges zu allen feststehenden Teilen wie Gewichten, Führungen, Sensoren und entkoppelten Gehängeteilen gegeben. Diese entspricht in allen Richtungen dem Hub des Gehänges. Daher ergibt sich im Betrieb bei einem verhältnismäßig geringen Hub ein ausreichend großer Abstand der bewegten Teile zu deren Umgebung.

Als eine realisierbare Freifahrtshöhe (entspricht dem Anfangsabstand zwischen dem in Position gebrachten Transfernormal vor der Messung und dem Querhaupt des Gehänges)

Verifizierung des Anlagensystems

wird 2 mm festgelegt. Diese obere Position ist als Ausgangs-Messposition definiert. Sie wird als Position 0 des Arbeitsraumes definiert. An dieser Stelle hat sich der Nullpunkt des frei beweglichen und ausgeglichenen Waagensystems (Gehänge, Balken, Gegengewicht) zu befinden. Da der gesamte zur Verfügung stehende Arbeitsraum etwa 4 mm beträgt, beginnt der messtechnische Arbeitsraum somit bei einer Position - 2 mm und endet in der oberen Position + 2 mm. Diese obere Position entspricht der Justage der Anschläge des Gegengewichtes.

Die Auslegung des Tellerfederpaketes erfolgte daher auch zur Abfederung unter der Annahme über den Weg von 2 mm frei fallender Masse von 26 t. Dieser Umstand würde im Fall eines Bruches eines Bauteiles oder bei Sensorbruch eintreten.

Durch diesen zur Verfügung stehenden Arbeitsraum wird auf der einen Seite eine ungehinderte Messung des unbelasteten Kraftnormals und auf der anderen Seite die ungehinderte Möglichkeit von Ausgleichsbewegungen durch die Verformungen unter der Lastaufbringung ermöglicht. Die Begrenzungen des Arbeitsraumes sind konstruktiv so gestaltet, dass es zu keiner Überbeanspruchung von Teilen des bewegten Waagensystems bei belastetem Kontakt kommt.

6.1.2 Einspannung Zug 2 kN-Anlage

Ein spezielles, durch die Anforderung des durchgehenden Messbereiches von Druck auf Zug entstandenes Problem ergibt sich durch die fehlende Möglichkeit der herkömmlichen Einspannung von Zugsensoren in der 2 kN-Totlastanlage. Während bei der 250 kN-Totlastanlage und bei jeder herkömmlichen Einspannung der Zugsensoren der Kraftsensor selbst am fixen Teil der Anlage hängend befestigt wird, trägt hier das schwebende Gehänge die Last des Großteils der Einspannteile und des Kraftsensors selbst. Das Eigengewicht des Kraftsensors wird in der Regel bei mechanischen Anlagen vom Maschinenrahmen übernommen und nur der Teil des Sensors geht in das Nullsignal ein, der der krafteinleitenden Seite zugewandt ist. Als Einspannteile verwendet man (bei kleineren Kräften) vorwiegend Ringösen oder kleine Kugelkalotten. Mit dieser „offenen“ Einspannung erhält man bei Vergleichsmessungen sehr gute, reproduzierbare Messergebnisse.

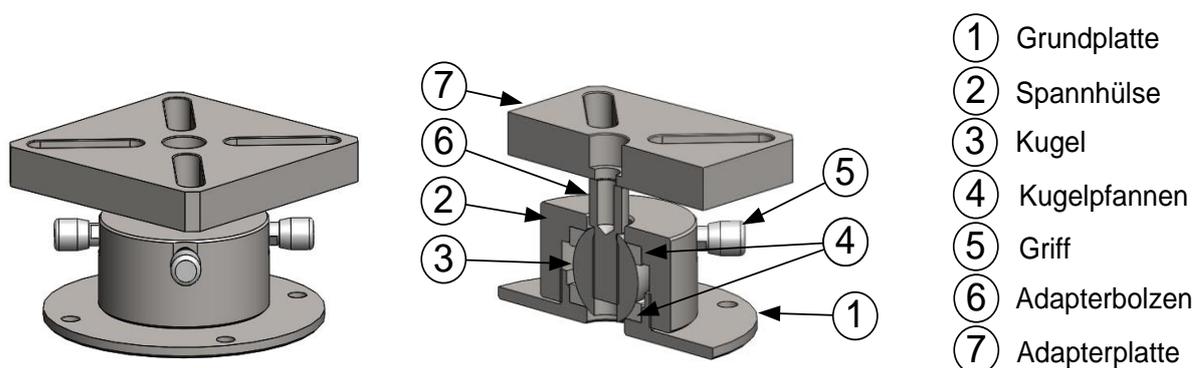


Abbildung 37: Einspannvorrichtung Zug-Druckmessung [36]

Bei dieser Anlage ist durch die spezielle Kraftaufbringung eine offene Lösung der Einspannung mit Ringösen nur bedingt möglich. Die Problematik liegt hier darin, dass sich das gesamte Eigengewicht des Kraftsensors am bewegten Gehängeteil auswirkt und somit tariert werden muss. Dies ist zwar mit einigem Aufwand möglich, allerdings ist der

Verifizierung des Anlagensystems

Einfluss des Sensorkabels eine unkalkulierbare kraftübertragende Verbindung zwischen bewegten Anlagenteilen und dem Maschinenrahmen. Als Abhilfe wird hier in Form einer direkten Verschraubung bei der Einspannung der Kraftsensoren eine gänzlich andere Lösung der Einspannung versucht. Eine direkte Verschraubung zwischen Sensor und Maschine kommt erstens auch in der industriellen Verwendung zum Einsatz und zweitens eliminiert sie das Eigengewichtsproblem des „schwebenden Kraftsensors“. Zum Einsatz kommt eine verspannbare Kugellösung (siehe Abbildung 37), die über eine zentrische Verschraubung das Eigengewicht des Sensors in Druckrichtung aber auch in Zugrichtung übernimmt. Die erzielten Messergebnisse weisen eine sehr gute relative Vergleichspräzision und eine ebenfalls sehr gute relative Wiederholpräzision auf. Eine besondere Herausforderung liegt hier aber in der direkten Vergleichbarkeit der erzielten Ergebnisse mit jenen Messergebnissen, die in bestehenden Anlagen mit herkömmlicher, offener Einspannung erzielt worden sind. Bei diesen erzielten Ergebnissen ist die absolute Differenz größer als die zu erwartende relative Unsicherheit.



Abbildung 38: Methode der direkten, kugelgespannten Einspannung von Kraftsensoren und Verwendung von Stahlspitzen zur Kraftübertragung

Bei der 2 kN-Totlastanlage ergibt sich auch die Möglichkeit einer Methode der Kraftübertragung, wie sie bei kleinen Kräften < 100 N in Druckrichtung öfters angewendet wird. Entgegen der üblichen Verwendung von Kugelkalotten zum Momenten-Ausgleich empfiehlt sich hier die Verwendung einer gehärteten Stahlspitze zur zentrischen Krafteinleitung. Wie die Praxis zeigt, reduziert die Verwendung einer Kombination aus Stahlspitze und eines Aufnahmestückes mit einer Zentrierbohrung die Streuung der Messergebnisse. Die Sockelplatte des Kraftaufnehmers wird dabei direkt am Arbeitstisch aufgestellt. Auch hier zeigt die Praxis, dass bei Vergleichsmessungen die Verwendung derselben Sockelplatte notwendig ist, da die Masse und die Art der Sockelplatte das Ergebnis der Kraftwerte beeinflussen.

6.1.3 Einhausung und thermische Entkopplung

Zur Bestimmung der Umgebungsparameter, und damit verbunden zur Bestimmung von Temperaturkorrekturen bzw. der Luftdichte und damit der Luftauftriebsverhältnisse während der Messung am Transfornormal, befinden sich sowohl in der Messkammer bei der Totlastanlage als auch in den Magazinen der Massescheiben mehrere Temperatur-Feuchtesensoren. Damit ist es möglich, vor allem die Lufttemperatur während der Messung zu bestimmen und somit einer Temperatur des Transfornormals zuzuordnen.

Verifizierung des Anlagensystems

Zur generellen Aufzeichnung von Lufttemperatur und Feuchte sowie bei der Verwendung der hydraulischen Anlagen ist im Kraftlabor ein zentraler Sensor angebracht.

Eine besondere Problematik ergibt sich aus der Temperaturänderung. Diese wirkt sich bei den Gewichten in erster Linie nicht durch die Volumenänderungen aufgrund des Ausdehnungskoeffizienten aus (diese wird korrigiert), sondern die Temperaturänderung löst pulsierende Konvektionsströme in den abgeschlossenen Räumen der Gewichte aus die Störeinflüsse verursachen. Da alle Gewichtsscheiben große Angriffsflächen für Luftbewegungen bieten, erschweren die sich unregelmäßig entladenden Konvektionsströmungen ein Stabilisieren des Messwertes. Wegen einer nicht zu vermeidenden Schichtung der Temperatur über die Höhe der Anlage werden die Gewichtsmagazine durch Trennplatten in möglichst viele Bereiche gegliedert, um einen nicht zu kontrollierenden Luftaustausch möglichst zu minimieren. Damit werden resultierende Konvektionsströmungen und die damit verbundenen Störgrößen auf die bewegten, krafterzeugenden Anlageteile vermieden. Besonderes Augenmerk wird nicht nur auf die äußere Einhausung gelegt, sondern auch auf systematische, regelmäßige thermische Entkopplung und Trennung des Innenlebens der Anlage. So ist innerhalb der äußeren Einhausung eine Reihe von Kammern und Kanälen (Sektionen) vorgesehen, die diese systematische Trennung des Innenlebens der Anlage zur thermischen Entkopplung gewährleisten. Durch durchgehende Anlagenkomponenten (z.B. Gehänge) ist eine Ausgleichsströmung nicht gänzlich zu verhindern. Als zweckmäßig hat sich erwiesen, Leitbleche so anzubringen, dass nicht zu verhindernde Strömungen von allen Angriffsflächen bewegter Teile abgeleitet werden. Dabei stand im Vordergrund, alle wärmeproduzierenden Komponenten so zu platzieren bzw. einzuhausen, dass eine Abfuhr der Wärme möglichst ohne Einfluss auf andere Anlagenteile möglich ist. Räumlich getrennt wird dabei nicht nur der Messraum, sondern auch die Teile der Anlage, in denen sich die Arbeitsgewichte befinden. Eine besondere Herausforderung ist es, die Wärmeabfuhr der Linearachsen (insbesondere die des Antriebmotors) zu gewährleisten, da durch die zwingende direkte Platzierung im Messraum eine Absaugung nicht möglich ist.

Anders sieht es bei dem Temperaturverhalten im Messraum selbst aus. TransfERNormale werden in der Regel bei 21 °C gemessen bzw. die Messergebnisse verglichen. Sollte die Messtemperatur um mehr als 1° C von diesen Vorgabewerten abweichen, so ist ein Vergleich mit anderen Messergebnissen innerhalb der Toleranz der angestrebten relativen Messunsicherheit von $2 \cdot 10^{-5}$ nicht mehr möglich. Obwohl TransfERNormale durch die Hersteller mit einer sensorinternen Temperaturkompensation ausgeführt sind, hat die Praxis gezeigt, dass sich große Abweichungen in den Ergebnissen ergeben, und dass es dadurch zu einer erschwerten Vergleichbarkeit kommt.

Messtechnisch ist es schwierig, die Unsicherheitsbeiträge aus der Wärmeabgabe der einzelnen Komponenten wie Hydraulikventile, Stellmotoren, Wärmeabstrahlung von Oberflächen innerhalb der Anlage sowie Wärmeabstrahlung aus der Umgebung, zum Beispiel durch Licht, zu erfassen. In Kenntnis der relevanten Faktoren ist eine konstruktive Lösung zur Minimierung der Einflüsse vorzuziehen. Messtechnisch wird dann die Abhängigkeit der Temperaturänderung durch den Betrieb als Gesamtes erfasst. Die in der Anlage implementierten Temperaturmesssensoren, die zur Berechnung des Luftauftriebes der Gewichtsscheiben erforderlich sind, wurden während der Inbetriebnahme der Anlagenteile für diese Temperaturüberwachung herangezogen. Dabei

Verifizierung des Anlagensystems

werden routinenaher Messreihen durchgeführt und die thermische Veränderung in jedem Anlagenabschnitt aufgezeichnet. Als Ergebnis dieser Untersuchung zeigte sich vor allem bei der 2 kN-Totlastanlage ein Temperaturanstieg in der Messkammer von 1,5 °C über eine Messzeit von 8 Stunden. Bei der 250 kN-Totlastanlage betrug der Wert aufgrund der Größe der Messkammer nur etwa 0,7 °C. Als Hauptursachen haben sich in beiden Fällen die Abwärme der Linearachsen-Antriebe (Servomotoren) und die Strahlungsenergie, die über die Laborbeleuchtung (Gasentladungslampen) eingebracht wird, herausgestellt. Als Lösung wurde für die Laborbeleuchtung eine energiearme LED-Beleuchtung installiert. Bei der 2 kN-Totlastanlage wurde eine ventilatorbetriebene Zwangsentlüftung des Linearachsenantriebes vorgenommen, deren Luft von der Rückwand der Messkammer angesaugt wird und somit auch diese Oberfläche kühlt, ohne aber in der Messkammer selbst einen Luftzug zu verursachen. Bei der 250 kN-Totlastanlage reichte eine Absaugung der Stauluft über den Motoren und deren Abführung nach außen. Die auf die Umsetzung folgenden Messungen haben ergeben, dass ein Temperaturanstieg in der geschlossenen Messkammer in beiden Fällen nur mehr um 0,2 °C in den ersten 30 Minuten nach Messstart erfolgt. Danach stellt sich eine zeitliche Konstanz in der Temperatur von weniger als 0,1 °C ein. Damit ist es möglich, nach der Aufwärmphase über die Raumklimatisierung von 20,8 °C \pm 0,1 °C (Klimaanlage des Labors) eine Messtemperatur von 21 °C zu gewährleisten.

Als Einflussfaktor für die Messunsicherheitsbetrachtung wird daher nur der Unsicherheitsbeitrag herangezogen, der sich aus der Temperaturmessung der Lufttemperatur selbst ergibt. Bei den verwendeten Temperatur-Feuchtesensoren beträgt dieser Wert etwa 30 mK.

6.1.4 Gehängeschwingung und Gehängedämpfung

Eine zu erfüllende Anforderung an eine Konstruktion war die Minimierung des Pendelverhaltens bei Lastwechsel, da die Erfahrung mit anderen Kraftmessmaschinen gezeigt hat, dass Pendelbewegungen die Reproduzierbarkeit der erzielten Verformungswerte deutlich beeinflussen. Die Problematik ist, dass aufgrund von Bewegungen (niederfrequente Schwingungen) des Gehänges während der Messung kein stabiles Messsignal zustande kommt. Schwingungen im Gehänge bedeuten einen wechselnden Winkelfehler am TransfERNormal, und somit entsteht ein streuendes Messergebnis. Erfolgt eine Abnahme der Messergebnisse erst nach einer Beruhigung der Pendelbewegungen, so ist kein präziser, an Zykluszeiten gebundener Messablauf möglich. Wie sich aber zeigt, ist aufgrund der Drift der Kraftnormale ein ganz exakter, zeitlich gebundener Messablauf notwendig, um die Verformungswerte vergleichbar zu machen. Eine Berücksichtigung von unbestimmten Beruhigungszeiten ist in dieser zeitlichen Ablaufbindung nicht vertretbar und in einem automatischen Betrieb nicht kalkulierbar. Daher ist beim Ablauf eines jeden Lastwechsels (Wechsel der Belastungskörper) darauf zu achten, dass möglichst geringe Positionsveränderungen im gesamten Gehängesystem zustande kommen und diese gegebenenfalls sofort gedämpft werden um Wechselzeiten zu minimieren.

Bei dem erfolgten Zusammenbau des Gehänges sind die Justage der axialen Ausrichtung des Gehänges sowie dessen symmetrische Ausbildung von fundamentaler Wichtigkeit. Sollten hier, bedingt durch Fertigungstoleranzen, Asymmetrien im Gehänge vorliegen, ist durch die Veränderung des Gesamtschwerpunkts während eines

Verifizierung des Anlagensystems

Lastwechsels eine Bewegung des Gehänges unausweichlich. Die Auslenkung der Gewichte und des Gehänges entsteht in erster Linie durch die Schwerpunktsveränderung unter dem Drehpunkt.

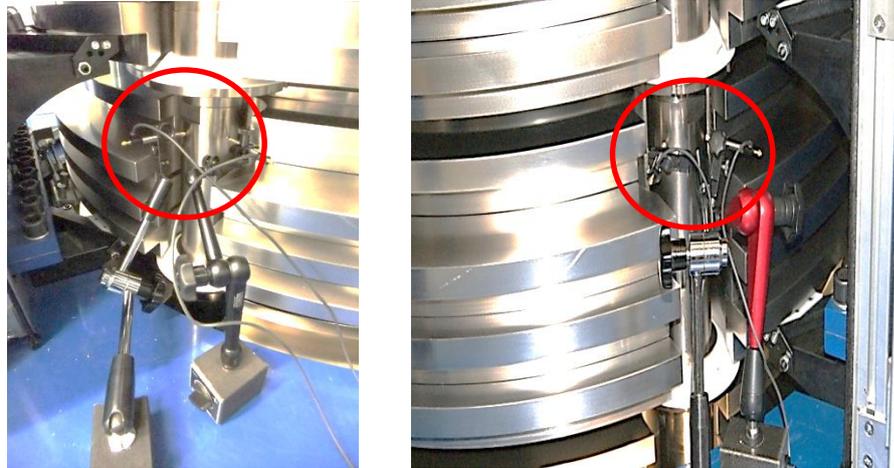


Abbildung 39: Überprüfung des Pendelverhaltens mit induktiven Wegaufnehmern [36]

Da es sich bei dem Gehänge um eine verschraubte Konstruktion einzelner Drehteile handelt, ist eine Justage der Einzelteile zueinander (z.B. durch geschliffene Distanzringe) eine der Hauptaufgaben der Montage. Eine Bewegungsmessung im Gehänge gibt dabei Auskunft über die Wirksamkeit der Justage. Mittels induktiver Wegmesssysteme an den Streben des Gehänges lassen sich Bewegungen in zwei Richtungen detektieren (siehe Abbildung 39 und Abbildung 40). Das Ergebnis eines kompletten Lastwechsels (unbelastet - 20 kN-Scheibe - unbelastet) mit Krafthaltung wird in Abbildung 40 gezeigt. Dabei ist die Bewegung in zwei Richtungen X und Y dargestellt. Das Ergebnis zeigt, dass über die Anlagenhöhe der 250 kN-Anlage in einem Abstand von etwa 5 m vom Drehpunkt (Arbeitsbrücke - Einspannung Kraftsensor) das Gehänge um etwa 1 mm ausweicht, sofort aber wieder nach Beendigung des Lastwechsels in seine Ausgangsposition zurückkehrt.

Die Behebung der Auslenkung ist eine Frage der Justage des Gehänges und der Schwerpunktsjustage der Massescheiben.

Betrachtet man einen Lastwechsel im Detail, lässt sich reproduzierbar die Bewegung des Gehänges nachvollziehen. Diese Pendelbewegung ergibt sich aus den unterschiedlichen Kraftschlüssen bei einem Zusammenspiel der mechanischen Übernahme der Belastungskörper auf das Gehänge und der hydraulisch geregelten Krafthaltung des Systems. In Abbildung 40 ist nicht nur die Bewegung während eines einzigen Lastwechsels ersichtlich, sondern es wird neben der Entkopplung des Gehänges vom Kraftsensor (etwa bei 45 Sekunden) und dem Aufbringen der Massen (bis 80 Sekunden) auch die Wirksamkeit der Dämpfung nach Aufbringen der Massen (etwa bei 83 Sekunden) gezeigt.

Im Diagramm zeigt sich nach Entkopplung der Krafthaltung und somit dem abgeschlossenen Wechselzyklus (ab 125 s) auch die Reproduzierbarkeit der Ausgangsposition. Diese wird durch diverse anlageninterne Sensoren während der automatischen Messungen überwacht, da sich daraus zusätzliche Informationen über

Verifizierung des Anlagensystems

das System ergeben, wie z.B. ob eine Anlage (Kontakt) des Gehänges vorliegt und es folglich zu Reib- oder Querkräften kommt.

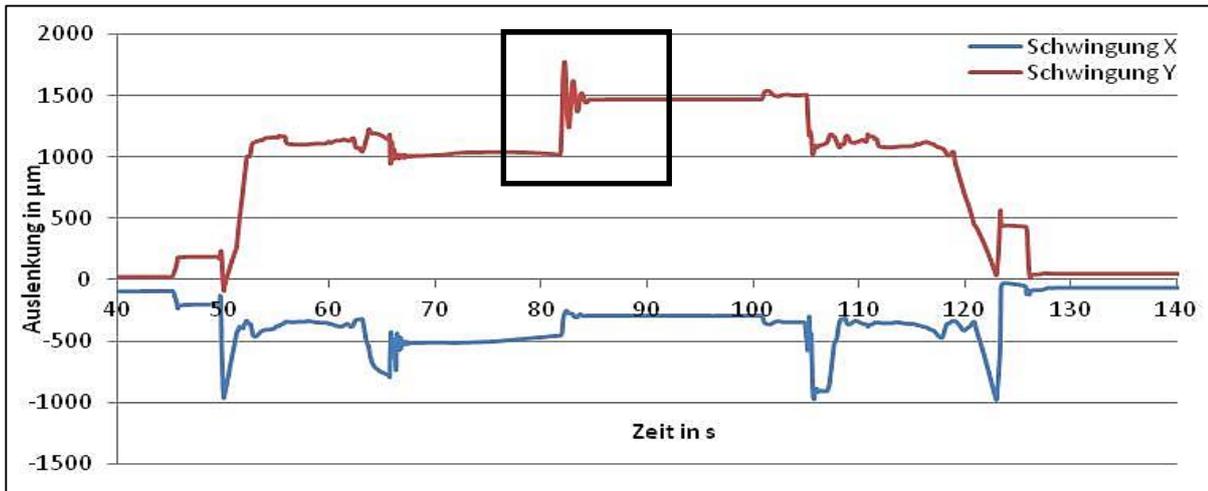


Abbildung 40: Detailbewegung des Gehänges bei Lastwechsel [36] Ausschnitt im Detail in Abbildung 41

6.1.5 Pendeln der Gewichte



Abbildung 41: Dämpfung des Gehänges bzw. der Massescheiben [36]

Von entscheidender Bedeutung ist die Wirksamkeit der Dämpfung jeder Pendelbewegung. Vergrößert man in Abbildung 40 die entsprechende Stelle (z.B. um Sekunde 83) der Lastübergaben, so erhält man positionsunabhängig eine gedämpfte Schwingung durch das Ausrichten des Gesamtschwerpunktes.

Abbildung 42 zeigt den Aufbau eines Flüssigkeitsdämpfers am Gehänge. Z.B. werden durch normal aufeinander angeordnete Bleche, oder wie im Bild durch einen Zylinder in einem hochviskösen Öl, Schwingungen in X und in Y Richtungen gedämpft, während der Dämpfer das Heben und Senken der Gewichte nur minimal beeinflusst. Das Prinzip dahinter ist, dass die in der Skizze der Abbildung 42 grau dargestellten Teile (der Dämpfungsring, die Verbindungsstangen und das Gehänge) starr miteinander verbunden sind und daher in jeder Richtung der Schwingung entgegengestellte Kräfte übertragen werden können. Die Ausführungen der Behälter in Kreuzform oder in Ringform erfolgt nur zur Reduktion der benötigten Menge an Öl [36].

Verifizierung des Anlagensystems

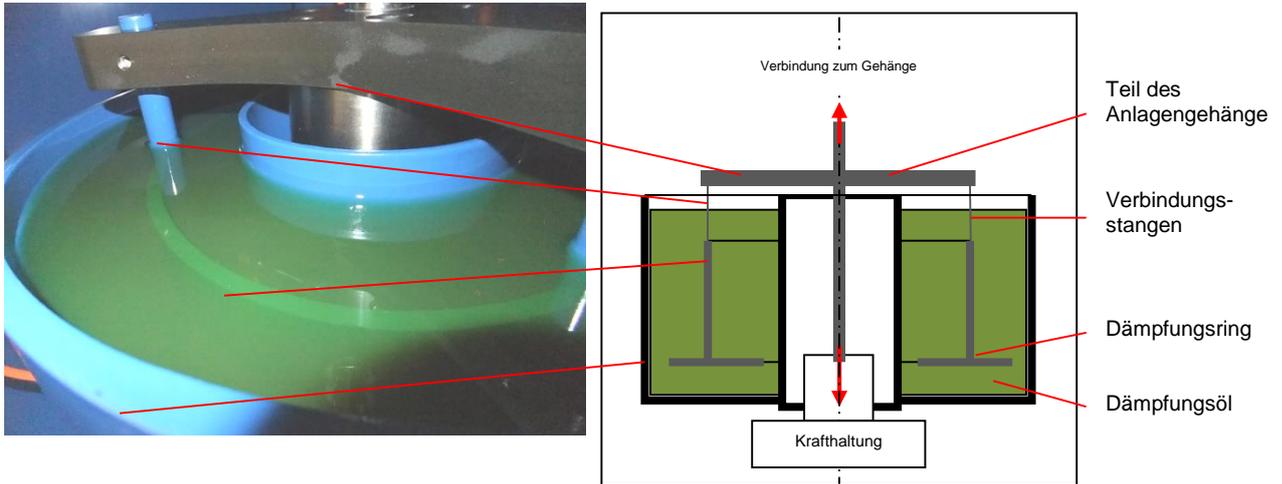


Abbildung 42: Flüssigkeitsdämpfer für Pendelbewegungen

Die Erfahrungen über die Anwendung dieser Öldämpfer kommen aus den Anwendungsgebieten der hydrostatischen Flüssigkeitsdichtemessung [40] und liegen darin, dass zum einen die Wirkung der Dämpfung von der aufgebrachten Last unabhängig ist und zum anderen zumindest in diesem Anwendungsfall der Einfluss in axialer Richtung durch die unterschiedliche Benetzung und die unterschiedliche Ausbildung des Meniskus der Flüssigkeit um die Verbindungsstange vernachlässigt werden kann. Geht man davon aus, dass auf einer Fläche von 125 mm^2 (Umfang der Haltestangen mal dem Hub von 2 mm) Öl einer unbestimmten Menge anhaftet, so ergibt eine Abschätzung der Masse der zusätzlich am Gehänge anhaftenden Flüssigkeitsmenge einen Wert von 40 mg bei einer Dichte von 800 kg/m^3 pro Dämpfer. Gesamt betrachtet bedeutet das, dass in Abhängigkeit des Durchmessers der Koppenelemente bei der 2 kN-Anlage der maximale Massefehler 40 mg und bei der 250 kN-Anlage bei drei Dämpfern 0,12 g nicht übersteigt. In Anbetracht der zum Eingriff kommenden Massen ist dieser Wert zu vernachlässigen.

6.1.6 Impulsdämpfung

Ein weiterer wichtiger Punkt, der als Anforderung festgelegt wurde und daher einer näheren Betrachtung zu unterziehen ist, ist eine Beschreibung des Verhaltens der Anlage bei impulsförmigen Einflüssen. Da eine völlige Impulsfreiheit nicht garantiert werden kann (z.B. Schalten von Ventilen), wurde bei der Konstruktion besonders auf das Dämpfungsverhalten der gesamten Anlage geachtet. Zur Überprüfung dieses Dämpfungsverhaltens wurden mittels eines Schwingungssensors an mehreren Punkten der Anlage Messungen durchgeführt. Bei der Schwingungsmessung am Grundgestell können während eines Routine-Messablaufes keine relevanten impulsförmigen Auslöser für Schwingungen festgestellt werden. Durch Messungen sind nur geringe Impulse durch das Schalten der Ventile beim Lastwechsel der Belastungskörper feststellbar, die jedoch rasch abklingen.

Zur Demonstration der Dämpfungseigenschaften des Grundgestells wurden an mehreren Anlagenteilen in die Struktur Impulse mittels eines Hammers eingeleitet. Die Impulse wurden von einem Beschleunigungssensor aufgezeichnet und das Dämpfungsverhalten beurteilt.

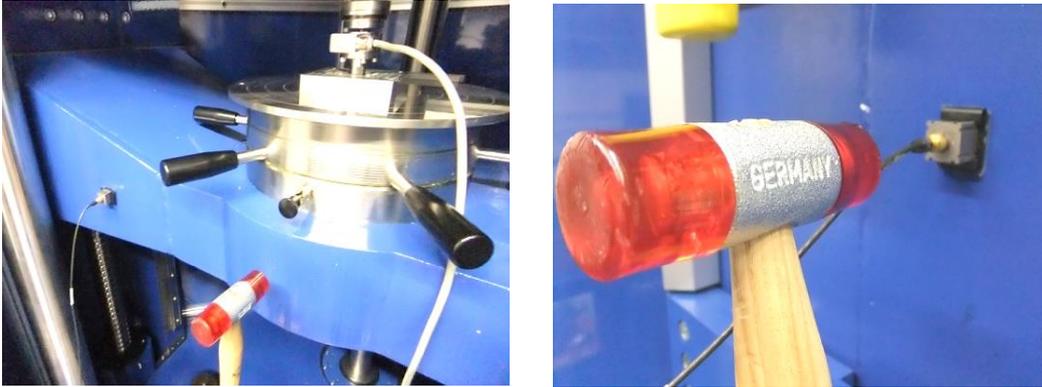


Abbildung 43: Einleitung eines Impulses zur Analyse der Schwingungsdämpfung mittels Beschleunigungssensoren am Arbeitsrahmen und am Grundsteher

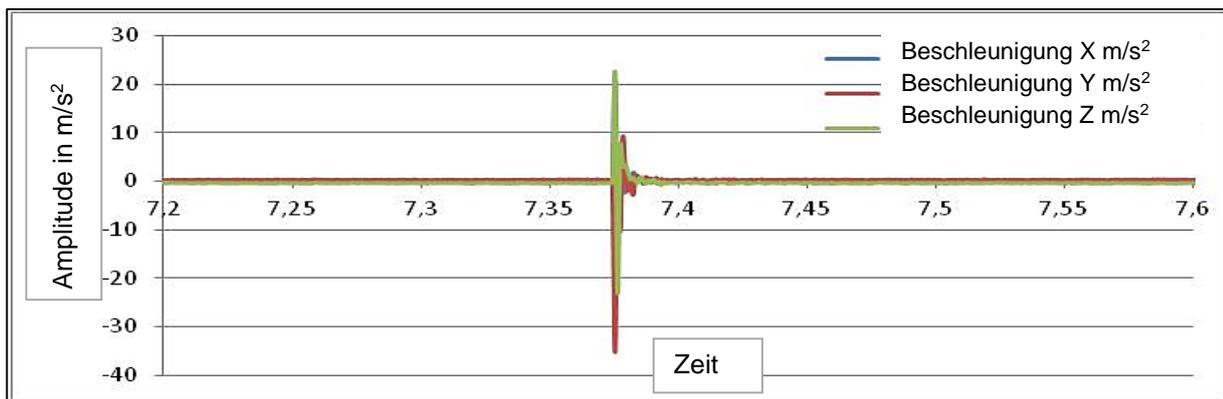


Abbildung 44: Dämpfungscharakteristik des Grundstehers [36]

Wie in [36] beschrieben, ist der Impuls im Fall der Grundstruktur bereits nach wenigen Schwingungen nicht mehr feststellbar, wobei die Dämpfung durch die Hydropolfüllung der Stahlkonstruktion überzeugte.

Im Zuge der Schwingungsmessungen wurden auch Überprüfungen auf Wirksamkeit der Entkoppelung zwischen der 250 kN-Totlastanlage und der Bedienungsplattform durchgeführt. Diese Information ist relevant, um den Einfluss des Bedieners durch die Einbringung von Vibrationen während der Anwesenheit auf der Bedienerplattform abschätzen zu können. Dazu wurden Beschleunigungssensoren an der Anlage positioniert und auf der Bedienungsplattform verschiedene Impulse gesetzt. Bei den Messungen konnte keine messbare Übertragung von Vibrationen oder Impulsen von der Seite des Bedieners (Erschütterung auf der Bedienerseite) auf die Konstruktion der Kraftnormalanlage nachgewiesen werden.

6.1.7 Verformung von Kernbauteilen

Verformungen in den Anlagen sind konstruktiv nicht zu vermeiden und stellen kein Problem dar, solange sich keine Abweichungen von der Symmetrieachse zeigen und sie sich während der Messung nicht verändern. Im Zuge erster Funktionsprüfungen wurde eine Reihe von Messungen an beiden Anlagen vorgenommen, bei denen vor allem die Verformungen betrachtet worden sind.

Zur Bestimmung der symmetrischen Deformation werden in [36] eine Reihe von Messungen zur Bestimmung der Verformung unter wechselnden Lasten durchgeführt und beschrieben. Aufgrund der ausreichenden Dimensionierung der Anlagenrahmen-

Verifizierung des Anlagensystems

und Säulenkonstruktion sind die in Bezug auf störenden Verzug gefährdeten Bauteile in den bewegten und den krafteinleitenden Teilen zu suchen.

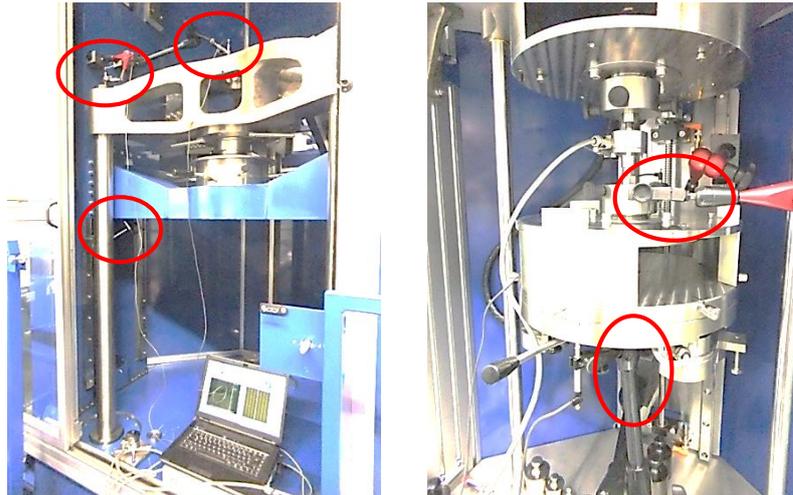


Abbildung 45: Platzierung der Sensoren bei der Deformationsbestimmung der Kernbauteile der 250 kN-Totlastanlage und der 2 kN-Totlastanlage

Daher sind dies in erster Linie Untersuchungen zur Verformung der Achsen sowie des bewegten Arbeitsrahmens bzw. des Arbeitstisches. Durch unterschiedliche Vorspannungen in den Führungen, unterschiedliche freie Länge der Spindeln zwischen Position und Lager, Fertigungstoleranzen der Führungen, Spindelfehler, usw. ergeben sich Winkelfehler und Parallelitätsabweichungen im Rahmensystem.

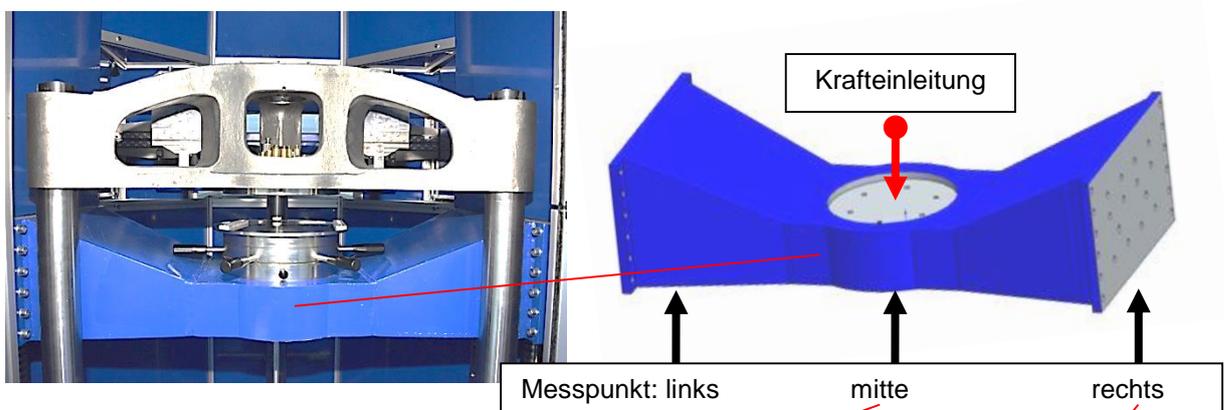


Abbildung 46: Querträger des Arbeitsrahmens mit symbolisierten Messpunkten [36]

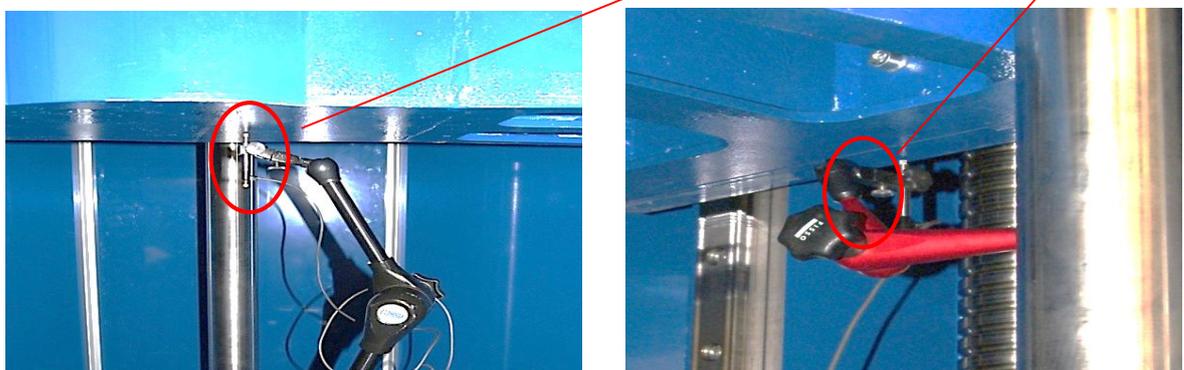


Abbildung 47: Mittige Anordnung des Messtasters am Querträger des Arbeitsrahmens und zum Vergleich Messtaster rechts in Mutternähe [36]

Verifizierung des Anlagensystems

Zum Vergleich der Deformation beider Achsen in der 250 kN Kraftnormalanlage wird zwischen Arbeitsbrücke des Lastgehänges und dem Arbeitsrahmen der Anlage eine kraftschlüssige Verbindung hergestellt und eine Reihe von Lastwechsel unterschiedlicher Belastungen durchgeführt. Dabei werden an beiden Seiten der Arbeitsbrücke Wegaufnehmer platziert und während der Lastwechsel die Deformationen bestimmt (siehe Abbildung 46 oder Abbildung 47 rechts).

Nach Synchronisation der Achsen (Master- und Slaveachse) zeigen sich unter 200 kN, 100 kN und 50 kN die in Abbildung 48 dargestellten Verformungswerte, wobei sich die Verformungen der beiden Seiten als nahezu deckungsgleich ergeben.

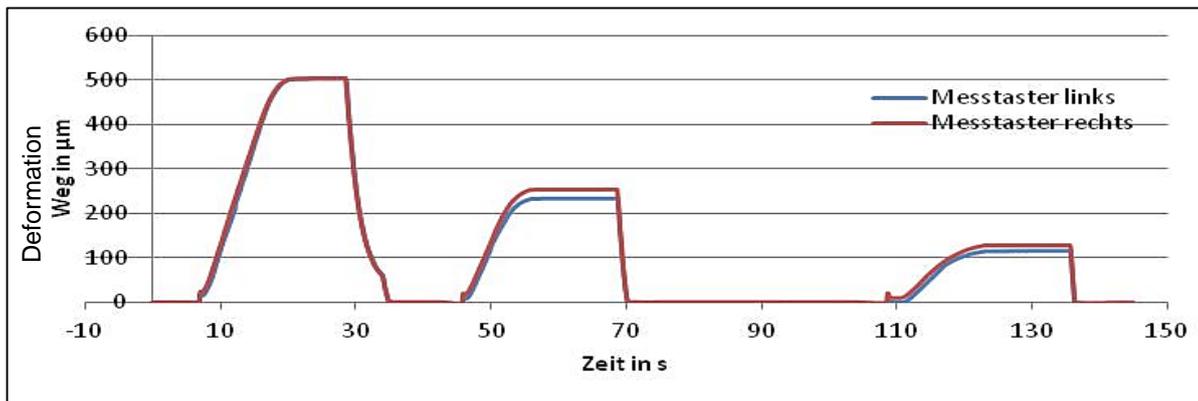


Abbildung 48: Verformung des Arbeitsrahmens unter der Last von 200 kN, 100 kN und 50 kN bei den Achsen (Taster links und rechts) [36]

Zur Bestimmung der Steifigkeit des Arbeitsrahmens selbst wird die Verformung der Aufnahme der Druckplatte im unteren Teil des Arbeitsrahmens bestimmt. Dabei (mit Abbildung 49 verglichen) verbleibt der rechte Wegsensor (rote Linie in Abbildung 48 und Abbildung 49) als Referenz in Spindelnähe an unveränderter Position.

Werden die gleichen Laststufen in analoger Reihenfolge wieder aufgebracht, zeigt der Referenzsensor mit einer gemessenen Deformation von etwa 500 μm bei 200 kN einen reproduzierbaren Ausschlag. Bemerkenswert an der roten Linie in Abbildung 48 und Abbildung 49 ist, dass die Belastungsänderung pro Zeiteinheit (also die Geschwindigkeit der Belastungsänderung) sich in der Form der Kurven (Steigung und Wert der Verformung; vergleiche Linie der 200 kN-Belastung) bedingt durch die Hysterese widerspiegelt. Dieser Umstand der Geschwindigkeitsabhängigkeit gehört in der Kraftmessung zu den Haupteinflussgrößen bei Vergleichsmessungen. Um Messergebnisse infolge vergleichen zu können, erweist es sich daher als notwendig, diese Parameter zu definieren und damit die Last immer gleichartig aufzubringen.

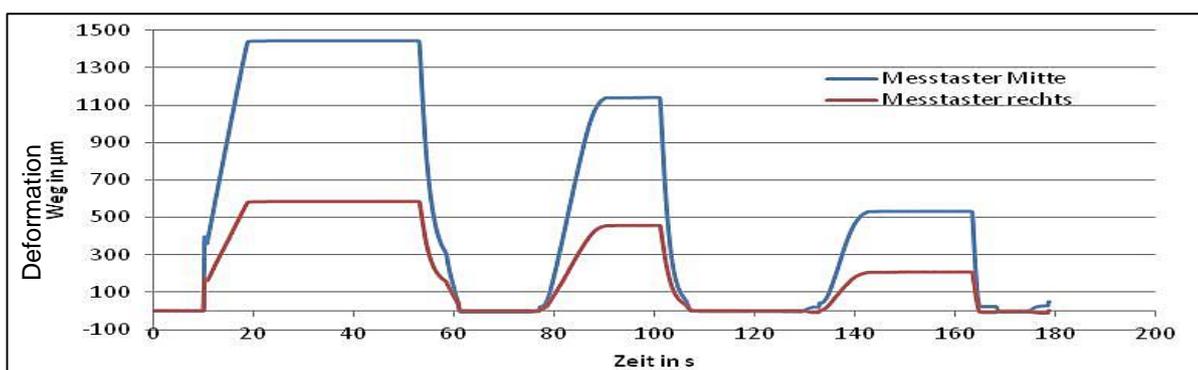


Abbildung 49: Verformung Arbeitsrahmen unter Last [36]

Verifizierung des Anlagensystems

Das Querhaupt des Gehänges (Arbeitsbrücke) zeigt in sich, wie in [36] beschrieben, unter Volllast eine kaum messbare Verformung. Die in der Abbildung 50 dargestellte Verformungskurve von etwa 800 μm zeigt im Wesentlichen die Verformung der Arbeitsbrücke in Relation zum Arbeitsrahmen. Dieser Umstand ergibt sich aus der Montage der Messsensoren am Arbeitsrahmen. Die Differenz zwischen äußerem Wegsensor (rote Linie) und dem mittigen Wegsensor (blaue Linie) von 35 μm entspricht aber der Verformung der Brücke selbst.

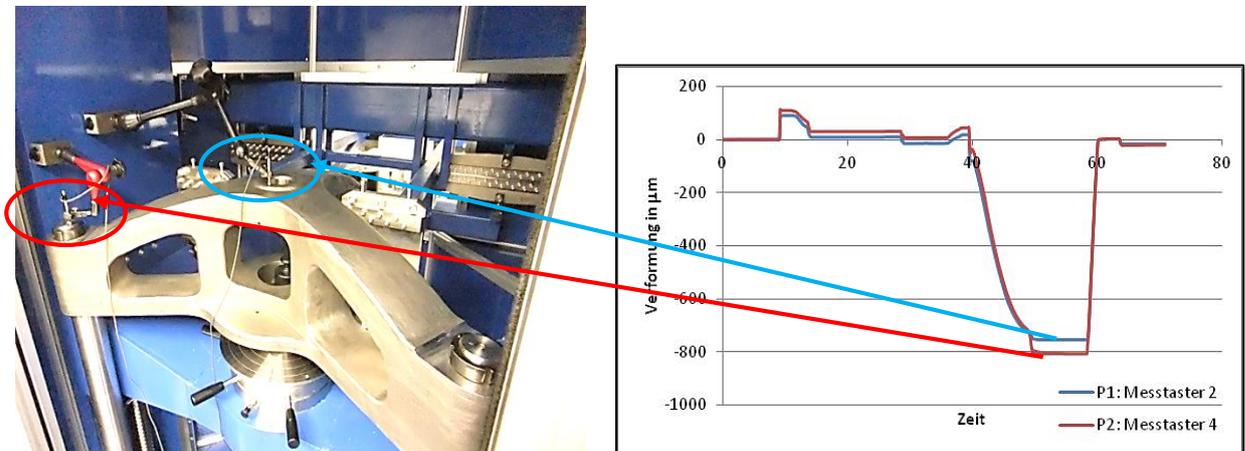


Abbildung 50: Messanordnung der Verformungsbestimmung der Arbeitsbrücke und aufgezeichnete Abweichung der Verformung [36]

Bei der Konstruktion der 2 kN-Totlastanlage wird die Achse zur Kompensation der Deformation des Kraftaufnehmers nicht wie bei der 250 kN-Totlastanlage vollkommen symmetrisch mit zwei Antrieben ausgeführt, sondern es wird aufgrund der besseren Bedienbarkeit auf eine asymmetrische Lösung zurückgegriffen (siehe Abbildung 51). Es wird lediglich ein Kugelgewindetrieb zentral zwischen zwei Linearführungen vorgesehen. Nach [36] entspricht dieser Aufbau der typischen Anordnung bei Achsen im Werkzeugmaschinenbau und ist in Aufbau und Steuerung leicht zu realisieren. Der Nachteil liegt jedoch im Verkappen des Tisches während der Messung.

Zur Überprüfung der Eignung der Lösung und zur Abschätzung des entstehenden Winkelfehlers bei der 2 kN-Totlastanlage ist wegen der asymmetrischen Bauweise die Verkippungssteifigkeit des Arbeitstisches zu bestimmen. Aufgrund der verhältnismäßig geringen Kräfte und der entsprechend massiven Bauform des Tisches wird nachgewiesen, dass dieser Einfluss vernachlässigt werden kann. Wie in [36] abgeleitet und beschrieben wird, kommt es bei einer Kraft von 2 kN zu einer maximalen Verformung des Tisches um 25 μm auf die Länge des Tisches, wodurch ein Winkelfehler von $0,005^\circ$ in der Auflageplatte (Drehteller) verursacht wird. Dieser Verformungswert wird in den Messungen entsprechend Abbildung 45 und in Abbildung 54 messtechnisch belegt. Ausgehend von den Ausführungen zu Abbildung 4 kann die verursachte Verformung als zulässig eingestuft werden, sofern die entstehenden Querkräfte die realisierte Kraft in nicht relevantem Ausmaß beeinflussen.

Wurde im bisher Beschriebenen von Verformung gesprochen, so war immer die Gesamtverformung von Maschine und Sensor gemeinsam umschrieben. Betrachtet vom Messergebnis ist eine Aufschlüsselung der Verformung in Maschinenanteile und Sensoranteile zweitrangig. Jede aufgebrachte Laststufe verursacht eine Gesamtverformung, die eine streng korrelierte, zu berücksichtigende Rückstellkraft auslöst.

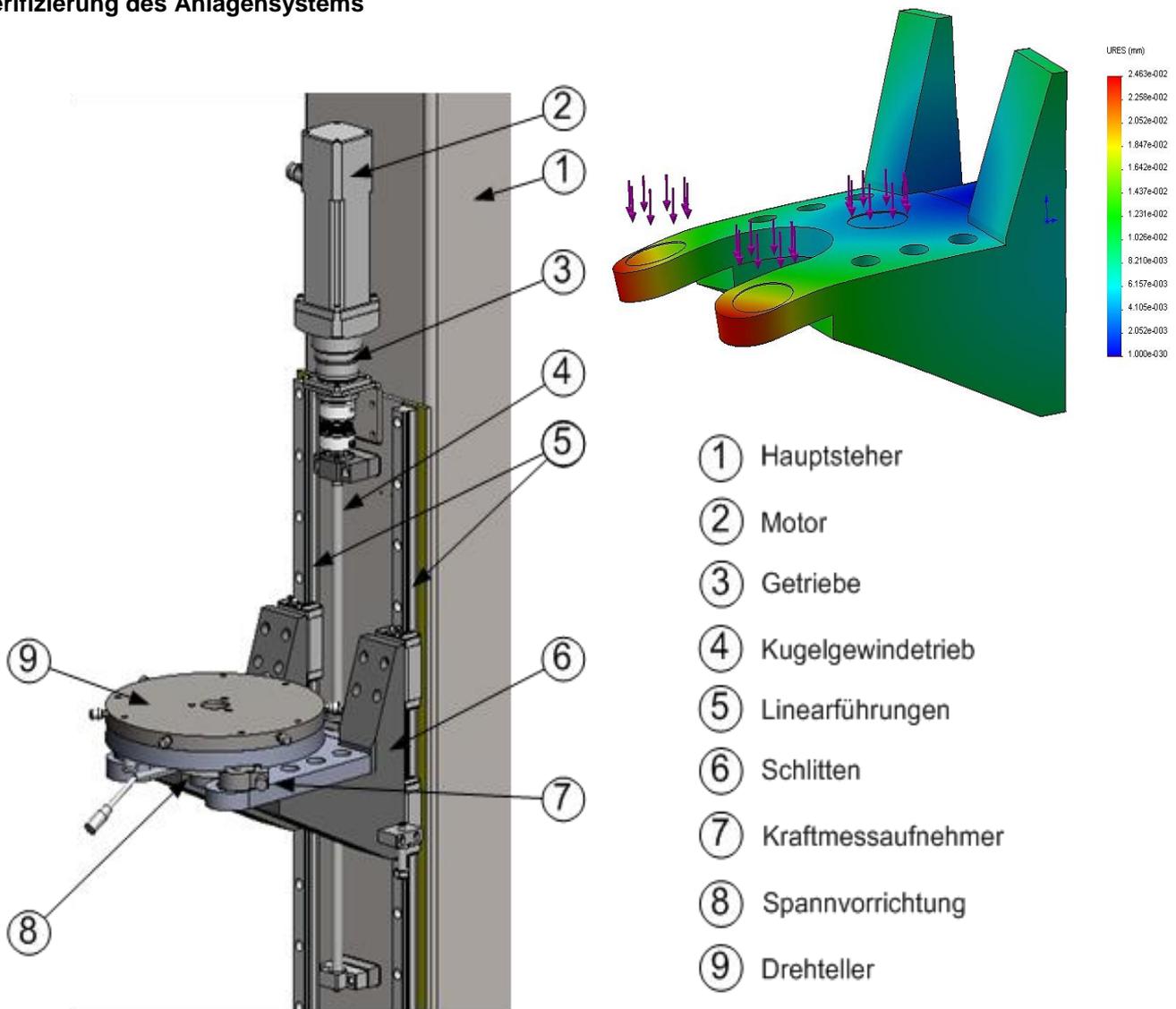


Abbildung 51: Linearachse der 2 kN-Totlastanlage mit Visualisierung der Deformation des Arbeitstisches um max. 0,02 mm [36]

Zur Zuordnung von Messunsicherheitskomponenten ist es notwendig, eine anteilmäßige Zuordnung der Gesamtverformung in Maschinen- und Sensorverformung vorzunehmen. Zu diesem Zwecke werden in Ergänzung zu den durchgeführten Kalibrierungen Teile dieser Messserien unter besonderen Bedingungen wiederholt. Damit werden ergänzende gleichartige Messserien durchgeführt und ausgewertet, bei denen der Ablauf einer Kalibrierung ohne verformbarem TransfERNormal simuliert wird. Unter besonderen Bedingungen bei den Kalibrierungen ist gemeint, dass in erster Linie detaillierte Messungen und Aufzeichnungen bezüglich der Verformung geführt werden. D.h. der Verformungswert der Laser-Triangulation, der Wert der Positionskorrektur durch die Linearachse sowie Messwerte von zusätzlich installierten Wegaufnehmern werden gegenübergestellt. Diese sind einerseits zwischen den Druckplatten des Arbeitstisches und der Arbeitsbrücke und andererseits zwischen der Druckplatte des Arbeitstisches und dem Maschinenfundament positioniert. Dadurch werden Längenveränderungen zwischen dem Maschinenbett, dem Arbeitstisch und der Arbeitsbrücke gemessen. Die Auswertung dieser Messungen zeigt die anteilmäßige Aufteilung der Verformungswerte und bestätigt die berechnete und simulierte Verformung der Anlagenkomponenten unter den jeweiligen Laststufen [36]. Im Zuge der Verifizierung der Gesamtanlage wurden diese

Verifizierung des Anlagensystems

Messungen bei der 2 kN-Kraftnormalanlage bei Messserien mit 2 kN und bei der 250 kN-Kraftnormalanlage mit 20 kN und 200 kN durchgeführt.

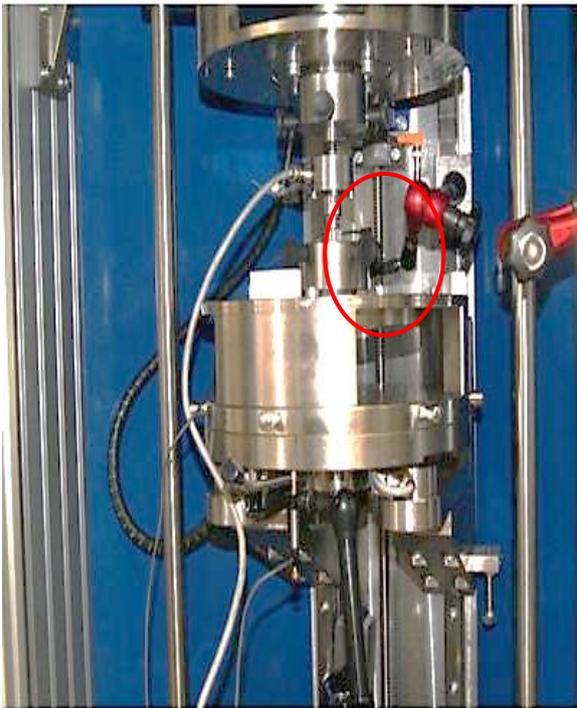


Abbildung 52: Messaufbau Kippsteifigkeit 2 kN-Totlastanlage mit zusätzlichen Sensoren



Abbildung 53: Direktmessung der Verformung der 2 kN-Totlastanlage ohne Transfornormal

In Abbildung 52 und Abbildung 53 werden Beispiele des Versuchsaufbaus der Bestimmung der Verformung von Anlage und Transfornormal gezeigt. Im Messaufbau der Abbildung 53 erfolgt die Vergleichsmessung ohne Transfornormal durch eine direkte mechanische Verbindung des Arbeitstisches und der Arbeitsbrücke. Damit kann das reine Maschinenverhalten während einer simulierten Messreihe detektiert werden, da die Einflüsse des Transfornormals nicht gegeben sind.

Zur Verifizierung der Verformung wurden vorerst an beiden mechanischen Anlagen (2 kN und 250 kN) Messserien mit Transfornormalen durchgeführt. Zur besseren Erfassung von Störgrößen bedingt durch die Anlage und wie in 3.6.2 beschrieben, wurde auf einen Messablauf nach der DKD-Routine zurückgegriffen. Es wurde versucht, bei der Bewertung der Kraftnormalanlage durch Transfornormale auf die genauesten Vergleichswerte eines Transfornormals, nämlich auf die Vergleichspräzision und auf die Wiederholpräzision, zurückzugreifen. Es werden daher im Folgenden, um geometrische Verformungen und damit etwaige Winkelfehler zu evaluieren, die Transfornormale in vier Einbaupositionen (0° , 90° , 180° , 270°) gemessen (vergleiche dazu den Ablauf nach DAkS-DKD [6][7] und ÖNORM, EN ISO 376 [3]). Darüber hinaus werden die Kraftsensoren nur im oberen Bereich ihres Messbereiches (größer als 50% des Nominalwertes) belastet. Bei diesem Messablauf wird daher im Wesentlichen auf die Leistung der Anlage eingegangen, wobei die Qualität des Transfornormals dabei zweitrangig ist.

Ein Messablauf zum Zwecke dieser Untersuchungen erfolgt wie in Abbildung 54 oben beschrieben. Nach drei Vorbelastungen werden zwei Messserien mit zunehmender und abnehmender Kraft durchgeführt. Dann werden in verschiedenen Einbaupositionen

Verifizierung des Anlagensystems

(jeweils 90° versetzt) je eine Vorbelastung gefolgt von zwei Messserien mit zunehmender Kraft bestimmt. Ausgewertet werden ausschließlich Messwerte von Laststufen, die sich im Bereich 50 % bis 100 % des Messbereiches befinden. Dadurch greift man nur auf die „genauesten“ Bereiche und hier nur auf die relative Vergleichspräzision und die relative Wiederholpräzision der Transfornormale zurück.

Die Bestimmung der Größe der Verformung der Anlagen wurde unter möglichst praxisnahen Bedingungen durchgeführt. Dazu wurde im Zuge der Validierung der Anlage und als Vorbereitung der wissenschaftlichen Vergleichsmessungen (siehe Kap. 6.2.1 und Kap. 0) eine Reihe von Kalibrierungen mit Transfornormalen mit besonderen Anforderungskriterien in Vergleichspräzision und Wiederholpräzision vorgenommen und ausgewertet. Exemplarisch wird im Folgenden eine Messserie gezeigt und erläutert, die mit einem 2 kN-Kraftnormal in der 2 kN-Kraftnormalanlage durchgeführt worden ist.

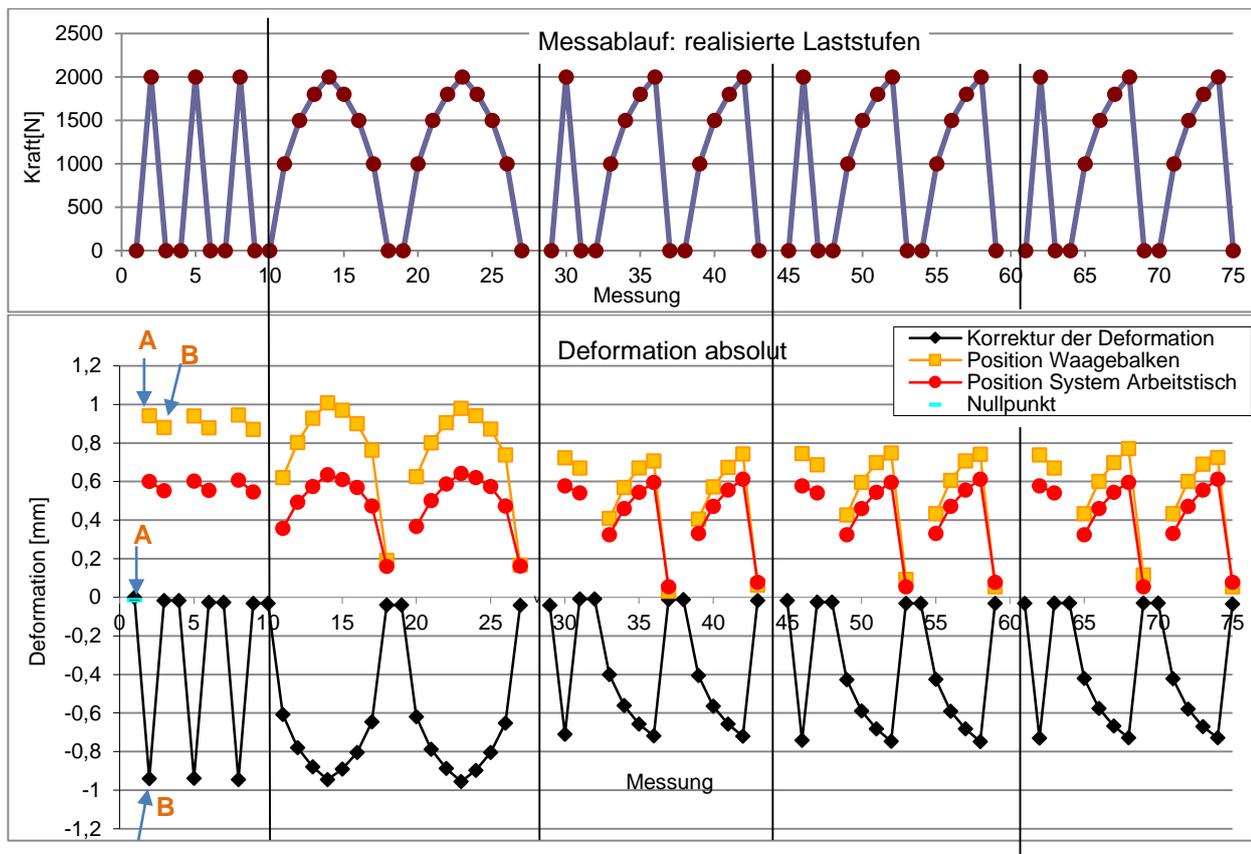


Abbildung 54: Zusammenführung der Deformationswerte der 2 kN-Totlastanlage und Gegenüberstellung mit dem Messablauf [35]

In Abbildung 54 wird die Deformation des gesamten Systems gezeigt. In der Gegenüberstellung des Messablaufes wird der Wert der Korrekturbewegung der Linearachsen (schwarze Linie) gezeigt. Das heißt, erfolgt eine Auslenkung des Waagebalkens durch Deformation unter Lasteinwirkung, so erfolgt unmittelbar die Korrektur durch die Achsen (siehe im folgenden Kapitel 6.2.1). Die aufgetragenen Werte entsprechen dem Verfahrenweg der Linearachsen. Mit gelber Linie sind die Absolutwerte der Gesamtverformung aufgezeichnet. Betrachtet man links den ersten gelben Messwert, entspricht dieser der erfolgten Verformung bei Vollast (erste Vorbelastung, Punkt A). Der zweite gelbe Messwert entspricht dem Absolutwert der erfolgten Verformung bei Entlastung (erste Vorbelastung, Punkt B). Der Wert der Korrektur entspricht der relativen Verformung zwischen den einzelnen Laststufen. Bei Betrachtung dieser beiden

Verifizierung des Anlagensystems

Verformungswerte ist die Verformung bei Belastung größer als die entgegengesetzte Verformung durch Entlastung. Diese Hysterese ist aus allen Messungen auf- und absteigender Reihenfolgen abzulesen. Nach drei Vorbelastungen beginnt die Messreihe bei 50 % (1 kN), in 10 % Schritten zunehmender Kraft und nach Vollast in 10 % Schritten abnehmender Kraft bis 50 %. Stellt man dieser Messserie mit einem Transfernnormal eine völlig idente Messserie nach demselben Ablaufschema aber mit starrer Verbindung der beiden Druckplatten (siehe Abbildung 53) gegenüber, so erhält man die der roten Linien entsprechenden Verformungswerte aus Abbildung 54. Die Verformungswerte mit Transfernnormal und die Verformungswerte ohne Transfernnormal (gelbe Linien und rote Linien) wurden in diesem Beispiel mit dem Positionssensor der Laser-Triangulation des Waagebalkens bestimmt. Auffällig in allen durchgeführten Messserien mit unterschiedlichen Kraftsensoren bzw. bei unterschiedlicher Maximallast ist, dass die Absolutwerte bei Belastung größer sind als die Absolutwerte bei Entlastung. Die Messergebnisse in Summe haben gezeigt, dass diese Schrägstellung, wie auch in Abbildung 54 und in Abbildung 55 dargestellt wird, der Hysterese der Anlage plus der Hysterese des Transfernnormals entspricht. Die Größe dieser Hysterese ist sowohl maschinen- als auch kraftsensorabhängig und variiert von Messung zu Messung bzw. ist abhängig von den Zeitabständen zwischen den Messserien. An der Auswirkung der Hysterese ist die Bedeutung einer präzisen Messabfolge bei Vergleichsmessungen erkennbar.

6.1.8 Verformung der Transfernnormale

Bei primären Normalanlagen herkömmlicher Bauart (die Masse übt wegunabhängig eine Kraft auf das Transfernnormal aus) ist die Position des Transfernnormals im System nicht relevant; die Massen sind frei beweglich und nehmen entsprechend dem Kraftsensor ihre Position ein. Durch die spezielle Konstruktion dieser Anlage (Kompensation des Gehänges) ist die Verformung der Anlage in Längsrichtung von Bedeutung und ergibt eine Störkraft in Form einer Rückstellkraft. Durch die Kompensation der Verformung kann diese Störkraft mit der Größe null und der beaufschlagten Messunsicherheit u_x angenommen werden.

Durch die Deformationskorrektur wird die gesamte Systemverformung kompensiert, allerdings ist die Verformung des Transfernnormals selbst ebenfalls von Bedeutung und daher vorerst einmal getrennt zu betrachten. Wie beschrieben wird der Längenänderung des Transfernnormals das Messergebnis selbst zugeordnet, aber zur Bestimmung der Größe von Störgrößen (z.B. Rückstellkräfte) sei diese Verformung einmal getrennt analysiert.

Werden aus Abbildung 54 die Verformungswerte der Anlage von den Verformungswerten des gesamten Systems abgezogen, erhält man als Differenz die reinen Verformungswerte des Transfernnormals, dargestellt in der Abbildung 55 in Blau. Im vorliegenden Beispiel beträgt die Verformung bei dem gemessenen 2 kN-Sensor etwa 0,35 mm (blaue Werte). Stellt man dem gegenüber die Anzeige der Messbrücke unter der Belastung bzw. ohne Korrektur der Deformation, so erhält man ein Ergebnis der Verformungswerte in mV/V. Diese Werte entsprechen der Störkraft (Rückstellkraft) aufgetragen in Grün. Auch hier kann nachgewiesen werden, dass die rückstellende Kraft rein mit der Amplitude der Auslenkung korreliert und betragsmäßig zwischen 0,1 N und 0,25 N liegt. Es wird darauf hingewiesen, dass dieser Betrag ausschließlich aus dem Deformationsanteil des Transfernnormals entstammt.

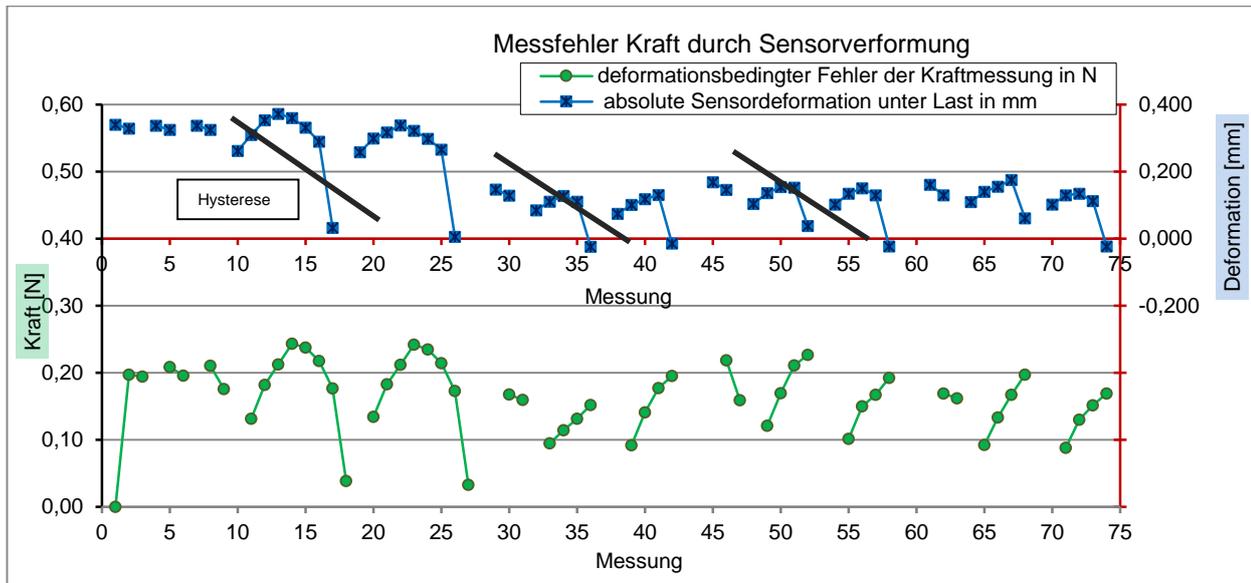


Abbildung 55: Zusammenführung der Deformationswerte des 2 kN-Transfornormals; die Schrägstellung entspricht der Hysterese [35]

Wie in Abbildung 55 durch die schwarzen Linien angedeutet, entspricht hier die Schrägstellung der zunehmenden und abnehmenden Lasten ausschließlich der Hysterese des Transfornormals zwischen den Lastwechseln. Das Maß der Hysterese kann in Abbildung 55 auch bei den drei Erst-Vorbelastungen (Messpunkte: 0 bis 10) und den Vorbelastungen bei 30, 46 und 62 abgeschätzt werden. Diese Hysterese des Transfornormals ist eine Kenngröße des Transfornormals selbst und spiegelt sich in den Messergebnissen in der Umkehrspanne wider.

6.2 Verifizierung verfahrenstechnischer Lösungen

6.2.1 Kompensation der Rückstellkraft im Waagensystem

Die Deformation des kraftbeaufschlagten Kraftsensors ergibt zwangsläufig eine Positionsveränderung des Gehängesystems in der Totlastkraftanlage und somit ergibt sich eine schwer kalkulierbare Rückstellkraft. Im Calibration Guide EURAMET cg-4 [5] werden für Kraftnormalanlagen, die nicht als reine Totlastkraftanlagen konzipiert sind (d.h. die kleinste Laststufe entspricht nicht der Gehängemasse oder zumindest einem entkoppelten Teil davon), zusätzliche Auflagen gefordert. Das betrifft vor allem Anlagen, bei denen das Eigengewicht des Gehänges über ein Hebelsystem mittels Gegengewichten kompensiert wird.

Wie beschrieben, halten bei dieser Anlage das Eigengewicht des Gehänges und die Gegengewichte einander die Waage und befinden sich in der Ausgangsposition im ausgeglichenen Zustand. Erfährt dieses System unter Belastung eine Auslenkung aus dieser Position, stellt sich automatisch eine entsprechende Rückstellkraft ein. Bei beiden Anlagen wurde deshalb eine Lösung entwickelt, welche einerseits über ein Lasermesssystem die Position des Balkens bestimmt und andererseits die Druckplatten der Trägerkonstruktion über ein Linearachsensystem beweglich macht. Dieses Lasermesssystem bestimmt die Positionen des Waagebalkensystems vor der Messung. Wird auf ein Transfornormal eine Kraft ausgeübt, ergibt das zwangsläufig eine Deformation im Transfornormal. Es ergibt sich durch diese Kraftaufbringung direkt eine Bewegung im Balkensystem, die exakt der Deformation des Transfornormals entspricht.

Verifizierung des Anlagensystems

Während der Lastaufbringung wird von der Positionsbestimmung mit dem Laser diese Verformung detektiert. Wird nun mittels mehrerer Linearachsensysteme dieser Bewegung des Waagensystems durch eine gegenläufige Positionsveränderung der Druckplatte (Auflageboden) entgegengestellt und somit ausgeglichen, so wird der Weg der erfolgten Deformation kompensiert. Befindet sich das Balkensystem, überwacht durch das Lasermesssystem, wieder in der ursprünglichen Ausgangsposition, liegen keine Rückstellkräfte mehr vor, die Messung kann fortgesetzt werden.

Zur Bestimmung der Position der Waagebalkensysteme werde bei beiden Anlagen ein handelsüblicher Messsensor auf Basis der Laser-Triangulation verwendet. Das Grundprinzip basiert hier auf einer Winkelmessung zwischen einem ausgestrahlten Laserstrahl und der Detektion von dessen Reflexion. Die Messauflösung dieses Systems beträgt in der Abstandsmessung 0,01 mm. In der Längenmesstechnik gibt es zwar eine Reihe von laserbasierten Sensoren, deren Auflösung höher ist, nur wäre ein Einsatz dieser Sensorik bei diesen Anlagen nicht besser geeignet, da in der Regel die realisierbare Auflösung einer Linearachse wesentlich kleiner ist als die Auflösung des Messsystems. Das Hauptaugenmerk muss daher auf die Auswahl geeigneter Linearachsen gelegt werden.

Es gilt, Spindelsysteme zu finden, deren Spiel und Steigung in Kombination mit entsprechenden Schrittmotoren und deren Getriebe ausreichende Genauigkeit aufweisen, den Arbeitstisch unter Last in Position zu bringen. Kugelumlaufspindeln der Firma THK mit großzügig dimensionierten Schrittmotoren erscheinen hier zielführend. Da das Messprinzip darauf beruht, dass immer derselbe Messpunkt anzufahren ist, können Steigungsfehler in der Spindel und Deformationen des gesamten Systems (Arbeitstisch-Achsen-Rahmen-Trägerkonstruktion) außer Acht gelassen werden. Von entscheidender Bedeutung ist die Möglichkeit, jeden Teilungsschritt des Schrittmotors in einem möglichst geringen Hub der Spindel umzusetzen. Diese Hubauflösung liegt bei der 2 kN-Totlastanlage bei 2 μm , bei der 250 kN-Totlastanlage bei 6 μm .

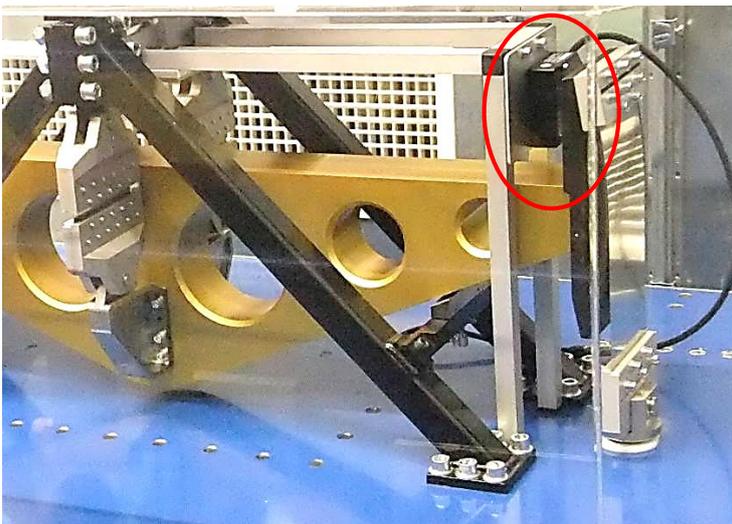


Abbildung 56: Waagebalken mit Laser-Triangulationsystem zur Positionsbestimmung bei der 2 kN-Totlastanlage

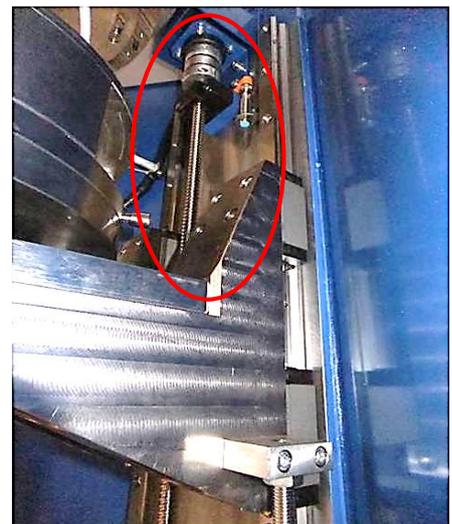


Abbildung 57: Spindel und Führungen der Linearachse zur Bewegung des Arbeitstisches bei der 2 kN-Totlastanlage



Abbildung 58: Waagebalken mit Laser-Triangulationsystem zur Positionsbestimmung bei der 250 kN-Totlastanlage

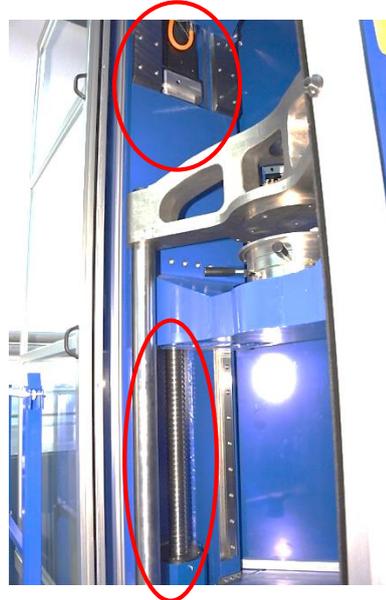


Abbildung 59: Getriebe und Spindel der linken Seite der beidseitigen Doppel-Linearachse zum Verfahren der Arbeitsbrücke

Einfache Tests zeigen, dass die Reproduzierbarkeit des Waagebalkensystems und damit die Stabilität der Waagenbrücke besser als 0.003 mm in einem Abstand von 1200 mm zur Balkenmitte waren. Um dem nächsten Kapitel vorzugreifen, ergibt eine derartige Abweichung in der Positionierung eine Störkraft von kleiner 2 mN bei der 2 kN-Anlage bzw. 10 mN bei der 250 kN-Anlage.

Dem Bediener der Kraftanlagen steht zur Überwachung des Programmablaufes eine Bedieneroberfläche des Steuerprogrammes zur Verfügung, mit deren Hilfe sich eine Reihe von Anlagenzuständen verfolgen lassen. Damit ist es möglich, die Messwerte aller verwendeten Sensoren anzuzeigen und auch graphisch zu visualisieren.

Abbildung 60 zeigt im Detail die Arbeitsweise der Kraftaufbringung und die damit verbundene Deformationskorrektur der 250 kN-Anlage. In der Benutzeroberfläche ist der Verlauf der Kraft (in Grün), der Kraftverlauf im Gehänge (in Blau), die Vorgabewerte der Krafthaltung (in Violett) und, unten im Bild, die Position des Waagebalken dargestellt. Die Skalierung der Graphen in [N] ist so gewählt, dass diese sich möglichst überlagern und eine Linie ergeben. Dadurch sind für den Bediener Störungen im Ablauf oder Streuungen im Kraftverlauf besser erkennbar. Das Diagramm in Abbildung 60 zeigt die Schritte eines Lastwechsels in positiver Richtung (Belastung) im oberen Diagramm und daraus resultierend die Reaktionen der Deformationskompensation am Beispiel eines Lastwechsels von 0 kN auf 100 kN im unteren Diagramm.

Als Transfornormal wurde ein 100 kN-Transferkraftmesssensor herkömmlicher Bauart verwendet. Am Beginn des Schrittes 1 werden alle Massen angehoben, die 100 kN-Scheibe ausgewählt, das ganze Gehänge (Schritt 3) durch die Hydraulik langsam abgesenkt und damit die Kraft auf das Transfornormal übergeben. Während jedes Kraftwechsels wird die aufzubringende Kraft hydraulisch substituiert. Das heißt, die Krafthaltung (dargestellt durch die violette Linie, Schritt 2) substituiert bei jedem Lastwechsel 50 % der Differenz der Laststufen und hält diese bis zum Abschluss des Lastwechsels konstant. Die grüne Linie im Diagramm zeigt die Gesamtkraft. Sie beginnt

Verifizierung des Anlagensystems

im 1. Schritt bei 0 kN, wird durch die hydraulische Krafthaltung erhöht und bei 50 kN gehalten.

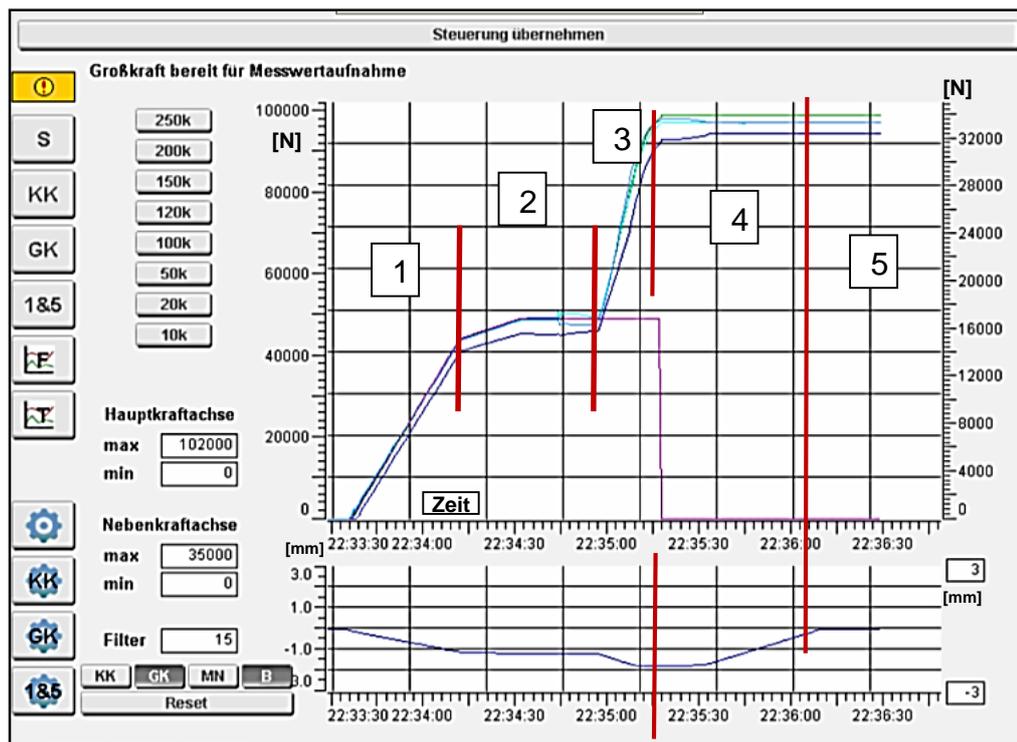


Abbildung 60: Protokollierung des Steuerprogrammes eines Lastwechsels 250 kN-Totlastanlage [35]

Sobald der Massestapel auf das Gehänge kraftschlüssig übergeben wird, steigt die realisierte Kraft (Abschnitt 3) bis zu seinem Maximalwert bei 100 kN. Mit der mechanischen Kraftübernahme durch die Massen wird die Krafthaltung ausgeklinkt und auf null reduziert. Annähernd parallel zum Gesamtkraftverlauf kann man das Signal der Kraftsensoren erkennen, die in den drei Gehängestangen implementiert sind (hellblaue, mittelblaue, dunkelblaue Linie). Diese internen Kraftsensoren dienen unter anderem als Basis zur Regelung der Krafthaltung. Man sieht anhand der rechten Achse im Diagramm, dass sich der Wert genau bei einem Drittel von 100 kN einpendelt. Das untere Diagramm zeigt zeitgleich die Reaktion des Waagebalkens. Die Position desselben wird durch die Laser-Triangulation gemessen und beginnt mit dem ausgeglichenen Waagebalken bei der Nullposition (annähernd bei 0 mm). Der exakte Wert der Nullposition wird protokolliert. Durch die steigende Last kann eine Bewegung des Waagebalkens in negativer Richtung von etwa 1,2 mm abgelesen werden. In Schritt 2 bleibt durch die Krafthaltung diese Verformung annähernd konstant und steigt in Schritt 3 zu einem Maximalwert von 2,45 mm. Dieser Wert entspricht somit der Deformation des Transfornormals unter Maximallast. In Schritt 4 kann auf dem Diagramm die Kompensation dieser Verformung abgelesen werden. Die implementierten Linearachsen verfahren den Arbeitsrahmen nun solange, bis sich der Waagebalken wieder exakt in der Nullposition befindet, d.h. im konkreten Fall wird das gesamte Transfornormal inklusive kraftschlüssig aufliegendem Gehänge und Massen um 2,45 mm angehoben. Im oberen Diagramm ist zu erkennen, dass zu Beginn der Deformationskompensation die Kraft (grüne und blaue Linie) noch steigt, während sie nach erfolgter Kompensation konstant bleibt.

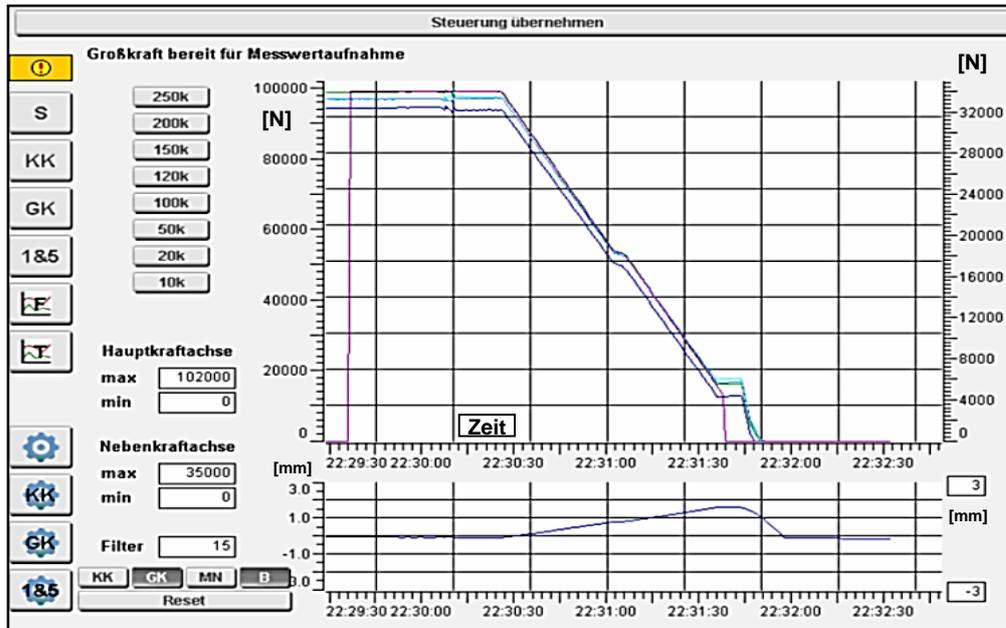


Abbildung 61 Protokollierung des Steuerprogrammes eines Entlastungsvorganges

Analoges gilt, wie in Abbildung 61 zu sehen ist, bei der Entlastung des Kraftsensors. Gezeigt wird die Benutzeroberfläche während einer Entlastung. Oben im Bild ist der Verlauf der Kraft (in Grün), des Kraftverlaufes im Gehänge (in Blau), und Verlauf der Krafthaltung (in Violett) gezeigt. Im unteren Teil der Abbildung ist die Deformation und somit die Position des Waagebalkens aufgezeichnet.

Unterschieden werden die Fälle der Belastung oder Entlastung nur durch das Zustandekommen der Kraftaufbringung. Während bei der Belastung, wie beschrieben, der 1. Teil des Kraftanstieges durch die Krafthaltung hydraulisch zustande kommt und der 2. Teil durch das Aufsetzen der Last mechanisch erfolgt, wird bei der Entlastung der gesamte Teil von der Hydraulik übernommen. Wie im oberen Teil der Diagramme zu erkennen ist (violette Linie), tastet sich die Krafthaltung an den Maximalwert von 100 kN an und hält vorerst die Kraft beim Maximalwert konstant. Zu Beginn der Schwankungen im Kraftverlauf (grüne und blaue Linien) werden die gesamten Lasten entkoppelt. Die abfallende Rampe des Kraftverlaufes erfolgt durch die Regelung der Hydraulik. Bis zum Punkt der Krafthaltung bei 50 % und im Anschluss bis zur nächsten Laststufe (in dem Fall 0 N) erfolgt die Regelung zeitgesteuert. Das Halteplateau bei etwa 16000 N ergibt sich durch das Eigengewicht des Gehänges, welches zu diesem Zeitpunkt noch Kontakt hat. Wie am Positionsverlauf des Balkens im unteren Diagramm zu erkennen ist, erreicht hier die Verformung einen Maximalwert von annähernd 2 mm. Dieser Wert ergibt sich aus dem Umstand, dass sich zu diesem Zeitpunkt das Eigengewicht des Gehänges noch immer kraftschlüssig am Transfornormal befindet. Durch die Ausdehnung des Kraftsensors (Wegfall der Deformation) wird das Waagengehänge aus seiner Nullposition gedrückt. Erst durch die Kompensation dieses Verformungswertes durch die Linearachsen kann defacto die Nullposition angefahren werden, indem das Transfornormal vom Gehänge entkoppelt wird. Erst bei völliger Entkopplung findet das Waagebalkensystem selbstständig die Nullposition und befindet sich wieder im ausgeglichenen Zustand.

Der Lastwechsel bei der 2 kN-Totlastanlage erfolgt aufgrund der einzeln angesteuerten Gewichtscheiben in Teilschritten, da zur Reduktion von Erschütterungen die Gewichte

Verifizierung des Anlagensystems

einzelnen auf das Gehänge aufgebracht werden. Daher erfolgt auch die Korrektur der Deformationswerte schrittweise.

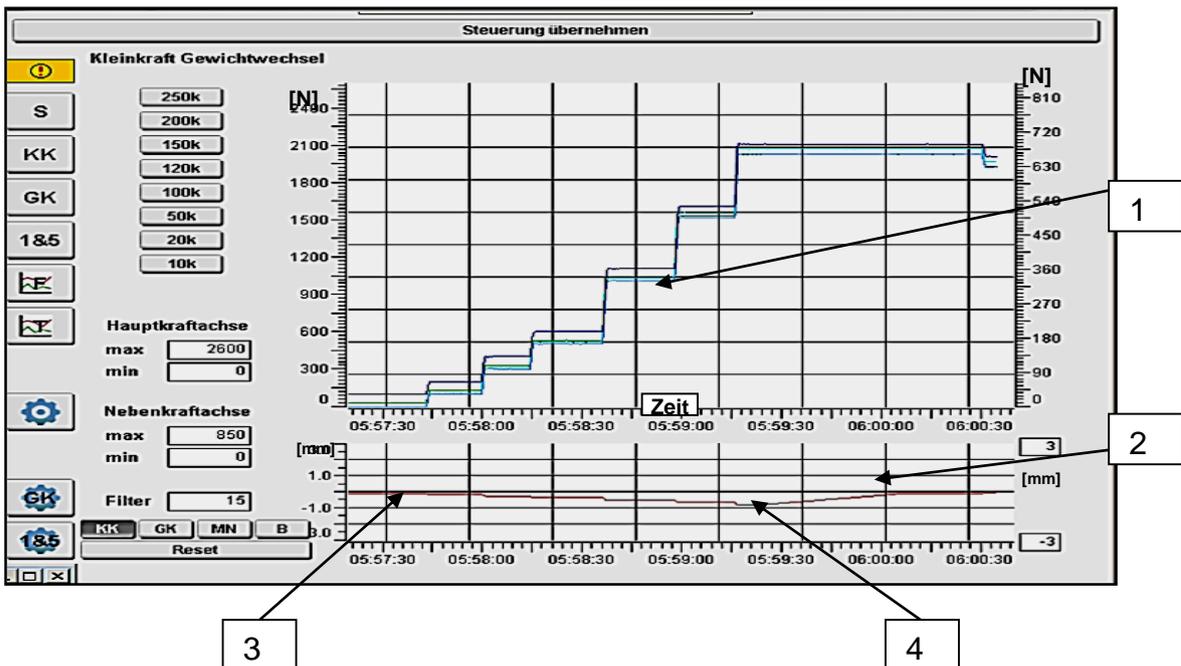


Abbildung 62: Protokollierung des Steuerprogrammes eines Laststufenwechsel mit stufenförmiger Lasterhöhung bei der 2 kN-Totlastanlage [35]

In Abbildung 62 wird ein Lastwechsel der 2 kN-Totlastanlage gezeigt. Gewechselt wird von einer Belastung von 0 N auf 2 kN Volllast in einem Stück. Dabei wird bei der 2 kN-Totlastanlage jede Scheibe in der Reihenfolge der Ruhepositionen nacheinander in das Gehänge eingeklinkt. Wie man in der Abbildung erkennt, wird im oberen Diagramm (-1-) mit der Zeitachse beginnend mit 100 N belastet, dann erfolgt zweimal eine 200 N Belastung gefolgt von dreimal 500 N; das ergibt in Summe 2000 N. Die grüne Linie im Diagramm stellt die Gesamtbelastung dar (linke Diagrammachse), die drei blauen Linien das Ausgangssignal der in den Anlagentisch eingebauten drei Kraftsensoren zur internen Steuerung (rechte Diagrammachse). Das Signal der drei Kraftsensoren entspricht genau einem Drittel der Gesamtbelastung (rechte Diagrammachse). Im unteren Diagramm (rote Linie) sieht man die Positionsmessung der Laser-Triangulation. In Übereinstimmung mit dem oberen Kraftverlauf-Diagramm erkennt man die stufenförmige Zunahme der Verformung (-3-). Im Anschluss (-4-) an die Lastaufbringung erfolgt die Deformationskorrektur. Durch die Bewegung des Arbeitstisches durch die Linearachse wird die Zustellung rampenförmig ausgeführt. Dabei wird wieder die Position des Waagebalkens exakt auf die Nullposition gebracht.

Wird nun das Ausgangssignal eines 2 kN-Transfornormals mit einer Messbrücke (z.B. eine DMP 40 des Herstellers HBM) am Ende des Lastaufbringungs Vorganges gespeichert, entspricht der Verformungswert bei der realisierten Laststufe von 2 kN damit 1,999352 mV/V. Dabei beträgt die Deformation des Transfornormals, oder besser ausgedrückt die Positionsveränderung des Waagebalkens, 0,956 mm. Nun wird die Deformationskorrektur gestartet, der Arbeitstisch wird exakt um 0,956 mm angehoben und der Waagebalken somit in die Nullposition gebracht. Dabei verändert sich das Signal der Messbrücke exakt auf 1,999868 mV/V. Das bedeutet eine Differenz der beiden Ausgangswerte von 0,0005 mV/V. Rechnet man das auf die Maximallast von 2 kN auf,

Verifizierung des Anlagensystems

bedeutet diese Verformung einen Kraftwert von etwa 0,5 N. Schließt man von dieser Messung auf die realisierte Last von 2000 N und verwendet keine Deformationskorrektur, so liegt ein Messfehler von 0,5 N vor. Das bedeutet, dass bei der dargestellten Kraft von 2000 N nur 1999,5 N realisiert werden würden. Es heißt aber auch, dass bei einer Auslenkung des Waagebalkensystems um 0,956 mm die Rückstellkraft (Störkraft) 0,5 N beträgt.

Da das Linearachsensystem eine Reproduzierbarkeit der Position von besser als 0,01 mm aufweist, bedeutet dies, dass man diese Störkraft durch entsprechende Positionierung des Arbeitstisches in die Ausgangsposition auf besser als 2 mN reduzieren kann.

Messung	Laststufe [N]	Deformation [mm]	Korrektur [mm]	DMP 40 [mV/V]	Rückstellkraft [N]
1	0	0	0	0,000760	0
2	2000	0,956	0	1,999352	0,5
3	2000	0,956	0,956	1,999868	0
4	0	-0,943	0	0,001225	etwa 0,5
5	0	-0,943	-0,943	0,000760	0

Tabelle 16: Ergebnis der Belastungsprüfung 2 kN

Das Prozedere der Entlastung bei der Druckmessung oder die Belastung bei der Zugmessung funktioniert analog. In Abbildung 63 wird ein Ausschnitt eines Lastwechsels in der 2 kN-Totlastanlage gezeigt.

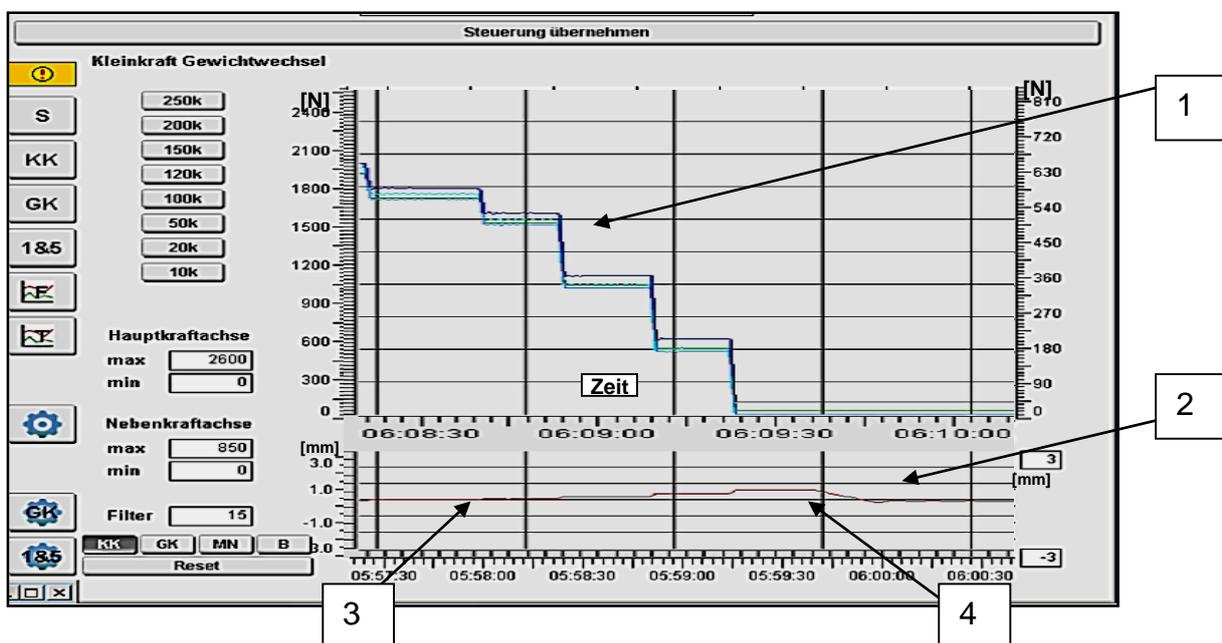


Abbildung 63: Protokollierung des Steuerprogrammes einer stufenförmigen Lastreduzierung bei der 2 kN-Totlastanlage [35]

Gewechselt wird von der Vollbelastung von 2 kN auf 0 N in einem Stück. Ein Lastwechsel wie er zum Beispiel beim zweiten Teil einer Vorbelastung von 2 kN vorkommt (Entlastung). Wieder wird jede Scheibe nacheinander von dem Gehänge abgehoben. Es wird, wie im Diagramm der Abbildung 63 (-1-) erkennbar, beginnend mit 100 N entlastet, dann erfolgt zweimal 200 N gefolgt von dreimal 500 N; das ergibt in Summe wieder 2000

Verifizierung des Anlagensystems

N. Die grüne Linie im Diagramm stellt die Gesamtbelastung dar, die drei blauen Linien entsprechen dem Ausgangssignal der in den Anlagentisch eingebauten drei Kraftsensoren. Im unteren Diagramm (rote Linie) sieht man die Positionsmessung der Laser-Triangulation. Zeitgleich mit dem oberen Diagramm erkennt man die stufenförmige Zunahme der Verformung (-3-) und im Anschluss (-4-) an die erfolgte Lastaufbringung sieht man die Rampe der Deformationskorrektur, ausgeführt durch die Linearachse des Arbeitstisches. Wie man an der roten Linie in der Abbildung 63 am Ende der Positionskorrektur erkennen kann, endet die Steigung in einer gedämpften Schwingung (-2-).

Steuerungstechnisch erfolgt hier eine Ausnahme: Die Nullposition wird ausschließlich bei der Druckmessung, bei nicht vorgespannter Einspannung in einem abgehobenen Zustand bestimmt. Da das System den Kontaktpunkt gespeichert hat wird bei der Nullpunktmessung ein definierter Wert unter dem Kontaktpunkt angefahren (in diesem definierten Punkt wird ausgeregelt). Dieser Kontaktpunkt entspricht jenem Punkt der Achse, der bei Antastung zu Beginn der Messung an das System den ersten Balkenausschlag liefert. Bei der Druckmessung erfolgte die Nullpunktmessung in einer Art und Weise, dass die Achse mit konstanter Geschwindigkeit vom Kontaktpunkt (Deformationsbereich) bis zu einem Fixpunkt (etwa 2 mm unter dem Kontaktpunkt) fährt. Dabei löst sich die Druckplatte des TransfERNORMALS von der Druckplatte des Gehänges. Die Position des Waagebalkens stellt sich selbst in Form einer gedämpften Schwingung auf die Nullposition ein.

Bei der 2 kN-Kraftanlage wird ähnlich zur 250 kN-Kraftanlage eine Krafthaltung zur Aufrechterhaltung der Last verwendet. Während bei der 250 kN-Kraftanlage diese Krafthaltung bei jedem Lastwechsel notwendig ist, wird die Krafthaltung bei der 2 kN-Anlage nur dann verwendet, wenn dies bei einem Lastwechsel (z.B. beim Scheibentausch) von Nöten ist. In der Regel wird darauf geachtet, dass man durch eine strategische Zugabe oder Wegnahme von Gewichtsscheiben das Auslangen findet. Der Grund dafür liegt in der einfacheren steuerungstechnischen Handhabung, sowie in den kürzeren, realisierbaren Messzykluszeiten.

Wird nach einer Belastung des Kraftsensors das Ausgangssignal des 2 kN-TransfERNORMALS mit der Messbrücke am Ende des reinen Entlastungsvorganges gespeichert, zeigt der Verformungswert $0,001225 \text{ mV/V}$ bei der realisierten Laststufe von 0 N. In der Situation liegen keine Gewichte auf, aber die Position des Waagebalkens ist bei $0,956 \text{ mm}$ relativ zum Nullwert. Das Gehänge hat durch die unveränderte Position aus der Vollbelastung durch die elastische Ausdehnung des Kraftsensors Kontakt zu diesem. Wird nun die Deformationskorrektur gestartet und der Arbeitstisch exakt um $0,943 \text{ mm}$ gesenkt (plus zusätzlichen geringen Freifahrtswegen bei nicht vorgespannter Kraftübertragung), wird der Kontakt gelöst und der Waagebalken kann sich in der Nullposition einpendeln. Dabei verändert sich das Signal des DMP 40 exakt auf $0,000760 \text{ mV/V}$, den Ausgangswert (Nullsignal). Das bedeutet eine Differenz der beiden Ausgangswerte von ebenfalls etwa $0,0005 \text{ mV/V}$ bei fehlender Korrektur der Deformation. Rechnet man das auf die Maximallast von 2 kN auf, entspricht diese Verformung einem Kraftwert von etwa 0,5 N.

Ein Ablauf der Entlastung, wie oben beschrieben, erfolgt nur in offener, nicht vorgespannter Einspannung der Druckmessung. Zieht man zum Vergleich eine Zugmessung heran, bei der das TransfERNORMAL in zwei kugelförmigen Koppellelementen

Verifizierung des Anlagensystems

vorgespannt ist, entspricht die Kraftkurve jener Kurve, die auch unter einer Belastung in Druckrichtung entstehen würde. Wie in Abbildung 64 gezeigt, wird bei der Entlastung auf 0 N das Abheben der letzten 500 N-Scheibe verzögert bzw. ausgeglichen und die Kraft somit kontinuierlich auf null reduziert. Dieser Verlauf erfolgt durch Überlagerung der Deformationskorrektur. Wie aus der grünen und der roten Linie des Diagramms erkennbar ist, steigen der Positionswert und der Kraftwert gegen null; die Achse fährt in den Ausgangswert der Nullposition.

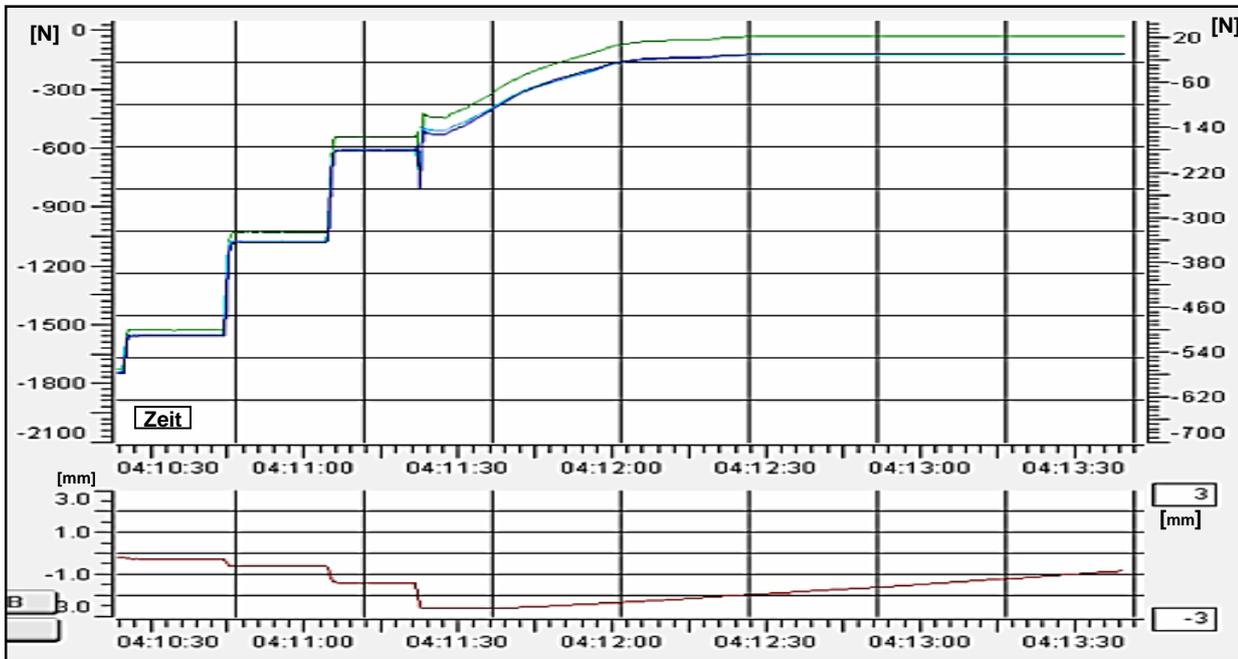


Abbildung 64: Protokollierung des Steuerprogrammes einer Lastreduzierung bei der 2 kN-Totlastanlage mit vorgespannter Einspannung des ZugtransfERNormals

Schließt man von dieser Messung auf die realisierte Last, bedeutet dies, dass ohne Deformationskorrektur auch hier die Last mit einem Messfehler von 0,5 N dargestellt werden würde. Anders gesagt beträgt die Rückstellkraft (Störkraft) bei der Auslenkung des Balkensystemes von 0,95 mm etwa 0,5 N.

Messserien haben gezeigt, dass eine reine lineare Abhängigkeit zwischen der Größe der Rückstellkraft und der Amplitude der Auslenkung besteht. Korrelationen zur Größe der Kraft konnten hier nicht nachgewiesen werden.

6.2.2 Wirksamkeitsprüfung der Deformationskorrektur

Im Folgenden soll die Wirksamkeit der Deformationskorrektur anhand einer Messserie, ausgeführt an der 250 kN-Totlastanlage, näher betrachtet werden. Die Methode an der 2 kN-Totlastanlage ist ident. Diese Wirksamkeitsüberprüfung erfolgt in der Art, dass bei gleicher Einspannung zwei Messserien durchgeführt werden. Die erste Messserie erfolgt mit aktiver Deformationskorrektur, die zweite in einer unmittelbar anschließend durchgeführten Messserie ohne Korrektur. Bei der Auswertung werden die Verformungswerte der TransfERNormale in beiden Serien herangezogen.

Abbildung 65 illustriert den Unterschied zwischen aktiver Deformationskorrektur (blaue Rauten) und inaktiver Deformationskorrektur (rote Quadrate) anhand einer ISO-konformen Messreihe. Dargestellt sind die Restwerte zu der Ausgleichsfunktion dritter Ordnung (siehe Kapitel 3.6). Die Abweichung der Messergebnisse ohne aktive Deformationskorrektur (Aufnahme kleinerer Verformungsmesswerte) kann hier aber im

Verifizierung des Anlagensystems

direkten Vergleich der beiden Messserien aufgrund des Umfanges der Streuung erkannt werden. Beträgt die Streuung der relativen Messwerte im unteren Messbereich in der Regel bei qualitativ hochwertigen Kraftsensoren weniger als $3 \cdot 10^{-5}$, so ist diese hier in der Größenordnung von $1 \cdot 10^{-2}$.

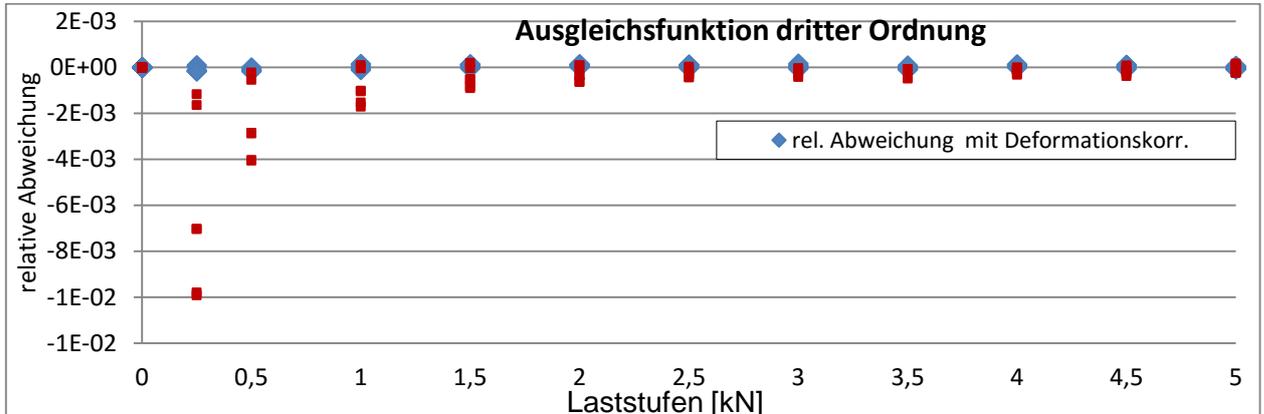


Abbildung 65: 5 kN- Restwertvergleich zur Ausgleichsfunktion mit und ohne Deformationskorrektur

Das graphisch dargestellte Ergebnis zeigt, dass es allerdings nicht möglich ist, den systematischen Einfluss der Rückstellkraft ohne aktive Deformationskorrektur aus den Restwerten des Messergebnisses zu erkennen. Extrem große Streuung bei den unteren Laststufen des Messbereiches können auch andere Ursachen haben. Eine mathematische Korrektur dieser Streuung in der Auswertung ist schwierig, da die Anteile der Rückstellkraft nicht zu ermitteln sind. Darüber hinaus sind systematische Fehler, wie hier die Rückstellkraft, grundsätzlich zu beseitigen. Dementsprechend ist die einzige Lösung, die Ursache der Streuung mechanisch während der Messung zu beseitigen. Entsprechend dieser Lösung ist dennoch eine Berücksichtigung der Rückstellkraft in der Messunsicherheitsbetrachtung vorzunehmen.

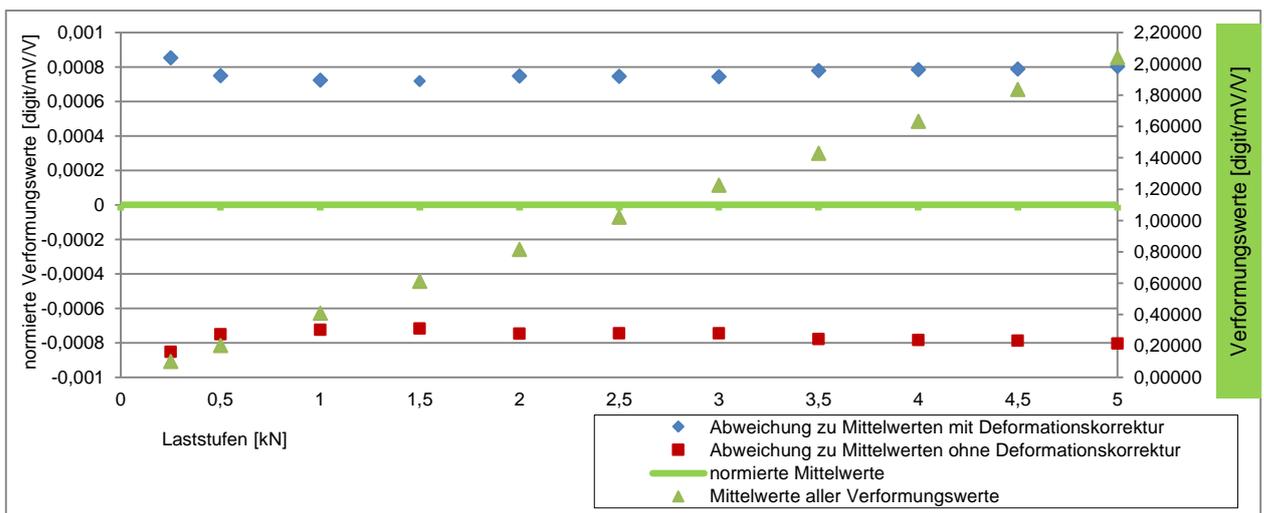


Abbildung 66: Bestimmte Abweichungen mit und ohne Deformationskorrektur zu den normierten Mittelwerten bei 5 kN

In der Abbildung 66 werden dargestellt:

- grüne Dreiecke, bezogen auf rechte Diagrammachse: Mittelwerte aller gemessenen Messreihen mit und ohne Deformationskorrektur bei zunehmender Last; X1, X2, X3; alle Messwerte in Digits (mV/V),

Verifizierung des Anlagensystems

- blaue Rauten, linke Diagrammachse: Abweichung der Messwerte mit Deformationskorrektur zu den Mittelwerten,
- rote Quadrate, linke Diagrammachse: Abweichung der Messwerte ohne Deformationskorrektur zu den Mittelwerten; Differenzen der Messwerte bis etwa 1600 Digits

ISO konforme Auswertungen der Messergebnisse nach Kapitel 3.6 von Messreihen mit und ohne aktiver Deformationskorrektur desselben Kraftsensors zeigen den offensichtlichen Unterschied in den Ergebnissen. Die größere Streuung der Messwerte ohne aktive Deformationskorrektur, und dadurch bedingt auch eine wesentlich höhere Messunsicherheitsangabe, spiegelt die Ergebnisse in einer schlechteren Klassifizierung bei kleineren Laststufen wider.

Klassifizierung										
	kN		kN		Geräteklasse Fall A	Geräteklasse Fall B	Geräteklasse Fall C	Geräteklasse Fall D	kleinste relative Unsicherheit in % für zunehmende Kräfte	kleinste relative Unsicherheit in % für zu/ abnehmende Kräfte
ab / from	0,25	bis / to	5		0,5	0,5	0,5	0,5	0,042	0,072
ab / from	0,5	bis / to	5		0,5	0,5	0,5	0,5	0,065	0,069
ab / from	1	bis / to	5		0,5	0,5	0,5	0,5	0,056	0,077
ab / from	1,5	bis / to	5		0,5	0,5	0,5	0,5	0,063	0,065
ab / from	2	bis / to	5		00	00	0,5	0,5	0,070	0,070
ab / from	2,5	bis / to	5		00	00	00	00	0,052	0,052
ab / from	3	bis / to	5		00	00	00	00	0,032	0,040
ab / from	3,5	bis / to	5		00	00	00	00	0,028	0,034
ab / from	4	bis / to	5		00	00	00	00	0,048	0,049
ab / from	4,5	bis / to	5		00	00	00	00	0,060	0,065
ab / from	5	bis / to	5		00	00	00	00	0,031	0,031

Tabelle 17: Klassifizierung und Unsicherheitsangabe eines 5 kN Kraftsensors mit Deformationskorrektur

Klassifizierung										
	kN		kN		Geräteklasse Fall A	Geräteklasse Fall B	Geräteklasse Fall C	Geräteklasse Fall D	kleinste relative Unsicherheit in % für zunehmende Kräfte	kleinste relative Unsicherheit in % für zu/ abnehmende Kräfte
ab / from	0,25	bis / to	5		keine Klasse	keine Klasse	keine Klasse	keine Klasse	3,113	3,115
ab / from	0,5	bis / to	5		keine Klasse	keine Klasse	keine Klasse	keine Klasse	1,244	1,246
ab / from	1	bis / to	5		2	2	2	2	0,447	0,451
ab / from	1,5	bis / to	5		2	2	2	2	0,265	0,266
ab / from	2	bis / to	5		1	1	1	1	0,159	0,160
ab / from	2,5	bis / to	5		1	1	1	1	0,129	0,129
ab / from	3	bis / to	5		0,5	0,5	1	1	0,128	0,130
ab / from	3,5	bis / to	5		0,5	0,5	1	1	0,123	0,125
ab / from	4	bis / to	5		0,5	0,5	0,5	0,5	0,074	0,074
ab / from	4,5	bis / to	5		0,5	0,5	0,5	0,5	0,067	0,072
ab / from	5	bis / to	5		00	00	0,5	0,5	0,063	0,063

Tabelle 18: Klassifizierung und Unsicherheitsangabe dieses 5 kN Kraftsensors ohne Deformationskorrektur

Wie vermutet, sind hier massive Klassenunterschiede in der Bewertung sowie Unterschiede in der Messunsicherheit durch die zusätzliche Störkraft der Rückstellkraft aufgetreten. Während mit erfolgter Deformationskorrektur bei den kleinen Laststufen die Genauigkeitsklasse 0,5 und eine erweiterte relative Unsicherheit von etwa 0,05% erreicht wird, ist ohne Deformationskorrektur eine Klassifizierung der kleinen Laststufen nach ISO nicht mehr möglich und die erweiterte relative Unsicherheit erreicht mehr als 3%. Das bedeutet, dass mit Korrektur ein für den Arbeitsgebrauch sehr guter Sensor klassifiziert

Verifizierung des Anlagensystems

wird, während die Bewertung ohne Deformationskorrektur denselben Kraftsensor fälschlicherweise als minderwertig ausweisen würde.

Bei der üblichen Aufteilung der Messwertanzeige von 2 Millionen Digits (mV/V) auf den Messbereich von 5000 N entspricht das einer Auflösung des Standardanzeigergerätes von 400 Digit/Newton. Demnach ist die größte mittlere Abweichung der Kraft zwischen Messungen mit Deformationskorrektur und Messungen ohne Deformationskorrektur über den gesamten Bereich von 2500 N bis 5000 N etwa 4 N. Die Deformation des TransfERNormals beträgt in diesem Intervall etwa 0,25 bis 0,36 mm. Wie aus Kapitel 7.2 der Messunsicherheitsbetrachtung hervorgeht, werden in den unteren Lastbereichen weitere Störkräfte tragend, welche die reine Rückstellkraft des Systems verstärken. Aufgrund der zum Messwert relativen Betrachtung erscheint die Streuung, wie im vorliegenden Beispiel gezeigt wird, nach unten hin als exponentiell steigend (siehe Abbildung 65). Defacto bleibt aber die Störkraft zwischen Deformationskorrektur und Nicht-Deformationskorrektur mit 4 N konstant (siehe auch Abbildung 66).

Zur Überprüfung der Anlagen wurden mehrere Serien von Messungen mit unterschiedlichen TransfERNormalen und über den gesamten Messbereich verteilten Nominalwerten ausgeführt. In diesen Messungen bestätigt sich wieder die Annahme, dass bei größeren Laststufen der Einfluss der Deformation geringer ausfällt, als bei kleinen Laststufen. Daher ist auch der Messunsicherheitsanteil des Einflusses, wie in 7.2.4 bereits vermutet, relativ gesehen im unteren Messbereich am größten.

Im Vergleich dazu ist anhand des Beispiels eines 200 kN-TransfERNormals gezeigt, dass bei einer Aufteilung der Messwertanzeige von 2000000 Digits (mV/V) auf 200000 N dies letztlich 10 Digit/Newton entspricht. Demnach ist die größte mittlere Abweichung der Kraft zwischen Messungen mit Deformationskorrektur und Messungen ohne Deformationskorrektur im Bereich 120 kN bis 180 kN etwa 8 N. Die Deformation des TransfERNormals betrug in diesem Intervall etwa 1,7 bis 2,3 mm.

6.2.3 Interner Vergleich der Gewichtscheiben

Wie in Kapitel 5.2.4 im Detail beschrieben, erfolgt die Aufteilung der Gewichtscheiben in Dekaden nach dem Schema der Masse: 1-2-2-5-10-20-20-50- usw.. Um eine maximale Belastung von 250 kN Nominalwert zu erreichen, wurden daher einzelne Laststapel zusätzlich eingefügt. Demnach sind die Massescheiben: 200N, 500N, 1000N; 2000N; 5000N; 10 kN; 20 kN in mehrfacher Ausführung vorhanden. Das bedeutet, nicht nur die Gewichtscheiben der "2er" Serien sind mehrfach vergeben, sondern es gibt auch 3 Stk. 5 kN-Scheiben, 2 Stk. 10 kN-Scheibenstapel und 3 Stk. 20 kN-Scheibenstapel.

Der Vorteil dieser Mehrfachbelegung ist, dass aufgrund der separaten Luftauftriebsbestimmung von jeder Gewichtscheibe durch einen Direktvergleich dieser Massestapel in einem Routinemessablauf nicht nur die Maschinenfunktionen, sondern auch Teile der Auswertung überprüft werden können.

Um die Massescheiben und Massestapel gleicher Nominalwerte unterscheiden zu können, wurden diese in jeder Gewichtsklasse mit den Ziffern "1", "2" und "3" gekennzeichnet.

Bei dem infolge beschriebenen Messablauf wurde bei jeder Messreihe jede Gewichtscheibe bei steigender Kraft dreimal zum Eingriff gebracht, wobei die Reihenfolge der Aufbringung der Massescheiben verändert wurde. Bei den ersten beiden Zyklen wurden die verschiedenen Massen in der Reihenfolge der

Verifizierung des Anlagensystems

Kennzeichnungsnummern zum Eingriff gebracht: 2 kN: 1-2; 5 kN: 1-2-3; 10 kN 1-2; 20 kN: 1-2-3. Bei dem dritten Zyklus in der Messreihe wurden die Massescheiben in umgekehrter Reihenfolge aufgelegt: 2-1 oder 3-2-1.

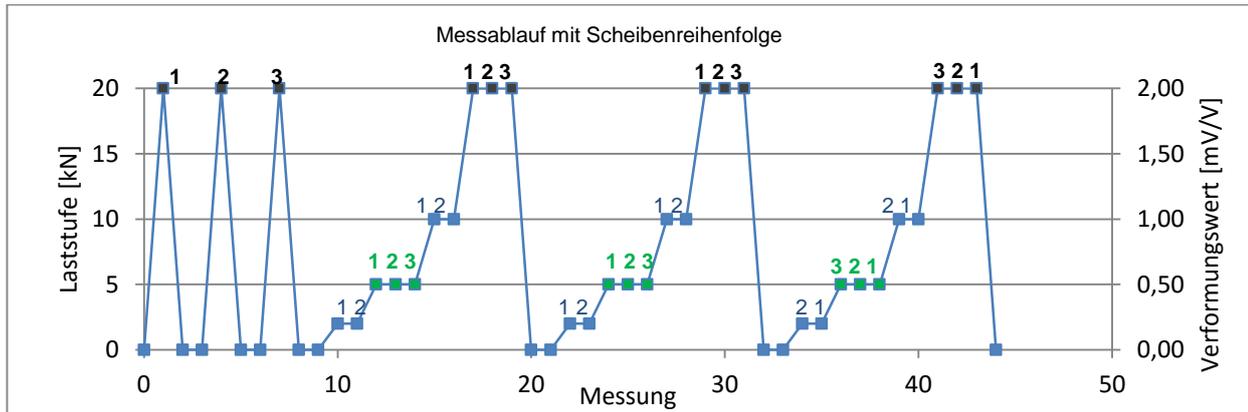


Abbildung 67: Messablauf mit der Reihenfolge der zum Eingriff gebrachten Massen

Die in Abbildung 68 dargestellten Ergebnisse sind die nullkorrigierten Verformungswerte für die Nominallast bei allen Laststufen (2 kN, 5 kN, 10 kN und 20 kN) auf ein TransfERNormal. Dabei wurden die Verformungswerte der 3 Stk. 20 kN-Massestapel, 2 Stk. 10 kN-Massestapel, 3 Stk. 5 kN-Massescheiben und 2 Stk. 2 kN-Massescheiben nach Ablauf aus obigem Diagramm in zwei aufeinander folgenden Messabläufen, Reihe 1 und Reihe 2, ausgewertet. Bei allen Vergleichen wurde die Last alternierend in unterschiedlicher Reihenfolge durch die drei 20 kN-Massestapel realisiert, wobei jeweils der aktuelle Luftauftrieb berücksichtigt worden ist. Theoretisch gesehen, sollten für jede Laststufe die erhaltenen Verformungswerte nahezu ident sein, da die realisierte Kraft gleich ist. Vergleicht man nun alle mehrfach vorhandenen Massescheiben direkt miteinander, so erhält man bei allen Laststufen ein analoges, reproduzierbares Bild bezüglich der Anordnung der Messwerte. Es zeigt sich nämlich eine gleichartige Streuung der aufgezeichneten Verformungswerte bei allen Massenvergleichen. Die Verteilung liegt bei den 20 kN-Massescheiben bei etwa 300 mV/V und ist damit relativ vom Messwert und der Gleichartigkeit der realisierten Kraft betrachtet mit $6 \cdot 10^{-4}$ außergewöhnlich hoch. Bei den anderen Laststufen ist das Verhältnis ähnlich.

Analysiert man im Speziellen die Laststufen, bei denen drei Massescheiben zur Verfügung stehen (20 kN und 5 kN), so erkennt man, dass die in der Reihenfolge zweite (mittlere) Masse die geringsten Streuungen in den Verformungswerten aufweist. Die erste und dritte Masse liefern Verformungswerte mit einer scheinbar erheblich größeren Streuung. Wird am Beispiel der 5 kN-Laststufe (Abbildung 68 links unten) systematisch die Reihenfolge der aufgebrauchten Massescheiben auf den Sensor nachvollzogen, so zeigt sich aus zwei unabhängigen Messserien, dass die Streuungen nicht durch die aufgebrauchten Laststufen verursacht werden, sondern direkt mit der Charakteristik des verwendeten TransfERNormals zusammenhängen. Die Streuung der Werte korreliert streng mit der Reihenfolge der Belastung und der Vorbelastung des Sensors.

Die fast symmetrischen Bilder mit den größeren Streuungen der Scheiben Nr. 1 und Nr. 3 aus Abbildung 68 entpuppen sich also als Drift des verwendeten TransfERNormals unter der dreimaligen Verwendung derselben Laststufe.

Verifizierung des Anlagensystems

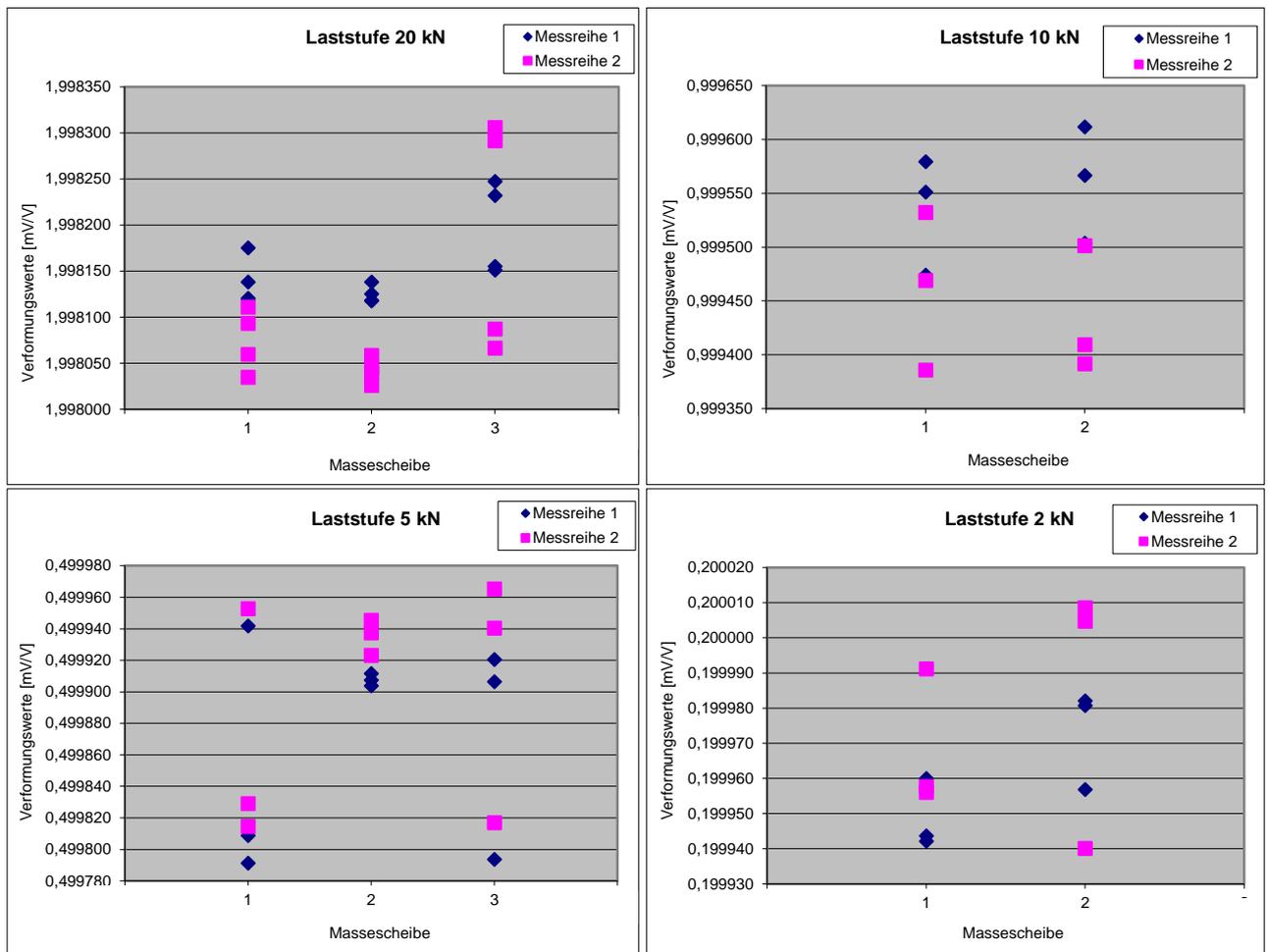


Abbildung 68: Verformungswerte der 20 kN, 10 kN, 5 kN und 2 kN-Massescheiben im Vergleich

Vergleicht man dazu die ersten beiden Zyklen beider Messreihen, so ähnelt sich das Verhalten der Verformungswerte, wobei die Ergebnisse der Scheibe 2 und der Scheibe 3 fast ident sind. Die Werte der Scheibe 1 liegen deutlich tiefer. Berücksichtigt man bei den dritten Zyklen jeder Messserie die Reihenfolge der aufgelegten Massescheiben (gestrichelte Linie in Abbildung 69) so fällt auf, dass die erste zum Eingriff gebrachte Scheibe (Nr. 3) völlig abweichende Verformungswerte von den beiden vorangegangenen Zyklen aufweist. Diese sind aber nahezu ident mit den Werten der ersten Scheibe aus Zyklus eins und zwei.

Betrachtet man den Verlauf der aufsteigenden Messwerte unter dem Gesichtspunkt der Reihenfolge des Eingriffes, erhält man einen identen Kurvenverlauf. Es kann daraus geschlossen werden, dass diese typisch ansteigenden Messwerte aus dem Driftverhalten des Transfernormals verursacht werden und dass nach einer Vorbelastung stabile und reproduzierbare Verformungswerte zu erwarten sind.

Vergleicht man die erzielten Verformungswerte der 5 kN-Laststufe aus Abbildung 68 und Abbildung 69 mit jenen der 20 kN-Laststufe und berücksichtigt dabei ebenfalls die Reihenfolge, erhält man ein analoges Ergebnis, dargestellt in Abbildung 70.

Verifizierung des Anlagensystems

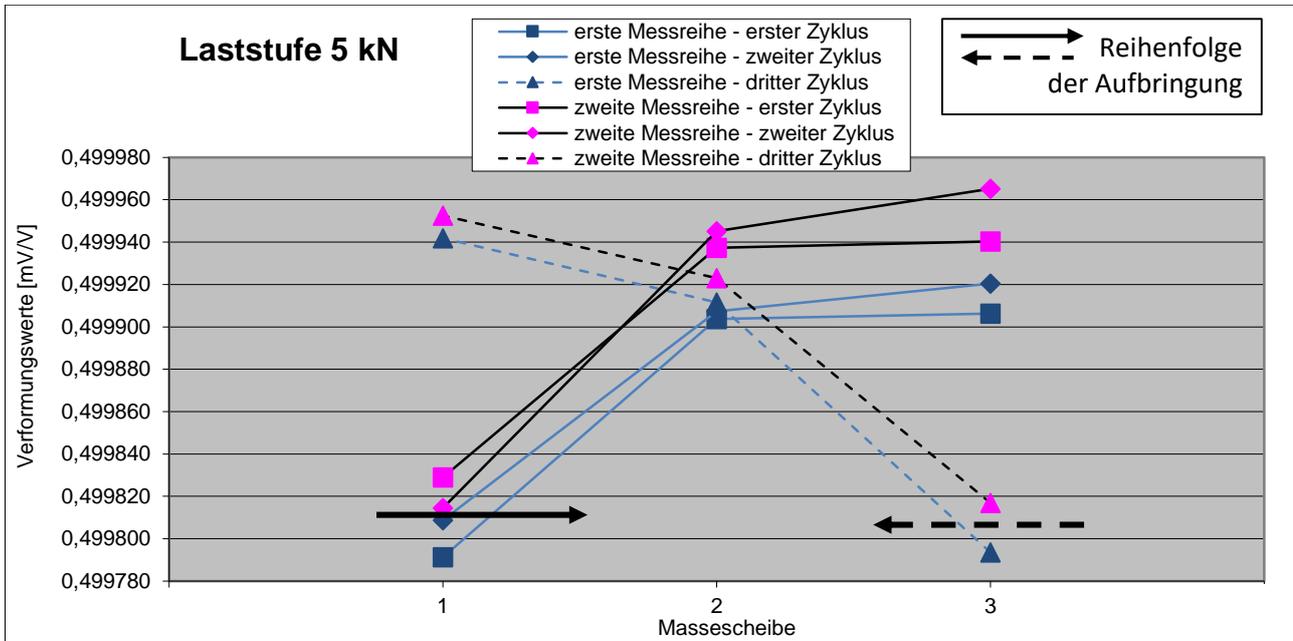


Abbildung 69: Verformungswerte der ersten beiden Zyklen im Vergleich mit dem dritten Zyklus

Die Platzierung der Messwerte der einzelnen Laststufen in den Zyklen zeigt die gleiche Form im Ablauf. Faktisch ergibt sich, dass die Streuung des Ergebnisses kein Abbild der Genauigkeit der Realisierung der Kraft darstellt, sondern nur die Drift innerhalb derselben Belastung. Bestätigt wird diese Hypothese der Drift durch den Vergleich mit den Verformungswerten aus den Vorbelastungen. Stellt man die Ergebnisse der Vorbelastungen einander gegenüber (Belastungswechsel zwischen Null- und Vollast mit unterschiedlichen Massestapel), so erhält man trotz Einflusses der Einlaufphase ein stabileres Messergebnis (Messwerte mit roten Linien in Abbildung 70).

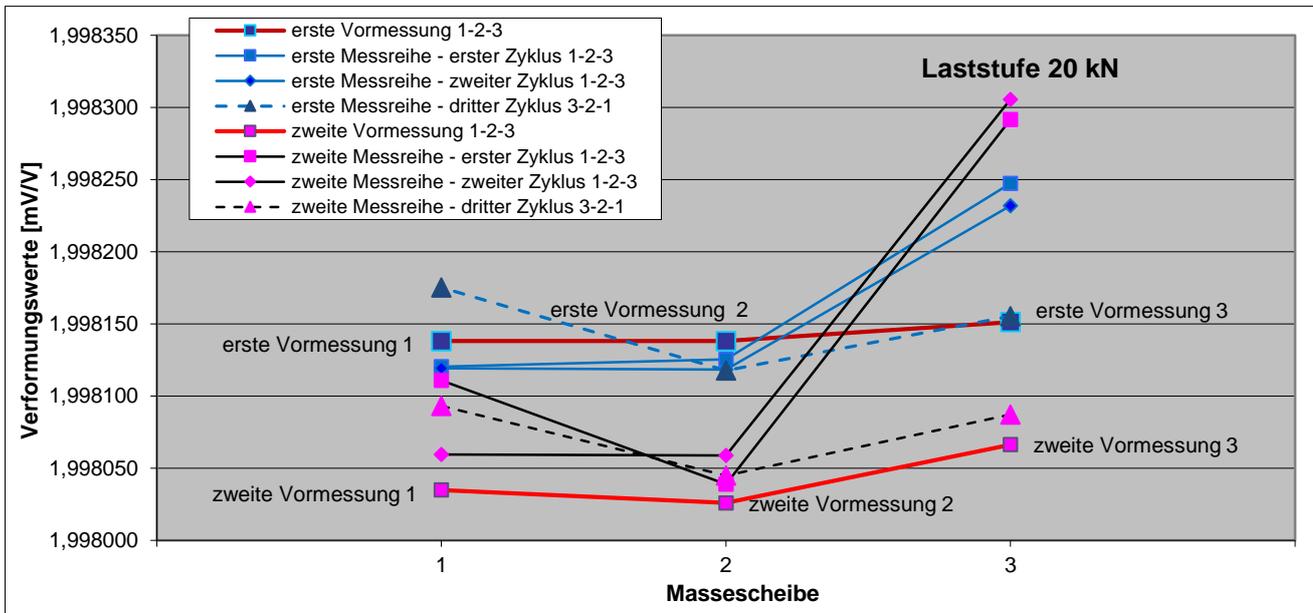


Abbildung 70: Vergleich der Zyklen zweier Messserien

Als Erkenntnis kann gewonnen werden, dass der direkte Vergleich der Massescheiben nur alternierend mit der Nulllast oder in identen Messzyklen erfolgen kann, wobei Einlaufphasen zu berücksichtigen sind. Durch einen ansteigenden und kontinuierlichen

Verifizierung des Anlagensystems

Direktvergleich der Massen gleicher Laststufen, wie in Abbildung 67 vorgesehen, ist nicht zielführend.

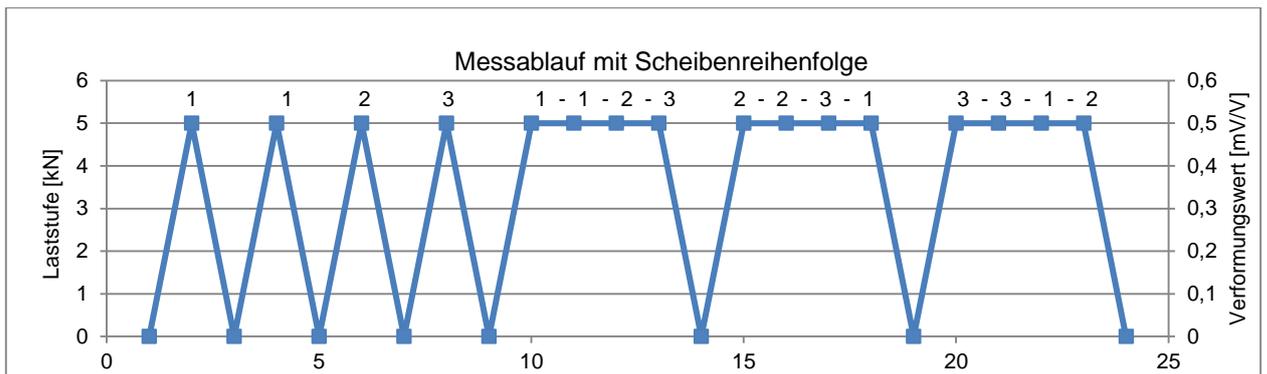


Abbildung 71: Alternativer Messablauf zum Massescheibenvergleich

Am Beispiel der 5 kN-Laststufe soll gezeigt werden, dass die Annahme des Einflusses der Drift der Transferrnormale belegt werden und mit einem entsprechenden alternativen Messablauf minimiert werden kann. Verwirft man in jedem Zyklus die erste Belastung als Einlaufphase, so zeigt sich die Vergleichbarkeit der Laststufen und die Reproduzierbarkeit der realisierten Kraft unter Verwendung unterschiedlicher Massescheiben. Die Auswirkung wird im Vergleich der Ergebnisse der Abbildung 70 und Abbildung 72 verbildlicht, wenn man bedenkt, dass an den Messungen, den verwendeten Normalen und Sensoren bis auf die Reihenfolge des Messablaufes nichts verändert worden ist.

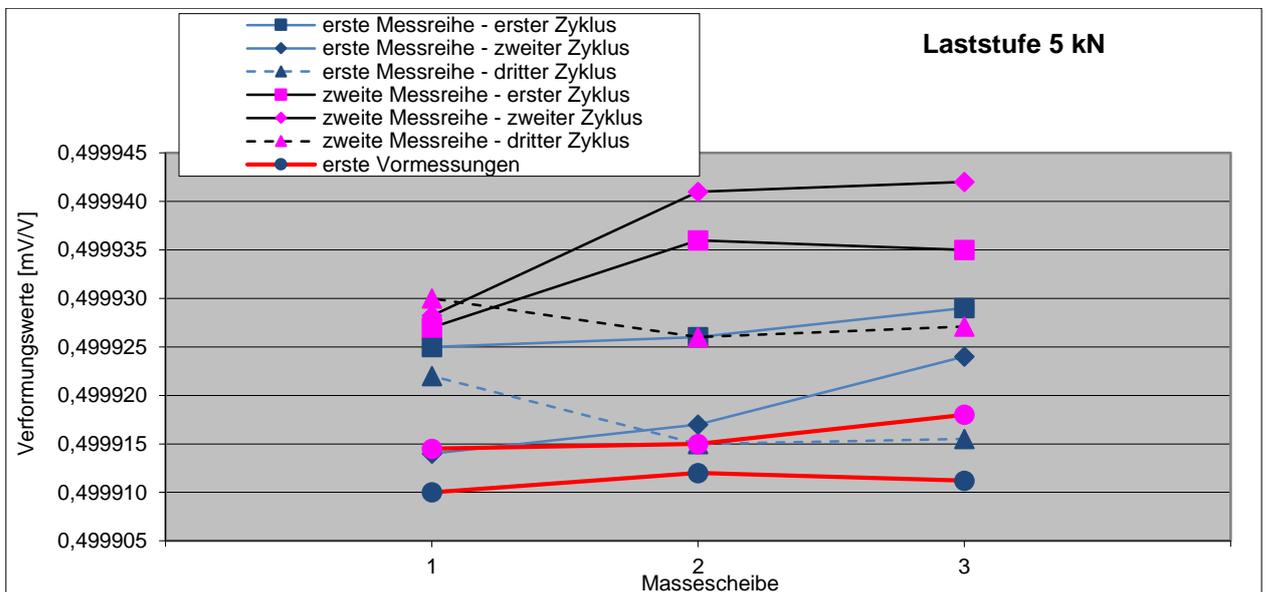


Abbildung 72: Ergebnis des 5 kN-Massescheibenvergleich mit alternativem Messablauf

Mit diesen Messungen konnte das Zwischenziel zum Nachweis der Prozessbeherrschung erbracht werden. Damit wurde die Grundlage geschaffen, die zur Validierung der Einsatztauglichkeit und somit als Basis zur gegenseitigen Anerkennung notwendig ist.

7 Validierung des realisierten Kraftanlagesystems

In Kapitel 6 ist der bedeutendste messtechnische Teil dieser Eignungsprüfung beschrieben. Der Methode zur Beweisführung über die Eignung der Anlage folgend, wird hier nach Vergleichbarem gesucht, bzw. Vergleichbares festgelegt, um die Ergebnisse der einzelnen Prüfungen gegenüberstellen und beurteilen zu können.

Dabei wurde unter Verwendung von TransfERNormalen, die unter speziellen Bedingungen kalibriert wurden, auf die bestehenden und erprobten Totlast-Maschinen als nationales Normal der Kraft der PTB zurückgegriffen [51]. Diese Messungen bilden die Grundlage im BEV zur Validierung dieser Anlage und des Prozesses zur Realisierung der Kraft. Sie sind die notwendige Beweisführung über die Prozessbeherrschung und Basis für die Implementierung in das QM-System. Damit konnte der Nachweis über die Einsatzfähigkeit der realisierten innovativen Lösungen zur Erweiterung des Messbereiches und der Verbesserung der Messgenauigkeit erbracht werden.

Auf Basis einer wissenschaftlichen Zusammenarbeit mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt wurden umfangreiche Vergleichsmessungen mit bestehenden und anerkannten Kraftnormalanlagen durchgeführt und somit die Verknüpfung mit den nationalen Normalen der Kraft in Deutschland geschaffen. Somit wurde die neue österreichische Kraftskala mit der anerkannten Kraftskala der PTB verglichen und bewertet.

Damit aufgrund erzielter Messergebnisse die vom BEV ausgestellten Zertifikate durch die Unterzeichnerstaaten des CIPM-MRA-Abkommens akzeptiert werden, ist diese umfassende Beweisführung obligatorisch. Darüber hinaus bildet diese Beweisführung auch den Grundstock für nationale und internationale wissenschaftliche Projekte, sowie für die anerkannte messtechnische Kompetenz des BEV im Fachbereich Kraft.

7.1 Intention der Validierung

Die Verifizierung aus Kapitel 6 hat ergeben, dass die beschriebenen Anforderungen aus dem Lastenheft auf die Art erfüllt worden sind wie diese im Pflichtenheft beschrieben worden sind. Das heißt, dass alle Anforderungen, die im Lastenheft aufgeschlüsselt sind, erfüllt und umgesetzt worden sind. Im Konkreten bedeutet die Untersuchung, dass die realisierte Anlage genau die beschriebenen Anforderungen in Konstruktion, Verfahrensprinzip und Ausführung einhält, und dass das geforderte Gesamtergebnis, ausgedrückt über die erreichte Messunsicherheit, wie aufgeschlüsselt einen Wert von $2 \cdot 10^{-5}$ nicht übersteigt.

Bei der Verifizierung wurde aber keine Aussage darüber getroffen, ob diese vorher festgelegten Anforderungen richtig gewählt, also richtig angenommen wurden und damit geeignet waren, und, ob das BEV als Verwender dieses Anlagensystems das gesetzte Ziel damit erreichen kann. Das Ziel des BEV als Metrologieinstitut war nicht die Erfüllung und Realisierung des im Pflichtenheft festgelegten Konzeptes, sondern vielmehr die Erfüllung jener Aufgaben aus dem Bereich der Kraftmessung, die einem nationalen Metrologieinstitut von Kunden und der internationalen Gemeinschaft gestellt werden.

Das Ziel, das hier umgesetzt werden muss, ist die Validierung zur Einsatztauglichkeit der realisierten Anlage und die messtechnische Beweisführung der Prozessbeherrschung. Als Prozessbeherrschung wird hier die reproduzierbare Einhaltung vorgegebener

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

Grenzwerte unter anerkannten und festgelegten Bedingungen verstanden, sowie die vergleichende Betrachtung aller möglicher Messverfahren und deren Zusammenhänge. Das Ziel der Validierung ist, die Voraussetzung zu schaffen und den Beweis zu erbringen, der zur internationalen Anerkennung des Prozesses und damit zur Akzeptanz der Kalibrierergebnisse im Rahmen des CIPM-MRA-Abkommens führt.

Die Methode ist, unter anerkannten und vorgegebenen Bedingungen messtechnisch jene Faktoren dieser Anlage zu erfassen, die Einfluss auf die Realisierung der Kraft haben.

Im Rahmen eines internationalen Projektes sind Vergleichsmessungen mittels bekannter Transfer-Normale mit bestehenden, erprobten Totlastkraftanlagen anderer NMIs durchzuführen, deren Auswertung den notwendigen Beweis über die Prozessbeherrschung und Einsatzfähigkeit der Anlage geben.

7.2 Ausgewiesenes Messunsicherheitsbudget

Im Zuge der Aufschlüsselung der messunsicherheitsrelevanten Einflussgrößen der Kraftnormalanlagen aus Kapitel 4.1, Abbildung 12 und Abbildung 13, erfolgt eine Codierung der Beiträge zur Vorbereitung des Messunsicherheitsbudgets nach GUM-Work-Bench in Tabelle 20, wobei im Folgenden keine Beiträge beachtet werden, die bei der hydraulischen Übersetzung für die Realisierung der großen Laststufen (>250 kN) tragend werden. Die Zuordnung zu den Variablen erfolgt nach physikalischen und mechanischen Gesichtspunkten und basiert auf Überlegungen, diese aufgrund von Erfahrungswerten aus der Kraftmessung zuordnen und in ihrer Größe abschätzen zu können. Werden Variablen mehrfach zugeordnet, so lassen sich die Einflussgrößen nicht eindeutig zuordnen oder werden bewusst zusammengefasst um sie hier messtechnisch erfassbar zu machen. So werden z.B. die betrachteten Einflüsse der Erdschwere g , Höhenkorrektur, Gezeiten, Polschwankungen und Gravitation anderer Massen zusammengefasst, da sie im Nachfolgenden aus Überlegungen der Auswirkung auf das Messergebnis messtechnisch nicht separat aufgeschlüsselt worden sind.

Ermittelte Störgröße für GUM	Berücksichtigung in der Variable
• <i>Technik und Konstruktion:</i>	-
Trägerkonstruktion	-
Durchbiegung	F_{St1}
Schwingungsdämpfung	F_{St2}
Steifigkeit	F_{St3}
Verformung durch Temperaturänderung	F_{St4}, F_Q
Wärmeabfuhr	F_{St12}
Verformung durch Kräfte	F_{St5}
Dimensionierung der Tragkonstruktion für Gewichte (Gehänge)	-
Wahl des Kraftbereiches	-
Messbereichsumfang	$F_{St A}, F_{St B}$
Leergewichtskompensation der Gehänge	$F_{St C}$
Gegengewichte	$F_{St D}$
Krafteinleitung und Druckplatten	-
nicht planparallele Auflageflächen	F_Q
Momentbeaufschlagung (Drehbewegung)	F_Q
Exzentrizität der Krafteinbringung	F_Q
Thermische Verformung	F_Q
• <i>Technik und Verfahrenstechnik</i>	-
Gewichte	m_0
Einzelaufnahme / Auflage	F_{Q4}
Zentrierung (zentrische Krafteinleitung in Trägerkonstruktion)	F_Q
Pendeln	F_Q
Zentrische Justierbarkeit	F_{St6}
Temperaturänderung	V_G
Oberflächenausführung Massen	m_1

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

Ermittelte Störgröße für GUM	Berücksichtigung in der Variable
Magnetische Eigenschaften	m ₂
Gehänge	-
Leergewichts-Kompensation der Gewichtsaufnahme	F _{St A} , F _{St B}
Sensitivität	F _{St A} , F _{St B} , F _{St C} , F _{St D}
Reibung Festkörperlager	F _{St C} , F _{St D}
Schwingungsdämpfung	F _{St C} , F _{St D}
Öldämpfer Auftrieb, Meniskusbildung	F _{St A} , F _{St B} , F _{St C} , F _{St D}
Meniskusdeformation Öldämpfer durch Belastung	F _{St 7}
Kriechverhalten	m _{Gehä} , m _{GeGew}
Pendelbewegung, Schwingungen	F _{Q C} , F _{Q D}
Rückstellung	V _{Gehä} , V _{GeGew} , ρ _{L1,2,3,4}
Krafthaltung	-
Koppelemente	F _{St 8} , F _Q
Verlauf der Krafthaltung	F _{St 9}
Sensoren Messauflösung	F _{St 9}
Regelgenauigkeit	F _{St 10}
Krafthaltung Konstanz	F _{St 10}
Steuertechnische Einrichtungen	-
Korrektur der Verformung	F _{St 11}
Schwingungsdämpfung	F _{St 11}
durch Konvektionsströmungen in der Maschine ausgelöste parasitäre Kräfte	F _{St 12}
Störfelder (magnetische Felder, elektrostatische Aufladung)	F _{St 13}
Temperaturänderung durch Betrieb	F _{St 14}
Sicherheitseinrichtungen	F _{St 12} , F _{St 16}
Einfluss der Auffangvorrichtung durch erhöhte Sicherheit bei Auflagen und Gehänge	ρ
Höhenkorrektur der Erdbeschleunigung	g
• <i>Maschinen interne Reaktion der Kraftaufbringung</i>	-
Verformung durch Krafteinleitung, Durchbiegung	F _{St 15}
Temperaturänderung durch Verformung	F _{St 16}
Querkräfte durch Kraftschluss zu Kraftaufnehmer	F _Q
• <i>Umgebungsbedingungen</i>	-
Gewichte	m ₀
Luftauftrieb der Massen	V _G , ρ _L
Wasserhaut bei Massen	m ₃
Verschmutzung der Massen	m ₄
Gravitation der Massen	g
Bediener	Z
Erdbeschleunigung	g
Gezeiten, Polschwankungen	g

Tabelle 19: Zuordnung der Einflussgrößen auf Störkräfte und parasitäre Kräfte

7.2.1 Modellgleichungen im Guide of the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)

Wie bereits beschrieben, ist vor jeder Darstellung einer Kraft zur Bestimmung der zugeordneten Messunsicherheit die Erstellung einer Modellgleichung notwendig. Die Vorgehensweise ist im Calibration Guide cg-4 der EURAMET [5] im Detail beschrieben. Erst nach Festlegung des Auswertalgorithmus für die zu realisierende Kraft, sowie der Festlegung des Auswertalgorithmus für die Kalibrierung des Krafttransfornormales und der detaillierten Betrachtung und Analyse der Einflussfaktoren ist die Erstellung und Anwendung der Modellgleichung nach den Richtlinien des GUM möglich.

Nach der Ableitung der Kraft und der Modifikation der Grundgleichung auf das Verfahren aus Kapitel 4.2 ist die Kraft F :

$$F = \sqrt{\left((m - (V_G \cdot \rho_L)) \cdot g + \left(\sqrt{((m_{Gehä} - (V_{Gehä} \cdot \rho_{L3})) \cdot g_1 + F_{St C})^2 + F_{Q C}^2} - \sqrt{((m_{GeGew} - (V_{GeGew} \cdot \rho_{L4})) \cdot g_2 + F_{St D})^2 + F_{Q D}^2} \right) + F_{St} \right)^2 + F_Q^2}$$

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

Entsprechend der Zuteilung der Codierung der Störkräfte und Querkräfte aus Tabelle 20 gestaltet sich die Modellgleichung der Kraftrealisierung für eine primäre Kraftnormalanlage nach der Darstellungsart nach dem GUM-Work-Bench wie folgt:

$$F = \sqrt{((m - W_A) \cdot g + F_{\Delta A} + F_{St})^2 + F_Q^2} + Z \quad \text{mit den Teilergebnissen:}$$

$$F_{\Delta A} = \sqrt{((m_{Geh\bar{a}} - (V_{Geh\bar{a}0} \cdot \rho_{L3})) \cdot g_1 + F_{StC})^2 + F_{QC}^2} - \sqrt{((m_{GeGew} - (V_{GeGew0} \cdot \rho_{L4})) \cdot g_2 + F_{StD})^2 + F_{QD}^2}$$

$$V_G = V_0 \cdot [1 - \kappa(p - p_0)] \cdot [1 + \alpha_V(t - t_0)] \quad \text{und} \quad W_A = (V_G \cdot \rho_L) \quad \text{sowie}$$

$$F_{St} = \sqrt{\sum_{i=1}^{16} F_{Sti}^2}$$

Zur besseren Nachvollziehbarkeit erfolgte in der Darstellung eine Aufteilung der Gesamtfunktion über Zwischenergebnisse von Teilfunktionen, wobei zusammengefasst die nachfolgenden Größen den eingesetzten Variablen entsprechen:

Größe	Einheit	Definition	Quelle der Größe und der Unsicherheitsangabe
F	N	Kraft Ergebnis	
m	kg	Zwischenergebnis: Tatsächliche Masse	
m ₀	kg	Masse der Gewichtscheiben	Messergebnis Massebestimmung Kalibrierschein
m ₁		Faktor Gewichte: Oberflächenausführung/ pro kg	Erfahrungswert Massebestimmung [13]
m ₂		Faktor Gewichte: Magnetische Eigenschaften/ pro kg	Erfahrungswert Massebestimmung [13]
m ₃		Faktor Gewichte: Drift der Masse durch Wasserhaut/ pro kg	Erfahrungswert Massebestimmung [32], [13]
m ₄		Faktor Gewichte: Drift der Masse durch Verschmutzung/ pro kg	Erfahrungswert Massebestimmung BEV
W _A	kg	Zwischenergebnis: Wägewert des Auftriebes	
V _G	m ³	Zwischenergebnis: aktuelles Volumen der Gewichte	
V ₀	m ³	Volumen der Gewichte bei 20 °C	Messergebnis Volumenbestimmung Kalibrierschein
ρ _L	kg/m ³	Luftdichte (gemessen)	Messergebnisse [33]
g	m/s ²	Fallbeschleunigung auf der Höhe des Schwerpunktes der Gewichtscheiben	Messergebnisse [43]; festgelegt
F _{ΔA}	N	Zwischenergebnis: Auftriebskraft aus geändertem Systemauftrieb (Gehänge/Gegengewichte) im Laufe der Messserie	
m _{Gehā}	kg	Masse des Gehänges	Messergebnis Massebestimmung Kalibrierschein
V _{Gehā}	m ³	Volumen des Gehänges	Messergebnis Volumenbestimmung Kalibrierschein
ρ _{L3}	kg/m ³	Luftdichte (gemessen) bei Gehänge	Messergebnisse [33]
g ₁	m/s ²	Fallbeschleunigung auf der Höhe des Schwerpunktes des Gehänges	Messergebnisse [43]; festgelegt
F _{StC}	N	Zusätzliche Störkraft durch Änderung des Gehänges: Öldämpfer: Auftrieb	In Analogie zu 1000N Laststufe abgeschätzt und festgelegt
F _{QC}	N	Zusätzliche Querkraft durch Änderung des Gehänges: Asymmetrie- Schrägstellung	In Analogie zu 1000N Laststufe abgeschätzt und festgelegt
m _{GeGew}	kg	Masse des Gegengewichts	Messergebnis Massebestimmung Kalibrierschein
V _{GeGewā}	m ³	Volumen des Gegengewichts	Messergebnis Volumenbestimmung Kalibrierschein
ρ _{L4}	kg/m ³	Luftdichte (gemessen) bei Gegengewicht	Messergebnisse [33]
g ₂	m/s ²	Fallbeschleunigung auf der Höhe des Schwerpunktes des Gegengewichts	Messergebnisse [43]; festgelegt
F _{StD}	N	Zusätzliche Störkraft durch Änderung des Gegengewichts: Öldämpfer: Auftrieb	In Analogie zu 1000N Laststufe abgeschätzt und festgelegt
F _{QD}	N	Zusätzliche Querkraft durch Änderung des Gegengewichtes	In Analogie zu 1000N Laststufe abgeschätzt und festgelegt
κ	1/Pa	Kompressibilität der Gewichte	Bekannt; u.a. [13]
p	Pa	Druck auf die Gewichte	Messergebnisse [33]
p ₀	Pa	Bezugsdruck	Definition [8]
α _V	1/°C	Ausdehnungskoeffizient Stahl	Bekannt; u.a. [13]
t	°C	Messtemperatur bei Gewichten	Messergebnisse [33]
t ₀	°C	Bezugstemperatur	Definition [8]
F _{St}	N	Zwischenergebnis: Summe Zusätzliche Störkraft durch Aufbringung der Massen	
F _{St1}	N	Störkraft- Komponente: Trägerkonstruktion Durchbiegung	Abschätzung: Schrägstellung der Auflageflächen; Winkelfehler [36],[38]
F _{St2}	N	Störkraft- Komponente: Trägerkonstruktion: Schwingungsdämpfung	Abschätzung: Schrägstellung der Auflageflächen; Winkelfehler [36],[38]
F _{St3}	N	Störkraft- Komponente: Trägerkonstruktion: Steifigkeit	Abschätzung: Schrägstellung der Auflageflächen; Winkelfehler [36],[38]
F _{St4}	N	Störkraft- Komponente: Trägerkonstruktion: Verformung durch Temperaturänderung	Abschätzung: Schrägstellung der Auflageflächen; Winkelfehler [36],[38]

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

Größe	Einheit	Definition	Quelle der Größe und der Unsicherheitsangabe
F_{St5}	N	Störkraft- Komponente:Trägerkonstruktion: Verformung durch Kräfte	Abschätzung: Schrägstellung der Auflageflächen; Winkelfehler [36],[38]
F_{St6}	N	Störkraft- Komponente: Gewichte: zentrische Justierbarkeit	Abschätzung: Schrägstellung der Auflageflächen; Winkelfehler [36],[38]
F_{St7}	N	Störkraft- Komponente: Meniskusdeformation Öldämpfer durch Belastung	Abschätzung: Kraft durch Masse Ölmeniskus auf Gestänge
F_{St8}	N	Störkraft- Komponente: Krafthaltung: Koppелеlement	Abschätzung: systematische Adhäsionskraft bedingte Verschiebung der Hysterese bei Lösung des Kontaktes [36]
F_{St9}	N	Störkraft- Komponente: Krafthaltung: Verlauf der Krafthaltung	Abschätzung: systematische Adhäsionskraft bedingte Verschiebung der Hysterese bei Lösung des Kontaktes [36]
F_{St10}	N	Störkraft- Komponente: Krafthaltung: Regelgenauigkeit, Konstanz	Abschätzung: Rückstellung Hysterese [36]
F_{St11}	N	Störkraft- Komponente: Steuertechnische Einrichtung: Korrektur der Verformung; Schwingungsdämpfung	Abschätzung: Rückstellung Hysterese
F_{St12}	N	Störkraft- Komponente: Durch Konvektionsströmungen in der Maschine ausgelöste Störkräfte / parasitäre Kräfte	Abschätzung Strömungswiderstandskraft über c_w -Wert und Bezugsfläche
F_{St13}	N	Störkraft- Komponente: Störfelder (Magnetische Felder, Elektrostatische Aufladung)	Abschätzung Kraft Lorentzkraft und Coloumbkraft über Fläche, Herstellerangaben
F_{St14}	N	Störkraft- Komponente: Temperaturänderung durch / beim Betrieb	Abschätzung Kraft über Längenänderung durch Wärmeausdehnungskoeffizient
F_{St15}	N	Störkraft- Komponente: Kraftaufbringung: Verformung durch Krafteinleitung, Durchbiegung	Abschätzung: Schrägstellung der Auflageflächen; Winkelfehler[36],[38]
F_{St16}	N	Störkraft- Komponente: Eigenerwärmung durch Betrieb, Temperaturänderung durch Verformung	Abschätzung, Richtwert
F_Q	N	Summe der Querkräfte durch Aufbringung der Massen	Abschätzung nach 3.5
Z	N	Zuschlag für Bedienungseinfluss	Sicherheitszuschlag Erfahrung BEV

Tabelle 20: Liste der Größen zur Modellgleichung und deren Ursprung

Der Vorteil bei der Verwendung des GUM-Work-Bench ist die Möglichkeit, in Kenntnis allgemeiner technischer Zusammenhänge Korrelationen der einzelnen Einflüsse festzulegen, die bei der Berechnung der Gesamtmessunsicherheit automatisch berücksichtigt werden. Bei gegenständlicher Betrachtung wurden folgende Korrelationskoeffizienten definiert:

Korrelationen wurden zwischen den nachfolgenden Einflüssen definiert:

$$r(F_{St1}, F_{St3}); r(F_{St1}, F_{St5}); r(F_{St1}, F_{St15}); r(F_{St1}, F_{Q1}); r(F_{St6}, F_Q);$$

$$r(F_{St4}, F_{St16}); r(F_{St4}, F_Q); r(F_{St15}, F_Q); r(F_{St16}, F_Q)$$

Die Gründe, warum Korrelationen bei diesen Variablen definiert wurden, liegen in der physikalischen und mechanischen Einschätzung. Obwohl gegenseitige Beeinflussungen in diesen Variablen vorliegen, wurden sie nicht zusammengefasst, da sie getrennt in ihrer möglichen Auswirkung besser abschätzbar sind. Durch die Vorgehensweise diese Komponenten einzeln abzuschätzen, ist der erzielte Gesamtfehler durch die Addition der Varianzen nicht zu vermeidender Einzelfehler geringer [48].

7.2.2 Verteilung der Messunsicherheitskomponenten

Aufgrund identer Realisierungsmethoden beider Anlagen, kann für alle Berechnungsbeispiele dieselbe Modellgleichung verwendet werden. Eine erste Betrachtung erfolgt über die erweiterte relative Unsicherheit, also die erweiterte Unsicherheit bezogen auf die Laststufe.

In Tabelle 20 geht man von den bekannten oder gemessenen Werten ($m_0, m_1, m_2, m_3, m_4, F_{\Delta A}, m_{Geh\ddot{a}}, m_{GeGew}, V_G, V_{Geh\ddot{a}}, V_{GeGew\ddot{a}}, \rho_L, \rho_{L3}, \rho_{L4}, g, g_1, g_2, t, t_0, p, p_0, \kappa$, und α_V) mit den bekannten zu erwartenden dazugehörigen Messunsicherheiten bei angenommenen Normalverteilungen oder Grenzwerten bei angenommenen Rechteckverteilungen aus. Während im Folgenden die Größe m_0 , die für die Darstellung der Laststufe verantwortlich ist, zur Auslegung der Laststufen variiert wird, sind alle anderen Größen (wie $F_{\Delta A}, V_G, V_{Geh\ddot{a}}, V_{GeGew\ddot{a}}, \rho_L, \rho_{L3}, \rho_{L4}, t$ und p) umgebungs- oder maschinenabhängige Größen bzw. bleiben in ihrer Betrachtung konstant oder nahezu konstant ($m_1, m_2, m_3, m_4, m_{Geh\ddot{a}}, m_{GeGew}, g, g_1, g_2, t_0, p_0, \kappa$, und α_V). Für die Störkräfte

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

innerhalb des Waagensystems, F_{StC} , F_{QC} , F_{StD} , F_{QD} , wird betragsmäßig die Größe von 0 N angenommen und eine mögliche tatsächliche Größe in Form der Messunsicherheit ausgedrückt. Dabei wird von einer Rechteckverteilung ausgegangen, deren Grenzen aufgrund des Eigengewichtes des Systems in Analogie zu den erwarteten Grenzwerten bei einer Laststufe von 10 kN abgeschätzt wurden. Eine direkte Kraftmessung dieser maschinenabhängigen Störgrößen ist nicht möglich, da sie nicht separiert werden können. Auf sie kann man nur indirekt über Kraftmessungen bei sehr kleinen Laststufen schließen, da sie über den Messbereich unveränderlich sind und bei den kleinen Laststufen relativ zu ihrer Laststufe großen Einfluss zeigen (4.2).

Zufälligen und unbekanntenen Störgrößen den Wert null zuzuordnen und deren vermutete Größe über die Messunsicherheit auszudrücken, ist eine Vorgabe des GUM. Sollte es möglich sein, ihnen einen betragsmäßigen Wert zuzuordnen, so sind sie entsprechend 3.4.2 als Korrektur zu berücksichtigen.

Im Gegensatz zu der bisher angewandten Methode mittels der Kalkulation des GUM-Work-Bench, bei der für die Grundgleichung der Kraft und für die Grundgleichung des Waagensystems (siehe 4.2) für jede Laststufe die Grenzwerte, eine relative Gesamtunsicherheit auf die Kraft von genau $W = 2 \cdot 10^{-5}$ bei $k=2$, abgeschätzt werden, wird im Weiteren überprüft, ob die erhaltenen Grenzwerte für die Störgrößen F_{St} und F_Q in praktischer Anwendung eingehalten werden können. Dabei wird auch hier für die Betrachtung der Realisierung der Kraft die Querkraft F_Q vorerst vernachlässigt, da die messtechnische Trennung nicht möglich ist und die Auswirkung von F_Q nach Kapitel 3.5 auf das realisierte Kraftergebnis in vertikaler Richtung vernachlässigbar ist. Entsprechend dem Grundgedanken der Datenermittlung nach REFA [48] lassen sich Fehler minimieren, indem Größen in möglichst viele Teilfaktoren geteilt und die Einzelfaktoren getrennt abgeschätzt werden. Durch die Addition der Varianzen der Einzelunsicherheiten reduziert sich die Gesamtunsicherheit. Dabei wurde bereits in Tabelle 20 entsprechend Kapitel 4.1.1 und Abbildung 12 die Störgröße F_{St} in die Teilkomponenten F_{St1} bis F_{St16} aufgeteilt. Die Abschätzung der Größe der Teilstörgrößen erfolgte durch Freimachung der Kräfte und durch möglichst lückenlose Separierung der Einzelkräfte oder Einzelmomente. Die Unsicherheitsbeiträge der Einzelbeiträge wurden entweder über Simulationen aus [36] und [38] oder mit Hilfe der Abschätzung von Momentengleichungen größenordnungsmäßig abgeschätzt (siehe auch Festlegung von F_Q in Kapitel 3.5). Herangezogen wurden dabei auch aufgrund von Erfahrungswerten der Vergleich von zu erwartenden Momente und Kräfte und deren Grenzen bei bekannten Lasten oder zu bekannten, messtechnisch ähnlichen Aufgabenstellungen. Erwähnenswert ist hier z.B. die Bestimmung von Reibkräften durch Bestimmung der Sensitivität von Waagebalken durch Aufbringung von Kleinstmassen oder durch Verwendung von Kraftmessgeräten (Federwaagen). Bei Einflüssen, die nur mittelbare Auswirkung auf die Kraft haben, wie z.B. der Flüssigkeitsmeniskus in den Dämpfungselementen, oder Einflüssen von Strömungskräften auf bewegte Teile, wurden die Ursachen der Kräfte auf Massen zurückgeführt; d.h. in Masseinheit ausgedrückt. Thermische Krafteinflüsse wurden über die Veränderung der Volumina berechnet oder simuliert, siehe [36]. Zum Teil wurden diese Veränderungen nicht nur in der Betrachtung der Messunsicherheit, sondern direkt als Korrekturen in der Berechnung der Kraft berücksichtigt. Solche Faktoren wären z.B. Masseschwerpunktsänderung, Kompressibilität oder thermische Ausdehnung.

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

Die Unsicherheitsbeiträge decken nicht nur eine zeitliche Veränderung innerhalb von Kalibrierzeiträumen ab, sondern sie berücksichtigen auch die Drift einzelner Komponenten innerhalb der Zeitdauer der Messungen. Als Drift zwischen den Kalibrierungen wird z.B. die Veränderung der Massen innerhalb eines Kalibrierintervalls (etwa 2 Jahre) gesehen, wobei sich die Größenordnung aus den Kalibrierscheinen ergibt. Als zeitliche Veränderung während einer Messserie (über mehrere Stunden) wird etwa nicht die Temperaturänderung in diesem Zeitraum und die damit verbundenen Auftriebskorrekturen verstanden, sondern betrifft z.B. g_1 und g_2 , die örtlich gemessene Erdschwere beim Gehänge und beim Gegengewicht, bedingt durch Schwerpunktsverlagerung und Gezeitenwechsel während der Messserie.

Prinzipiell werden alle kurzfristigen zeitlichen Änderungen für alle Komponenten der Kraftmessanlage im gleichen Ausmaß angenommen; so wird kein Unterschied zwischen Gehänge und Gegengewichtseite ermittelt. Es wird angenommen, dass sich die Werte beider Seiten nicht in einem relativ zu einander relevanten Ausmaß verändern. In Anbetracht der Größenordnung der Gesamtmessunsicherheit dieser Faktoren kann diese zeitliche Differenz vernachlässigt werden.

Ist vom Verwender bei der langfristigen Drift eine Systematik zu erkennen, so ist diese als Korrektur zu berücksichtigen (siehe Kapitel 3.4.2).

7.2.3 Kalkulation der Messunsicherheit mit GUM-Work-Bench

Die während der Messungen durch die Sensoren der Messanlagen aufgezeichneten Daten und Messwerte werden dokumentiert und im Anschluss wird im Routinefall daraus, gemeinsam mit einer Reihe von Korrekturen, das Messergebnis mittels einer der Excel-Standard-Auswertungen ermittelt. Zur Überprüfung und Validierung dieser Auswertefiles ist es notwendig, eine alternative Auswertung der Messergebnisse zu wählen und danach die erzielten Ergebnisse zu vergleichen. In den folgenden Beispielen werden die mit der Excel-Standard-Auswertung ermittelten Ergebnisse mit jenen Rechenergebnissen verglichen, die mit dem GUM-Work-Bench aufgrund der verwendeten Modellgleichung ermittelt worden sind. Als Ausgangsbasis für beide Auswertungen werden die aufgezeichneten Rohdaten derselben Messserie verwendet. Geringe Unterschiede in den Ergebnissen beruhen darauf, dass in der Excel-Auswertung für jede Einzelmessung, z.B. für Umgebungsparameter, Momentanwerte verwendet wurden, in der GUM-Work-Bench-Berechnung aber aufgrund fehlender Möglichkeiten Mittelwerte der Umgebungsparameter über mehrere Messungen. Darüber hinaus wurde in der GUM-Work-Bench-Berechnung die Zuordnung und Korrektur der Erdschwerewerte zu den Schwerpunkten der einzelnen Gewichtscheiben über die Anlagenhöhe vereinfacht. Grundlegend wurde hier aber die Einhaltung jener Grenzwerte der erweiterten Messunsicherheitswerte überprüft, die in Kapitel 4.1.1 festgelegt worden sind.

Dementsprechend werden erneut wie in der Konzeptionierung beispielhaft die Laststufen der 250 kN-Kraftanlage bei 200 kN, 20 kN und 2 kN und der 2 kN-Kraftanlage bei 2 kN, 200 N und 20 N analysiert und in ihrer Berechnung offengelegt.

Im folgenden gezeigten Beispiel an der primären 250 kN-Kraftnormalanlage sind jene angenommenen Unsicherheitsbeiträge oder Grenzwerte als Ausgangswerte für die Ermittlung der Standardmessunsicherheiten sowie die Unsicherheitsbeiträge gelb markiert, die an der Gesamtunsicherheit mehr als 95 % Anteil haben.

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

Darstellung des Messunsicherheits-Budget:

Größe	Wert	Verteilung	u / Grenzen	Standardmessunsicherheit	Freiheitsgrad	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
m	20393,5448 kg	No		0,0108 kg			
m ₀	20393,5448 kg	No	0,0106 kg	0,0106 kg	50	9,8	0,1000 N
m ₁	0,0	Re	±0,00000005	28,9·10 ⁻⁹ kg	∞	200·10 ³	0,0058·N
m ₂	0,0	Re	±0,00000005	28,9·10 ⁻⁹ kg	∞	200·10 ³	0,0058 N
m ₃	0,0	Re	±0,00000006	28,9·10 ⁻⁹ kg	∞	200·10 ³	0,0058 N
m ₄	0,0	Re	±0,00000015	86,6·10 ⁻⁹ kg	∞	200·10 ³	0,0170 N
W _A	2,98329 kg			6,17·10 ⁻³ kg			
V _G	2,58159 m ³			5,00·10 ⁻³ m ³			
V ₀	2,58146 m ³	No	0,005 m ³	5,00·10 ⁻³ m ³	50	-11	-0,0570 N
ρ _L	1,155600 kg/m ³	Re	±0,00145 kg/m ³	837·10 ⁻⁶ kg/m ³	∞	-25	-0,0210 N
g	9,80841262 m/s ²	Re	± 0,00001 m/s ²	5,77·10 ⁻⁶ m/s ²	∞	20000	0,1200 N
F _{AA}	0,0 N			0,0422 N			
m _{Gehä}	1117,95100 kg	No	0,0055 kg	2,75·10 ⁻³ kg	50	9,8	0,0270 N
V _{Gehä}	0,14115 m ³	No	0,001 m ³	1,00·10 ⁻³ m ³	50	-11	-0,0110 N
ρ _{L3}	1,155600 kg/m ³	Re	±0,0014 kg/m ³	808·10 ⁻⁶ kg/m ³	∞	-1,4	-0,0110·N
g ₁	9,808412620 m/s ²	Re	±0,000001 m/s ²	577·10 ⁻⁹ m/s ²	∞	1100	0,0007·N
F _{StC}	0,0 N	Re	±0,01 N	5,77·10 ⁻³ N	∞	1,0	0,0050 N
F _{QC}	0,0 N	Re	±0,05 N	0,0289 N	∞	0,0	0,0001 N
m _{GeGew}	1117,95100 kg	No	0,0055 kg	2,75·10 ⁻³ kg	50	-9,8	-0,0270 N
V _{GeGewä}	0,14115 m ³	No	0,001 m ³	1,00·10 ⁻³ m ³	50	11	0,0011 N
ρ _{L4}	1,155600 kg/m ³	Re	±0,0014 kg/m ³	808·10 ⁻⁶ kg/m ³	∞	1,4	0,0011 N
g ₂	9,808412620 m/s ²	Re	±0,000001 m/s ²	577·10 ⁻⁹ m/s ²	∞	-1100	-0,0007 N
F _{StD}	0,0 N	Re	±0,01 N	5,77·10 ⁻³ N	∞	-1,0	-0,0058 N
F _{QD}	0,0 N	Re	±0,01 N	5,77·10 ⁻³ N	∞	0,0	0,0 N
κ	1000·10 ⁻¹⁵ 1/Pa	Re	±2·10 ⁻¹³ 1/Pa	115·10 ⁻¹⁵ 1/Pa	∞	-92000	-0,0 N
p	98185,1 Pa	No	10 Pa	10,0 Pa	50	0,0	0,0 N
p ₀	101,325·10 ³ Pa						
α _V	50,00·10 ⁻⁶ 1/°C	Re	±2·10 ⁻⁶ 1/°C	1,15·10 ⁻⁶ 1/°C	∞	-29	-0,00003 N
t	21,0000 °C	No	0,05 °C	0,0500 °C	50	-1,5·10 ⁻³	-0,00007 N
t ₀	20,0 °C						
F _{St}	0,0 N			0,0938 N			
F _{St1}	0,0 N	Re	±0,05 N	0,0289 N	∞	1,0	0,0290 N
F _{St2}	0,0 N	Re	±0,05 N	0,0289 N	∞	1,0	0,0290 N
F _{St3}	0,0 N	Re	±0,01 N	5,77·10 ⁻³ N	∞	1,0	0,0058 N
F _{St4}	0,0 N	Re	±0,001 N	577·10 ⁻⁶ N	∞	1,0	0,0006 N
F _{St5}	0,0 N	Re	±0,05 N	0,0289 N	∞	1,0	0,0290 N
F _{St6}	0,0 N	Re	±0,03 N	0,0173 N	∞	1,0	0,0170 N
F _{St7}	0,0 N	Re	±0,0001 N	57,7·10 ⁻⁶ N	∞	1,0	0,0058·N
F _{St8}	0,0 N	Re	±0,05 N	0,0289 N	∞	1,0	0,029 N
F _{St9}	0,0 N	Re	±0,05 N	0,0289 N	∞	1,0	0,029 N
F _{St10}	0,0 N	Re	±0,03 N	0,0173 N	∞	1,0	0,017 N
F _{St11}	0,0 N	Re	±0,03 N	0,0173 N	∞	1,0	0,017 N
F _{St12}	0,0 N	Re	±0,1 N	0,0577 N	∞	1,0	0,058 N
F _{St13}	0,0 N	Re	±0,03 N	0,0173 N	∞	1,0	0,017 N
F _{St14}	0,0 N	Re	±0,001 N	577·10 ⁻⁶ N	∞	1,0	0,0006 N
F _{St15}	0,0 N	Re	±0,01 N	5,77·10 ⁻³ N	∞	1,0	0,0058 N
F _{St16}	0,0 N	Re	±0,01 N	5,77·10 ⁻³ N	∞	1,0	0,0058 N
F _Q	0,0 N	Re	±5 N	4,10 N		0,0	0,0 N
Z	0,0 N	Re	±0,002 N	1,15·10 ⁻³ N	∞	1,0	0,0013 N
F	199,99904·10 ³ N			0,192 N	600		
Ergebnis: Berechneter Wert für die realisierte Kraft:	F= 199,99904·kN						
	relative erweiterte Messunsicherheit (W)		±1,9·10 ⁻⁶			Erweiterungsfaktor: 2,0; Überdeckung: 95,45%	
	erweiterte Messunsicherheit (U)		±0,38 N				
Ergebnis nach Excel-Standardprogramm	F= 199,99899 kN						
	relative erweiterte Messunsicherheit (W)		±1,68·10 ⁻⁶			Erweiterungsfaktor: 2,0; Überdeckung: 95,45%	

Tabelle 21: Ergebnis realisierte Kraft 200 kN in der 250 kN-Totlastanlage

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

Die in der Tabelle 21 verwendeten Symbole für die Verteilung bedeuten, dass bei einigen Größen als Verteilung der Messergebnisse eine Normalverteilung (No) angenommen worden ist und bei jenen Faktoren, deren Größe abgeschätzt worden ist, eine Rechteckverteilung (Re) in den angegebenen Grenzen vorliegt. Wird keine Verteilung angegeben, liegt ein Rechenergebnis oder ein Bezugswert vor. Das dargestellte Ergebnis spiegelt ausschließlich die Messung vom 15.05.2013 des 200kN-Kraftnormals Z4-M01364 in Druckrichtung bei der 200kN Laststufe wider.

Analog dem Beispiel der 200 kN-Laststufe aus Tabelle 21 sind die Ergebnisse für alle benötigten und realisierten Laststufen inklusive der dazugehörigen Messunsicherheiten über den Messbereich bis 250 kN zu bestimmen und zu berechnen. Zusammengefasst sind die erzielten erweiterten Messunsicherheiten für beide Kraftnormalanlagen über die Laststufen von 20 N bis 250 kN:

Anlage	Laststufe	realisierte Last	relative erweiterte Messunsicherheit	erweiterte Messunsicherheit
	[kN]	Berechnung mit GUM-Work-Bench [kN]	Berechnung mit GUM-Work-Bench	Berechnung mit GUM-Work-Bench [N]
250 kN	250	249,9986	$0,19 \cdot 10^{-5}$	0,48
250 kN	200	199,9990	$0,19 \cdot 10^{-5}$	0,38
250 kN	140	139,9994	$0,18 \cdot 10^{-5}$	0,25
250 kN	100	99,99983	$0,23 \cdot 10^{-5}$	0,23
250 kN	60	59,99956	$0,24 \cdot 10^{-5}$	0,14
250 kN	20	19,99982	$0,51 \cdot 10^{-5}$	0,10
250 kN	10	9,999950	$0,95 \cdot 10^{-5}$	0,095
250 kN	4	4,000010	$1,20 \cdot 10^{-5}$	0,049
250 kN	2	2,000009	$1,80 \cdot 10^{-5}$	0,035
250 kN	1	1,000011	$2,20 \cdot 10^{-5}$	0,022
250 kN	0,5	0,4999998	$2,40 \cdot 10^{-5}$	0,012
250 kN	0,2	0,2000001	$3,90 \cdot 10^{-5}$	0,0079

Tabelle 22: Realisierte Last mit relativer erweiterter Unsicherheit und erweiterter Unsicherheit an der 250 kN-Normalkraftnormalanlage

Anlage	Laststufe und Richtung	realisierte Last	relative erweiterte Messunsicherheit	erweiterte Messunsicherheit
	[N]	Berechnung mit GUM-Work-Bench [N]	Berechnung mit GUM-Work-Bench	Berechnung mit GUM-Work-Bench [N]
2 kN	Druck, 2000	2000,00950	$0,34 \cdot 10^{-5}$	0,0068
2 kN	Druck, 1000	1000,00480	$0,34 \cdot 10^{-5}$	0,0034
2 kN	Druck, 200	200,00170	$1,10 \cdot 10^{-5}$	0,0022
2 kN	Druck, 40	40,00033	$1,30 \cdot 10^{-5}$	0,00053
2 kN	Druck, 20	20,00008	$2,20 \cdot 10^{-5}$	0,00045
2 kN	Zug, 2000	2000,00730	$0,35 \cdot 10^{-5}$	0,0069
2 kN	Zug, 200	200,00160	$1,30 \cdot 10^{-5}$	0,0026
2 kN	Zug, 20	20,00008	$2,80 \cdot 10^{-5}$	0,0006

Tabelle 23: realisierte Last mit relativer, erweiterter Unsicherheit und erweiterter Unsicherheit an der 2 kN-Normalkraftanlage

Um Kraftmessgeräte der Genauigkeitsklasse 00 zu kalibrieren, wurde als ein Grenzwert für die angestrebte Genauigkeit und die Ausführung bzw. für die zu erreichende relative Unsicherheit über den gesamten Messbereich bis 250 kN von höchstens $2 \cdot 10^{-5}$ festgelegt.

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

Betrachtet man bei drei exemplarisch dargestellten Laststufen (Abbildung 73 und Abbildung 74) unter dem Aspekt der Verteilung die relativen Unsicherheitsanteile, so sind die unterschiedlichen Auswirkungen der Haupteinflusskomponenten bei höheren Lasten zu denen bei den niederen Lasten erkennbar. Während im oberen Messbereich der Haupteinfluss auf die Methode, sprich den Einfluss der Masse und der Erdbeschleunigung, zurückzuführen ist, dominiert im unteren Messbereich die Abhängigkeit vom Verfahren. Dazu gehören vorrangig die Einflüsse der Umgebungsbedingungen (Luftdichte ρ_x), der Störgrößen F_{St} und der Einfluss des Bedieners (Z). Somit kann veranschaulicht werden, wie bereits in Kapitel 4.2 vermutet, dass die messtechnischen Grenzen einer Totlastkraftanlage aus konstruktiven Gründen im unteren Messbereich dieser Anlage liegen. Jeder notwendige Bauteil weist aufgrund seiner konstruktiven Aufgabe und Ausführung einen nicht zu unterschreitenden Einfluss an der Gesamtunsicherheit auf. Daher sind die meisten Totlastkraftanlagen in diesem Unsicherheitsbereich in ihrem Messbereich äußerst beschränkt und enden im unteren Bereich bei etwa 2 bis 5 % der Nennlast.

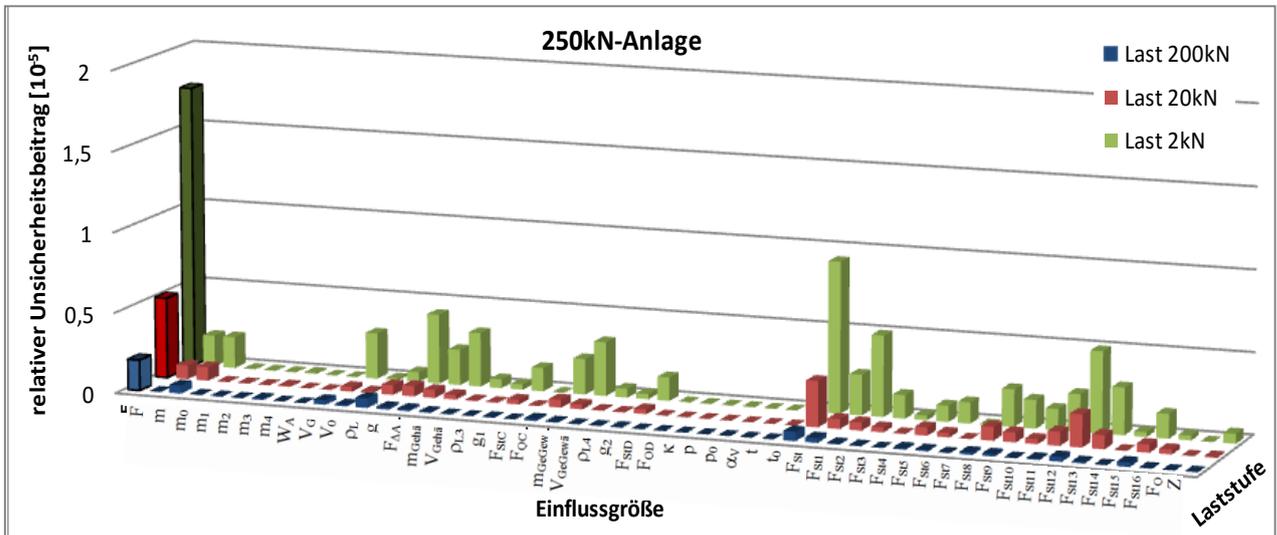


Abbildung 73: Relative Unsicherheit und deren Anteile für je drei Laststufen bis 250 kN

Analog wird mit gleicher Modellgleichung mit den Laststufen unter 2 kN verfahren wobei ein kritischer Wert der relativen Unsicherheit bei etwa 20 N erreicht wird (Abbildung 74).

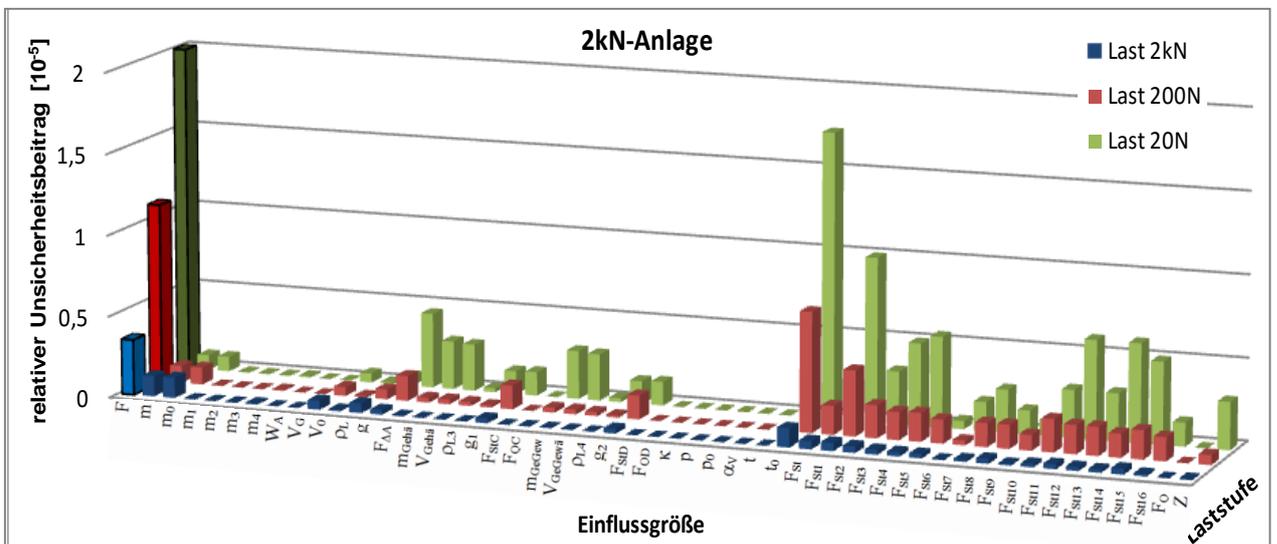


Abbildung 74: Relative Unsicherheit und deren Anteile für je drei Laststufen bis 2 kN

7.2.4 Trend bei den Einflussgrößen der Unsicherheitsbeiträge

Wie in der Auslegung der Kraftanlage in Kapitel 4.2 simuliert, verschiebt sich naturgemäß abhängig von der Last der Einfluss der Unsicherheitsbeiträge. Während bei höheren Lasten der Hauptanteil des Unsicherheitsbeitrages aus den Unsicherheiten der Massen und der Erdschwere stammt, sind bei den kleinen Lasten hauptsächlich die Einflüsse der mechanischen Gehänge- und Gegengewichtskomponenten sowie die Einflüsse der Störgrößen dominant. Greift man auf die Höhe der blauen Balken aus der Summe der Störkräfte F_{St} in Abbildung 15 des Kapitels 4.2 zurück, so liegt der maximal erlaubte Anteil an der relativen Gesamtunsicherheit bei etwa 50%. Vergleicht man dagegen die Höhe der F_{St} -Balken in Abbildung 75 der gleichen Laststufen, so erkennt man, dass das Verhältnis zur erreichten Gesamtunsicherheit zumindest bei den höheren Laststufen wesentlich geringer ist. Der Umstand, dass der Grenzbereich der erzielbaren Genauigkeit im unteren Belastungsbereich liegt, ist auch daran erkennbar, dass die erreichten Gesamtunsicherheiten und die angenommenen maximal erlaubten Gesamtunsicherheiten aus Abbildung 15 sich nur im unteren Messbereich decken. Während bei 200 kN nur ein Zehntel des Unsicherheitsbudgets von 4 N ausgeschöpft worden ist, ist die prognostizierte Unsicherheit bei 2 kN mit der erreichten bei etwa 0,04 N ident.

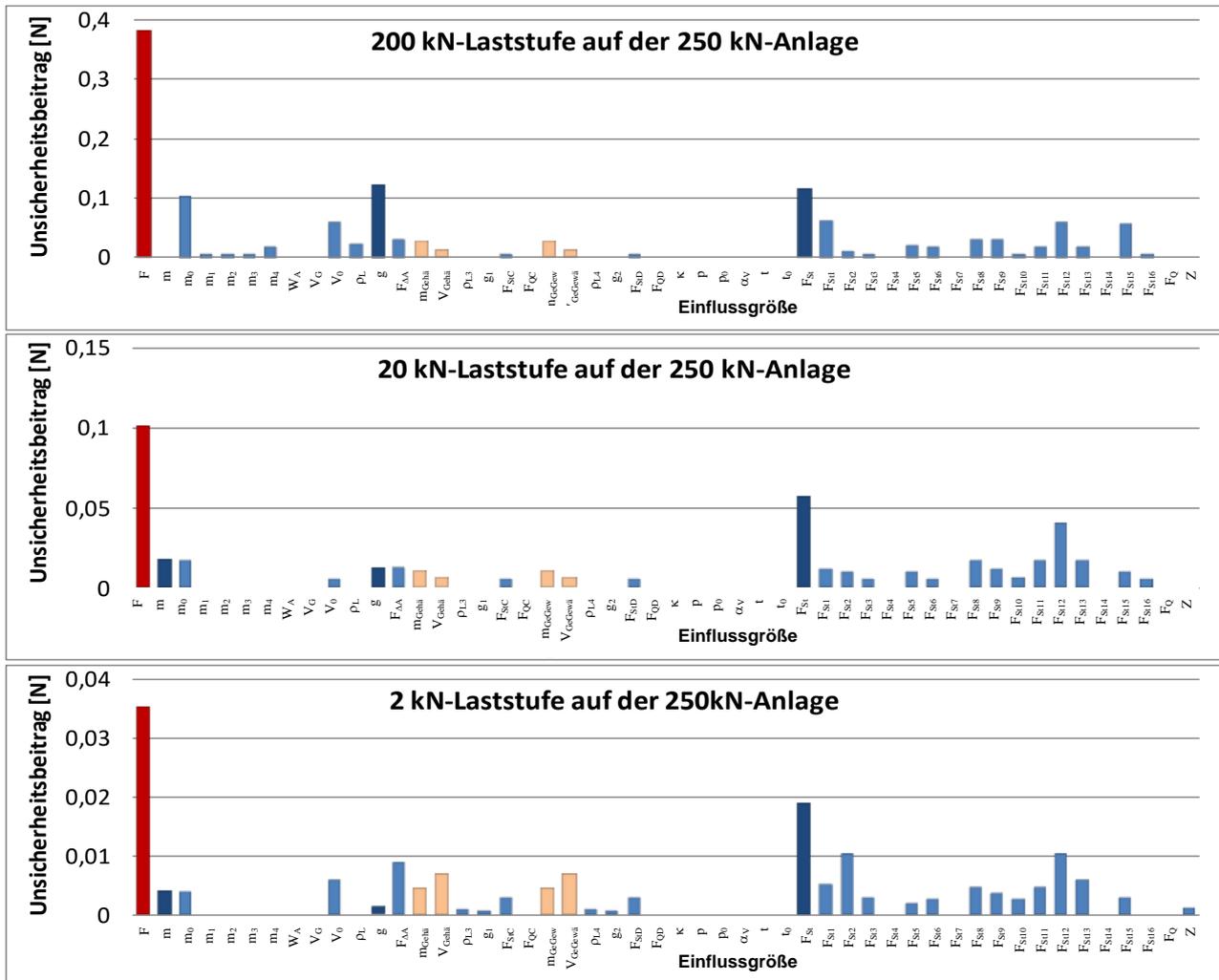


Abbildung 75: Verteilung Unsicherheitsanteile je Laststufe bis 250 kN

Der Grund dafür ist, dass bei den Störgrößen ein bedeutend kleinerer Wert der absoluten Unsicherheit erreicht werden konnte. Die Unsicherheitsanteile der Masse und der Erdschwere sind dagegen gleich den Annahmen aus Tabelle 5. Vergleicht man bei 2 kN

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

die Tabelle 6 und Abbildung 16 aus Kapitel 4.3 mit Abbildung 76, liegt ein identes Ergebnis vor. Betrachtet man die absolute Verteilung der einzelnen Faktoren, so lassen sich die sensiblen Bereiche erkennen, deren Anteil entscheidend zur Gesamtmessunsicherheit beiträgt. Sowohl in Abbildung 75 als auch in Abbildung 76 zeigt sich die Abhängigkeit bei der Laststufe 200 kN und 2 kN ausgehend von der Masse m , dem Volumen V_G , der Massescheiben und der Erdschwere g (dunkelblaue Säulen).

Die einzelnen Anteile der Störgrößen sind verhältnismäßig gering. Betrachtet man den Trend der Anteile im Verhältnis zur Gesamtunsicherheit (rote Säule), so zeigt sich, dass bei abnehmenden Laststufen vor allem die Anteile der Komponenten im Verhältnis zu den anderen drastisch steigen, deren Größe von den Umgebungsbedingungen abhängig sind. Das betrifft in erster Linie entstehende Einflüsse und Reaktionen in den Kräfteverhältnissen bzw. deren Empfindlichkeit auf die Änderung des Luftauftriebes durch Änderungen der Umgebungsbedingungen. Durch Schwankungen des Luftdrucks, Änderung der Lufttemperatur oder der Anlagentemperatur und der dadurch bedingten Volumen- und Dichteanpassungen aller bewegter Teile, die als gewichtstragende Teile $V_{Gehä1}$ oder als Gegengewichte V_{GeGew1} zur Kompensation dienen (orange Säulen), resultieren die Zustandsänderungen mit dem Luftauftrieb.

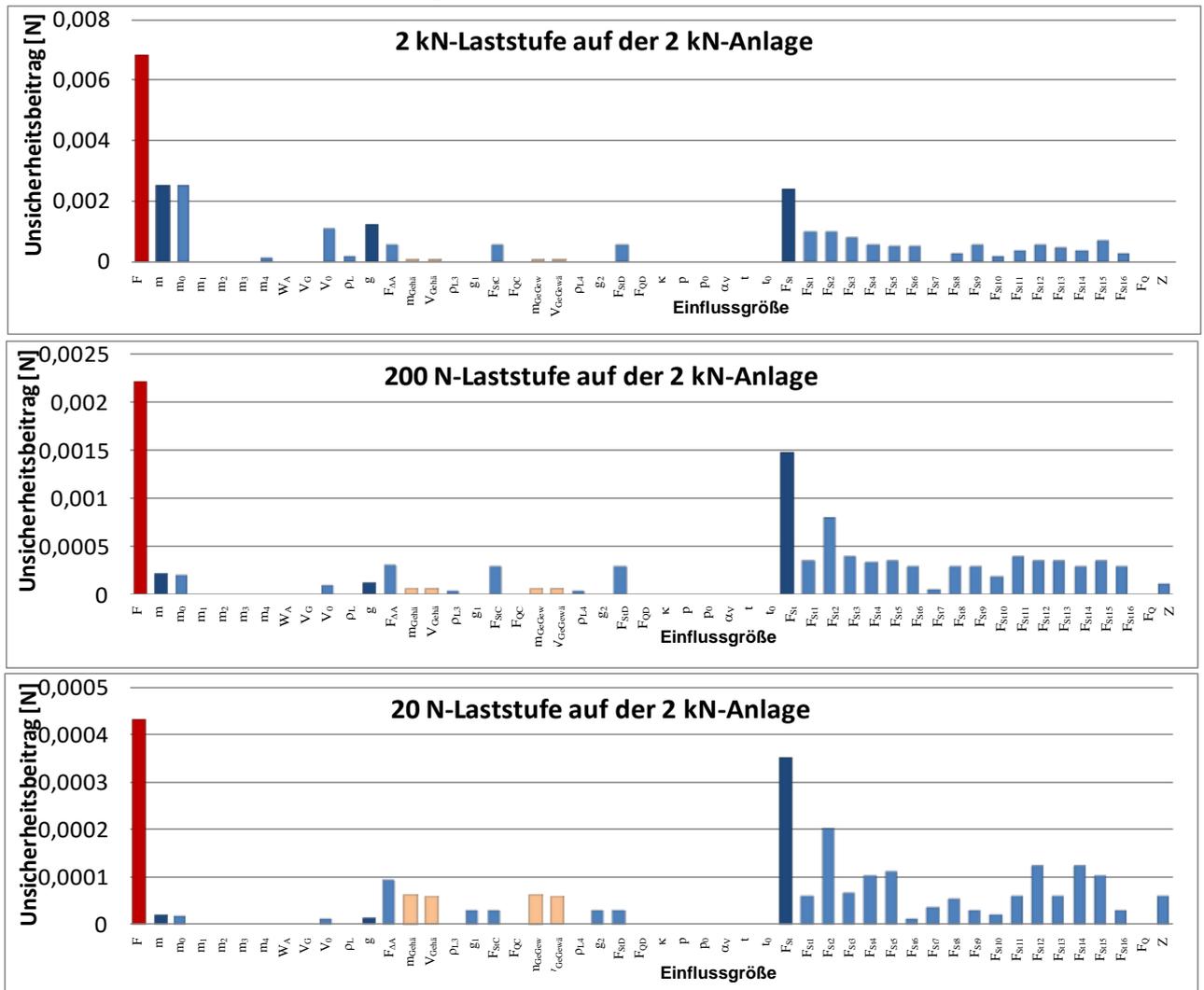


Abbildung 76: Verteilung Unsicherheitsanteile je Laststufe bis 2 kN

Die Reaktion auf den Luftauftrieb wirkt sich vor allem bei großen Volumina entscheidend aus. So ist bei der 250 kN-Kraftanlage durch die Größe des Wägewertes und dem

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

Volumen des gesamten Gewichthalteapparates der Einfluss hier besonders hoch, da die Ausgleichskräfte größer sind. Analysiert man die anteilmäßige Verteilung der Störgrößen F_{St1} bis F_{St16} selbst, so entsteht der Haupteinfluss bei den hohen Lasten vor allem durch die Verformung von krafttragenden Anlagenteilen und bei großen, zum Eingriff kommenden Anlagenteilen aufgrund der Größe der Angriffsflächen durch die Auswirkung von Konvektionsströmungen. Bei den kleineren Kraftstufen, vor allem unter 2 kN, steigt besonders der Anteil des Einflusses von störenden Reibkräften in den Lagerungen der bewegten Anlagenteile und in der Schwingungsdämpfung.

Ein Vorteil, der sich durch die Verwendung des GUM-Work-Bench ergibt, ist die Möglichkeit, rasch die Auswirkung einzelner Einflüsse auf das Gesamtergebnis empirisch zu ermitteln. Dazu variiert man den betragsmäßigen Anteil von Beiträgen, erhält sofort die Verteilung der relativen Unsicherheitsanteile (siehe gelbe Markierungen in Tabelle 21) und ist damit ohne weiteren Rechenaufwand in der Lage, akzeptierbare Grenzbereiche für einzelne Einflussgrößen festzulegen. Ebenso lassen sich dadurch jene Faktoren separieren, die für die Größe der Gesamtmessunsicherheit maßgeblich verantwortlich sind.

7.2.5 Analyse erzielter Unsicherheitsbeiträge

Totlastanlagen herkömmlicher Bauart, die in Unsicherheitsbereichen von $2 \cdot 10^{-5}$ arbeiten, weisen einen Messbereich bis etwa 10% der höchsten Laststufe auf. Auch Sonderkonstruktionen, in denen mehrere (bis zu drei) Messbereiche in einer Maschine vereint werden, sind in ihrem unteren Grenzbereich sehr limitiert. Der kleinste Lastwert ist in der Regel der Wert, der dem Eigengewicht des Gehänges entspricht. Auch wenn durch konstruktive Maßnahmen diese Grenze des Messbereichs minimiert wird, ist es kaum möglich unter 5% der Höchstlast zu kommen. Eine derartige Maßnahme wäre z.B. die Teilung des Gehänges in zwei Teile, wobei die Massen dieser Teile die ersten beiden Laststufen abdecken. Bei der im BEV realisierten 250 kN-Totlastanlage und der 2 kN-Totlastanlage liegen hingegen diese Minimalwerte in der Größenordnung von etwa 0,5% des maximalen Lastwertes. Analysiert man in Tabelle 22 und in Tabelle 23 die Ergebniswerte, so zeigt sich, dass bei beiden Kraftnormalanlagen mit höchster Genauigkeit unterhalb des 1%-Punktes noch gemessen werden kann. Darunter ist die Darstellung bis zum Endwert möglich, allerdings steigt die erzielte Messunsicherheit kontinuierlich auf einen Wert von etwa $4 \cdot 10^{-5}$ bis $5 \cdot 10^{-5}$. Dieser Wert bringt für Standardkalibrierungen noch immer ein hervorragendes Ergebnis.

Im Zuge der Validierung des Messverfahrens wurde eine Vielzahl von Messserien bei denselben Laststufen wiederholt durchgeführt, die Ergebnisse ausgewertet und die Messunsicherheitsberechnung der einzelnen Laststufen verglichen und analysiert. Es hat sich gezeigt, dass es vor allem durch Schwankungen des Luftdruckes und den damit verbundenen Ausgleich des Gehänge-Gegengewichtsystems (vergleiche Kapitel 4.2 vor allem bei Laststufen kleiner 5 kN) zu Schwankungen im Ergebnis der Unsicherheitsberechnung von $\pm 1 \cdot 10^{-5}$ kommt. Bei größeren Laststufen konnte dieser Effekt nicht nachgewiesen werden, da er von den standardmäßigen Streuungen der Ergebnisse in diesem Messbereich überlagert wurde und dadurch nicht separiert werden konnte. Es zeigt sich über den gesamten Bereich, dass sich das Verhältnis der Einflussgrößen aus den darstellenden Größen (Masse, Dichte und Fallbeschleunigung) zu den Einflussgrößen der Mechanik (Störgrößen) mit fallender Last zu Ungunsten der

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

mechanischen Einflüsse verschiebt. Somit zeigt sich auch hier, dass die Einflüsse der Mechanik aufgrund des relativen Zuwachses die Möglichkeiten von Totlastanlagen im unteren Bereich limitieren.

Um eine generelle, messbereichsübergreifende Aussage über die Leistungsfähigkeit der gesamten Anlage in Bezug auf Einhaltung der Messunsicherheitsgrenzen tätigen zu können, wäre es eigentlich notwendig, eine Messunsicherheitskalkulation in jeder realisierbaren Laststufe vorzunehmen. Daher sind zur umfangreichen Beurteilung des Messunsicherheitsbudgets die erläuterten Beispiele in drei Laststufen als nicht ausreichend zu bewerten. Das mechanische Verhalten solcher Anlagen ist zwar theoretisch über den Messbereich / Lastbereich eher als linear einzustufen, aber betrachtet man die gebrachten Beispiele sowohl bei der 250 kN-Totlastanlage als auch bei der 2 kN-Totlastanlage, gewinnt man den Eindruck, dass in den Randbereichen des Messbereiches die Zunahme der Störgrößen relativ zur Last gesehen nicht mehr linear erfolgt. Verursacht wird dieser Effekt durch größer werdende Einflüsse wie z.B. Reibung, Strömungskräfte oder thermische Entladungen. Um ein Maß für eine realistische Messunsicherheitsangabe zu erhalten, war es daher notwendig, gerade in den Grenzbereichen (hier im Speziellen im unteren Messbereich) zusätzliche Laststufen zu betrachten.

Dazu zeigen, anhand von über den gesamten Messbereich durchgeführten Messserien mit TransfERNormalen des BEV und anschließender Auswertung der Messergebnisse, die Tabelle 22 und die Tabelle 23 die Zusammenfassung aller Laststufen mit den durchgeführten Messunsicherheitsberechnungen. Aufgeteilt auf die 250 kN-Totlastanlage und die 2 kN-Totlastanlage werden zu den Nominalwerten der Laststufen die tatsächlich realisierten Kräfte und deren Unsicherheit angegeben. Bei der 2 kN-Totlastanlage wurden, aufgrund der neuen Methode der Realisierung der Kraft, Zug- und Druckrichtung getrennt betrachtet. Bei der 250 kN-Totlastanlage ist eine derartige Aufteilung nicht notwendig, da die Art der Einspannung der Kraftnormale auf die Art der Realisierungsmethode hier keinen Einfluss hat.

7.3 Unsicherheitsbetrachtung der Vergleichsmessung

Die Grundlage der Validierung ist die Analyse der Einflussgrößen und somit der Messunsicherheitsbetrachtung aus Kapitel 7.2. Nachdem diese Grundlagen als tauglich beurteilt worden sind, müssen als geeignetes Mittel zur Überprüfung der Eignung Vergleichsmessungen (unterschiedlich ausgeführte Messserien, bei denen das Ergebnis direkt gegenüber gestellt wird) durchgeführt werden. Zur einfacheren Handhabung empfiehlt es sich natürlich, als Bezug für diese Vergleichsmessungen Messaufbauten zu verwenden, deren Eignung bereits nachgewiesen worden ist und deren Richtigkeit als erwiesen betrachtet wird.

Für die Vorgehensweise und die notwendige Unsicherheitsbetrachtung bei vergleichenden Messungen zwischen zwei Kraftnormalanlagen nach der Kalibrier-Richtlinie cg-4 der EURAMET [5] sind fünf aufgelistete und erläuterte Schritte einzuhalten. Da die zu vergleichenden Kraftnormalmaschinen auf derselben hierarchischen Stufe der Bezugsnormale stehen (beide sind nationale Normale der Kraft eines NMI), wurden diese fünf Schritte für Vergleichsmessungen nach [5] adaptiert und den Gegebenheiten angepasst (siehe auch Kapitel 7.2).

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

Schritt 1: Bestimmung der Unsicherheit der realisierten Kraft bei der Bezugskraftnormalmaschine

Dazu ist eine Berechnung der erweiterten relativen Messunsicherheiten der realisierten Kraft nach Kapitel 4.2 bei der Bezugskraftnormalmaschine W_{BM} vorzunehmen.

Schritt 2: Bestimmung der Unsicherheit des TransfERNORMALS bei der Messung in der Bezugskraftnormalmaschine

Der Wert, der bei der Kalibrierung eines Kraftaufnehmers als Transferstandard für die ausgewählten Laststufen bestimmt wird, ist der Kalibrierkoeffizient K_{ts} . Dieser ist das Verhältnis aus aufgebrachtener Kraft F_{BM} und der Anzeige X des Transferstandards. Zur Elimination des Unterschiedes der Einbaustellungen ersetzt man die Anzeige X durch den Mittelwert aller erhaltenen Werte \bar{X}_i derselben Laststufe in den verschiedenen Einbaustellungen n . Daher ist

$$K_{ts} = \frac{F_{BM}}{X} \quad \text{wobei} \quad X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{X}_i$$

und die relative Unsicherheit (Varianz) des Mittelwertes der Anzeige ist somit

$$w^2(X) = \frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - X}{X} \right)^2$$

Die kombinierte Standardunsicherheit der vom Transferstandard angezeigten Kraftwerte $w(K_{ts})$ und die erweiterte relative Unsicherheit W_{ts} können nach folgender Gleichung ermittelt werden:

$$w(K_{ts}) = \sqrt{w^2(X) + w^2(F_{BM})}$$

Mit dem Erweiterungsfaktor k ist die erweiterte relative Unsicherheit:

$$W_{ts} = k \cdot w(K_{ts})$$

Schritt 3: Bestimmung der Unsicherheit des Referenzwertes des TransfERNORMALS

und

Schritt 4: Bestimmung der Kalibrierunsicherheit des TransfERNORMALS bei der Vergleichskraftnormalmaschine

Da der Transferstandard über einen längeren Zeitraum verwendet wird, ist eine Drift D in die Betrachtung der relativen Unsicherheit einzubeziehen. Als Drift kann hier die Veränderung zwischen der Referenzmessung am TransfERNORMAL vor dem Vergleich und der Referenzmessung nach dem Vergleich gesehen werden. Daher ist zu berücksichtigen

$$w^2(D) = \frac{a_{drift}^2}{3},$$

wobei dieser Wert eine Rechteckverteilung mit der Halbbreite der Grenzen a_{drift} der relativen Abweichung der Sensitivität ist. Wenn nachgewiesen werden kann, dass die Drift direkt zeitabhängig ist, kann man statt der Rechteckverteilung eine Dreieckverteilung annehmen, wobei

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

$$w^2(D) = \frac{a_{drift}^2}{6}$$

gilt. Dieser Austausch ist aber nur zulässig, wenn sich die gesamten Vergleichsmessungen nur über einen kurzen Zeitraum (etwa 1 Monat) erstrecken und zu Beginn und Ende der Vergleichsmessung die Messungen mit der Bezugskraftmaschine durchgeführt werden.

Die erweiterte relative Unsicherheit des Referenzwertes ist somit:

$$W_{rv} = k \cdot \sqrt{w^2(K_{ts}) + w^2(D)}$$

Schritt 5: Vergleich mit der Unsicherheitsbestimmung der realisierten Kraft bei der Vergleichskraftnormalmaschine

Die Messunsicherheit wird bei jeder Laststufe sowohl bei der Referenzanlage als auch bei der Vergleichsanlage bestimmt. Dabei werden zuerst für jede der Kraftnormalanlagen separat die erzielbaren Messunsicherheiten bei der Realisierung der Kraft berechnet. Als zweiter Schritt werden in jeder Anlage mittels Messungen nach vorgegebenem und möglichst identem Ablauf die Unsicherheit der Transfornormale (nach Kapitel 3.6.5) unter den Realisierungsbedingungen der Kraftnormalanlagen empirisch ermittelt. Die Ergebnisse der Unsicherheitsbetrachtung aus der Kraftdarstellung dienen dabei als Ausgangsbasis. Aus den Quadratwurzeln der quadratischen Summen aller Einzelmessunsicherheiten (berechneten Unsicherheiten der Laststufen eines Kraftaufnehmers bei der Kalibrierung) und einem Beitrag für die Drift des Transfornormales zwischen den Vergleichsmessungen berechnet sich die Gesamtunsicherheit:

$$u(\Delta F_{stat}) = \sqrt{u^2(\bar{F}_{BNME}) + u^2(\bar{F}_{NME}) + u^2(\delta F_{Drift})},$$

wobei $u(\Delta F_{stat})$ die Unsicherheit der Abweichung der Kraftmittelwerte bei statischer Belastung darstellt, $u(\bar{F}_{BNME})$ die Unsicherheit der Mittelwerte der Kraftanzeige des Transfornormals in der Bezugsmesseinrichtung, $u(\bar{F}_{NME})$ die Unsicherheit der Mittelwerte der Kraftanzeige des Transfornormals in der Vergleichsmesseinrichtung ist und $u(\delta F_{Drift})$ die Unsicherheit der Langzeitdrift durch diverse Einflüsse des Transfornormals ist. Analog dazu ist relativ ausgedrückt

$$w(\Delta F_{stat}) = \sqrt{w^2(\bar{F}_{BNME}) + w^2(\bar{F}_{NME}) + w^2(\delta F_{Drift})}$$

und als erweiterte Unsicherheit $U(\Delta F_{stat})$ bzw. als erweiterte relative Unsicherheit $W(\Delta F_{stat})$

$$U(\Delta F_{stat}) = u(\Delta F_{stat}) \cdot k \quad \text{bzw.} \quad W(\Delta F_{stat}) = w(\Delta F_{stat}) \cdot k$$

mit k als Erweiterungsfaktor.

Verglichen und beurteilt werden die relativen Abweichungen der Mittelwerte ΔX zwischen den jeweiligen Laststufen der Bezugskraftnormalmaschine und der Vergleichskraftnormalmaschine sowie der Überlappungsfaktor (E_n -Faktor),

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

$$\Delta X = \frac{X_{VM}}{X_{BM}} - 1.$$

Mit dem Mittelwert X aller erhaltenen Werte X_i derselben Laststufe in den verschiedenen Einbaustellungen, sowohl bei der Vergleichskraftnormalmaschine ($_{VM}$) als auch bei der Bezugskraftnormalmaschine ($_{BM}$).

Somit ist E_n , das Verhältnis der relativen Abweichung zwischen den zu vergleichenden primären Kraftnormalanlagen und der relativen erweiterten Gesamtunsicherheit der Messungen bei $k=2$:

$$E_n = \frac{\Delta X}{U(\Delta F_{stat})}$$

Ist dieser E_n -Faktor < 1 bedeutet dies, dass eine Überschneidung der Messunsicherheitsbereiche der einzelnen Messwerte vorliegt und dass die Messunsicherheitsbereiche der verglichenen Messergebnisse eine Überlappung zeigen. Das heißt, die Messergebnisse sind somit vergleichbar und passen.

7.4 Validierung der Verwendbarkeit

Grundsätzlich ist von jedem Entwickler eines neuen Messverfahrens oder einer Messvorrichtung die Eignung des Verfahrens so weit zu untersuchen bzw. offen zu legen und nachzuweisen, dass aufgrund der erzielten Messergebnisse Zertifikate ausgestellt werden können. Generell ist dazu aber zu bemerken, dass heute Totlastkraftanlagen von nationalen Metrologieinstituten eine Unsicherheit im Messergebnis von besser $2 \cdot 10^{-5}$ erreichen können. Die Praxis zeigt aber, dass bei einem Vergleich dieser Totlastkraftanlagen die Messergebnisse der verwendeten Transfernormale signifikant voneinander abweichen können und die erzielten Messunsicherheiten wesentlich größer sind. Veranschaulicht wurde dieser Umstand bereits in den Vergleichsmessungen des BCR und WECC, interlaboratory comparisons 1987 und 1991 [44].

Trotz dieser Problematik sind die Offenlegung der Dokumentation der Untersuchungen zur Prozessbeherrschung, die Messunsicherheitsbetrachtung und die Implementierung in das QM-System des Betreibers zur Anerkennung notwendig. Darüber hinaus bildet die Erforschung der Grenzen der Anlagen den Grundstock und die Voraussetzung für jedes wissenschaftliche Projekt. Aus der Problematik heraus, dass es bei allen herkömmlichen Totlastanlagen defacto nicht möglich ist, die Massescheiben zu demontieren und somit die Massen keiner wiederkehrenden Kalibrierung zugeführt werden können, bedienen sich die Verwender von Totlastanlagen als Abhilfe einer Reihe von ausgesuchten Krafttransfernormalen, um mit diesen direkt wiederkehrende Prüfungen an der Kraftnormalanlage vornehmen zu können. Auf diesem Wege kann eine mögliche Drift der Totlastanlage festgestellt werden. Mit diesen Krafttransfernormalen, deren Messbereiche über alle Laststufen verteilt sind, werden im Laufe der Zeit eine Vielzahl von Messungen durchgeführt, die zum einen eine Aussage über die Stabilität und Genauigkeit des Transfernormals und zum anderen Informationen über die Stabilität der Totlastanlage liefern. Um die Stabilität nicht zu gefährden, werden in der Regel diese Krafttransfernormale für keine andere Verwendung herangezogen. Da auch das BEV vor der Demontage der alten Kraftnormalanlage auf diese Praxis zurückgegriffen hat, besitzt es eine Reihe von Transfernormalen im Lastbereich von 100 N bis 5 MN mit bekannter Historie. Darüber hinaus wurden diese Transfernormale in der Zeit, in der das BEV über

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

keine Kraftnormalanlage verfügte (2009 bis 2012), von der PTB nach dem Standard ISO-Verfahren kalibriert. Nach der Inbetriebnahme der Kraftnormalanlage des BEV wurden mit diesen Transfornormalen Messserien nach dem ISO-Kalibrierverfahren durchgeführt und mit den Ergebnissen der Kalibrierungen der PTB verglichen.

Um eine grundsätzliche Auskunft über die Stabilität der Anlage zu erhalten, wurden mit verschiedenen Transfornormalen unterschiedlicher Laststufen zu verschiedenen Zeitpunkten Messungen nach dem ISO-Ablauf durchgeführt. Dabei wurden Transfornormale mit einem Messbereich bis 2 kN (an der 2 kN-Totlastanlage), 20 kN und 200 kN (an der 250 kN-Totlastanlage) verwendet. Das Ergebnis der Messserien sei im Folgenden exemplarisch an einzelnen Laststufen von verschiedenen Krafttransfornormalen kurz erläutert:

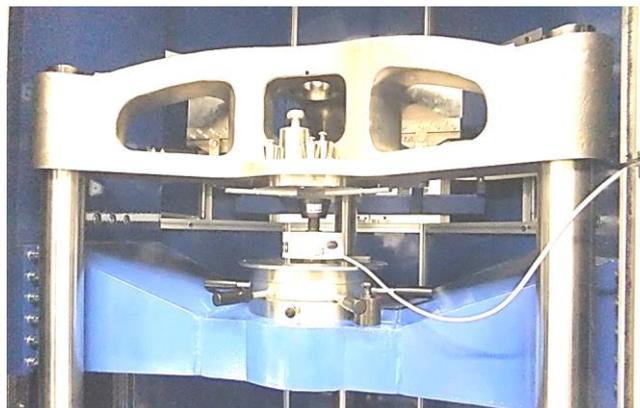


Abbildung 77: Exemplarisch die Positionierung des 200 kN-Transfornormals BEV-M01364 in der 0°-Einbaustellung der Vergleichsmessung vom 15.05.2013

Die Messungen wurden in jeder Einbaustellung (0°, 120°, 240°) vorgenommen. In der 0°-Einbaustellung wurden nach drei Vorbelastungen zwei Aufwärtsreihen bestimmt, in der 120°- und 240°-Einbaustellung wurden nach einer Vorbelastung je eine Aufwärtsreihe und eine Abwärtsreihe bestimmt.

Die Nullpunktdrift wurde linear auf die Messpunkte aufgeteilt; die Ausgleichsfunktion dritter Ordnung wurde aus den Mittelwerten der Aufwärtsreihen bestimmt und durch den Nullpunkt geführt. Im Folgenden als "ausgeglichenen Mittelwerte" werden die Ergebnisse dieser Ausgleichsfunktion bei den einzelnen Laststufen bezeichnet.

Ergebnis der Messung:

Kraft [kN]	arithmet. Mittelwert; x1, x3, x5 [mV/V]	rel. erw. Vergleichspräzision [%]	erw.rel. Messunsicherheit arithmet. Mittelwert [%]	ausgegl. Mittelwert [mV/V]	rel. Interp.Abw. [%]	erw.rel. Messunsicherheit ausgegl. Mittelwert [%]	rel. Umkehrspanne [%]
20	0,200043	0,036	0,051	0,200033	0,005	0,051	0,055
40	0,400068	0,017	0,046	0,400046	0,006	0,046	0,048
60	0,600026	0,010	0,045	0,600046	-0,003	0,045	0,039
80	0,800023	0,010	0,044	0,800040	-0,002	0,044	0,030
100	1,000007	0,004	0,044	1,000036	-0,003	0,044	0,026
120	1,200029	0,003	0,044	1,200041	-0,001	0,044	0,020
140	1,400082	0,003	0,044	1,400062	0,001	0,044	0,014
160	1,600124	0,002	0,044	1,600106	0,001	0,044	0,010
180	1,800193	0,001	0,044	1,800182	0,001	0,044	0,005
200	2,000287	0,001	0,044	2,000295	0,000	0,044	0,000

Tabelle 24: Ergebnis der Mittelwerte der Messung vom 16.5.2013

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

	Last [kN]		Last [kN]		Geräteklasse Fall A	Geräteklasse Fall B	Geräteklasse Fall C	Geräteklasse Fall D	kleinste relative Unsicherheit für zunehmende Kräfte [%]	kleinste relative Unsicherheit für zu-/ abnehmende Kräfte [%]
ab	20	bis	200		00	00	00	00	0,051	0,081
ab	40	bis	200		00	00	00	00	0,046	0,072
ab	60	bis	200		00	00	00	00	0,045	0,063
ab	80	bis	200		00	00	00	00	0,044	0,056
ab	100	bis	200		00	00	00	00	0,044	0,053
ab	120	bis	200		00	00	00	00	0,044	0,050
ab	140	bis	200		00	00	00	00	0,044	0,047
ab	160	bis	200		00	00	00	00	0,044	0,045
ab	180	bis	200		00	00	00	00	0,044	0,044
ab	200	bis	200		00	00	00	00	0,044	0,044

Tabelle 25: Ergebnis der Klassifizierung und berechnete Messunsicherheitswerte für die Messung vom 15.5.2013

Bei der Validierung der Kraftnormalanlage wurden Messserien und Auswertungen von in Summe 30 Transfornormalen verglichen. Diese Transfornormale entstammten zum Teil dem Fundus des BEV, zum Teil wurden sie von der PTB zur Verfügung gestellt. Der Referenzwert der internen Vergleiche errechnet sich aus allen zur Verfügung stehenden Messwerten eines Kraftaufnehmers bei einer Laststufe aus bestehenden BEV-Kalibrierscheinen der Vergangenheit oder aus Kalibrierscheinen der PTB.

Beurteilt wird die relative Abweichung der Einzelmessungen zum Referenzwert, die relative erweiterte Messunsicherheit des Referenzwertes (berechnet aus den Unsicherheiten der Laststufen eines Kraftaufnehmers und einem Beitrag für die Drift) sowie der E_n -Faktor. Wird im Folgenden für den betrachteten Mittelwert dezidiert nichts anderes angegeben, wird als Ergebnis der Verformungswerte jeder Laststufe immer der ausgeglichene Mittelwert verstanden.

Ein Vergleich aller Ergebnisse zeigt, dass bei allen Laststufen eine Überdeckung der Ergebnisse vorliegt. Berücksichtigt man die geschätzte erweiterte Gesamtmessunsicherheit, so ergibt sich im Verhältnis zur Abweichung vom Referenzwert eine Überdeckung der Messergebnisse mit einem E_n -Faktor kleiner 1 (vgl. Kapitel 7.3). Gegenübergestellt sind die ausgewerteten Ergebnisse der Messungen an der 250 kN- Kraftnormalanlage für das 200 kN-Transfornormal BEV-M01364 und das 20 kN-Transfornormal BEV-M01363 den Referenzwerten aus BEV-Kalibrierscheinen aus dem Jahr 2008 und aus PTB-Kalibrierscheinen aus 2012. Bedeutsam dabei ist, dass die Messunsicherheitsbereiche der Ergebnisse generell eine eindeutige Überlappung zeigen (E_n -Faktor ist kleiner 1), sowie, dass die erzielten erweiterten relativen Messunsicherheiten bei den Referenzwerten und den Messwerten annähernd gleich sind. Da die 20 kN-Laststufe des 200 kN-Transfornormals sowohl zu den Referenzwerten der PTB als auch zu den Bezugswerten des BEV einen E_n -Faktor größer 1 aufweist, wird angenommen, dass es hier zu einer höheren Drift im Transfornormal gekommen ist. Diese Annahme wird durch die Klassifizierung der Laststufe bestätigt. In Tabelle 25 wird dieser Kraftsensor über den gesamten Messbereiches mit der höchsten Genauigkeitsklasse (00) bewertet, wobei hier die 20 kN-Laststufe aufgrund der höheren Unsicherheitsergebnisse gerade noch in die Bewertungsklasse (00) fällt.

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

Vergleich nach ISO-Ablauf: Referenzwert aus: BEV-Kalibrierschein							
	Referenzwert Kalibrierschein BEV 2008		Messung BEV		Auswertung Messung		
Kraftstufe	Mittelwert Verformungs- werte Referenz	erw.rel. Mess- unsicherheit Referenz	Mittelwert Verformungs- werte	erw.rel. Mess- unsicherheit	Relative Abweichung ΔX	erw.rel. Gesamt- Messunsicherheit $U(\Delta F_{stat})$	E_n -Faktor
[kN]	[mV/V]	k=2	[mV/V]	k=2		k=2	
Kraftaufnehmer:		200 kN SN: M01364 (Messbereich 200 kN)					
20	0,200036	5,29·10 ⁻⁵	0,200020	4,25·10 ⁻⁵	-7,68·10 ⁻⁵	6,79·10 ⁻⁵	1,13
40	0,400059	4,77·10 ⁻⁵	0,400041	4,47·10 ⁻⁵	-4,50·10 ⁻⁵	6,53·10 ⁻⁵	0,69
60	0,600019	3,81·10 ⁻⁵	0,599996	3,17·10 ⁻⁵	-3,81·10 ⁻⁵	4,95·10 ⁻⁵	0,77
80	0,800024	3,29·10 ⁻⁵	0,799995	3,24·10 ⁻⁵	-3,64·10 ⁻⁵	4,61·10 ⁻⁵	0,79
100	0,999996	2,65·10 ⁻⁵	0,999981	2,20·10 ⁻⁵	-1,46·10 ⁻⁵	3,44·10 ⁻⁵	0,42
120	1,200018	2,69·10 ⁻⁵	1,200005	2,24·10 ⁻⁵	-1,15·10 ⁻⁵	3,51·10 ⁻⁵	0,33
140	1,400080	2,73·10 ⁻⁵	1,400057	2,27·10 ⁻⁵	-1,59·10 ⁻⁵	3,55·10 ⁻⁵	0,45
160	1,600119	2,63·10 ⁻⁵	1,600101	2,19·10 ⁻⁵	-1,15·10 ⁻⁵	3,42·10 ⁻⁵	0,34
180	1,800186	2,66·10 ⁻⁵	1,800171	2,22·10 ⁻⁵	-8,29·10 ⁻⁶	3,46·10 ⁻⁵	0,24
200	2,000283	2,69·10 ⁻⁵	2,000266	2,24·10 ⁻⁵	-8,12·10 ⁻⁶	3,50·10 ⁻⁵	0,23
Kraftaufnehmer:		20 kN SN: M01363 (Messbereich 20 kN)					
2	0,199974	6,32·10 ⁻⁵	0,199984	7,34·10 ⁻⁵	4,89·10 ⁻⁵	9,68·10 ⁻⁵	0,51
4	0,399897	5,44·10 ⁻⁵	0,399911	5,76·10 ⁻⁵	3,51·10 ⁻⁵	7,92·10 ⁻⁵	0,44
6	0,599789	4,08·10 ⁻⁵	0,599800	4,12·10 ⁻⁵	1,90·10 ⁻⁵	5,80·10 ⁻⁵	0,33
8	0,799701	4,23·10 ⁻⁵	0,799699	4,27·10 ⁻⁵	-2,61·10 ⁻⁵	6,01·10 ⁻⁵	0,04
10	0,999567	2,38·10 ⁻⁵	0,999534	2,42·10 ⁻⁵	-3,27·10 ⁻⁵	3,40·10 ⁻⁵	0,96
12	1,199425	2,82·10 ⁻⁵	1,199386	2,83·10 ⁻⁵	-3,23·10 ⁻⁵	3,99·10 ⁻⁵	0,81
14	1,399316	3,58·10 ⁻⁵	1,399249	3,52·10 ⁻⁵	-4,83·10 ⁻⁵	5,02·10 ⁻⁵	0,96
16	1,599146	3,59·10 ⁻⁵	1,599072	3,29·10 ⁻⁵	-4,66·10 ⁻⁵	4,87·10 ⁻⁵	0,96
18	1,799031	4,27·10 ⁻⁵	1,798928	4,22·10 ⁻⁵	-5,73·10 ⁻⁵	6,00·10 ⁻⁵	0,96
20	1,998737	2,46·10 ⁻⁵	1,998725	2,46·10 ⁻⁵	-6,11·10 ⁻⁵	3,48·10 ⁻⁵	0,18

Tabelle 26: Vergleich und Bewertung der Ergebnisse aus den Messungen 200 kN-Transfornormal BEV-M01364 und 20 kN-Transfornormal BEV-M01363

Vergleich nach ISO-Ablauf: Referenz aus: PTB-Kalibrierschein							
	Referenzwert Kalibrierschein PTB 2012		Messung BEV		Auswertung Messung		
Kraftstufe	Mittelwert Verformungs- werte Referenz	erw.rel. Mess- unsicherheit Referenz	Mittelwert Verformungs- wert	erw.rel. Mess- unsicherheit	Relative Abweichung ΔX	erw.rel. Gesamt- Messunsicherheit $U(\Delta F_{stat})$	E_n -Faktor
[kN]	[mV/V]	k=2	[mV/V]	k=2		k=2	
Kraftaufnehmer:		200 kN SN: M01364 (Messbereich 200 kN)					
20	0,200495	4,00·10 ⁻⁴	0,200020	4,25·10 ⁻⁵	-2,37·10 ⁻³	2,04·10 ⁻³	1,16
40	0,400099	3,20·10 ⁻⁴	0,400041	4,47·10 ⁻⁵	-1,45·10 ⁻⁴	2,03·10 ⁻³	0,07
60	0,599677	2,90·10 ⁻⁴	0,599996	3,17·10 ⁻⁵	5,33·10 ⁻⁴	2,02·10 ⁻³	0,26
80	0,799251	2,60·10 ⁻⁴	0,799995	3,24·10 ⁻⁵	9,31·10 ⁻⁴	2,02·10 ⁻³	0,46
100	0,998822	2,50·10 ⁻⁴	0,999981	2,20·10 ⁻⁵	1,16·10 ⁻³	2,02·10 ⁻³	0,58
120	1,198404	2,50·10 ⁻⁴	1,200005	2,24·10 ⁻⁵	1,34·10 ⁻³	2,02·10 ⁻³	0,66
140	1,398003	2,50·10 ⁻⁴	1,400057	2,27·10 ⁻⁵	1,47·10 ⁻³	2,02·10 ⁻³	0,73
160	1,597605	2,50·10 ⁻⁴	1,600101	2,19·10 ⁻⁵	1,56·10 ⁻³	2,02·10 ⁻³	0,77
180	1,797216	2,50·10 ⁻⁴	1,800171	2,22·10 ⁻⁵	1,64·10 ⁻³	2,02·10 ⁻³	0,82
200	1,996839	2,50·10 ⁻⁴	2,000266	2,24·10 ⁻⁵	1,72·10 ⁻³	2,02·10 ⁻³	0,85
Kraftaufnehmer:		20 kN SN: M01363 (Messbereich 20 kN)					
2	0,200066	2,40·10 ⁻⁴	0,199984	7,34·10 ⁻⁵	-4,11·10 ⁻⁴	1,03·10 ⁻³	0,40
4	0,399863	2,20·10 ⁻⁴	0,399911	5,76·10 ⁻⁵	1,19·10 ⁻⁴	1,03·10 ⁻³	0,12
6	0,599621	2,10·10 ⁻⁴	0,599800	4,12·10 ⁻⁵	2,99·10 ⁻⁴	1,02·10 ⁻³	0,29
8	0,799347	2,00·10 ⁻⁴	0,799699	4,27·10 ⁻⁵	4,41·10 ⁻⁴	1,02·10 ⁻³	0,43
10	0,999056	1,90·10 ⁻⁴	0,999534	2,42·10 ⁻⁵	4,79·10 ⁻⁴	1,02·10 ⁻³	0,47
12	1,198745	1,90·10 ⁻⁴	1,199386	2,83·10 ⁻⁵	5,35·10 ⁻⁴	1,02·10 ⁻³	0,53
14	1,398076	1,80·10 ⁻⁴	1,399249	3,12·10 ⁻⁵	8,39·10 ⁻⁴	1,02·10 ⁻³	0,83
16	1,598075	1,80·10 ⁻⁴	1,599072	2,89·10 ⁻⁵	6,24·10 ⁻⁴	1,02·10 ⁻³	0,61
18	1,797348	1,80·10 ⁻⁴	1,798928	3,16·10 ⁻⁵	8,79·10 ⁻⁴	1,02·10 ⁻³	0,86
20	1,997348	1,80·10 ⁻⁴	1,998725	2,46·10 ⁻⁵	6,89·10 ⁻⁴	1,02·10 ⁻³	0,68

Tabelle 27: Vergleich und Bewertung der mittleren Anzeigewerte aus der PTB-Kalibrierung und den Vergleichsmessungen an der BEV-Anlage

Messungen nach ISO und DAkkS-DKD

Aufgrund der verwendeten Abläufe bei Messungen aus der Vergangenheit im BEV und einer Reihe von erfolgten Kalibrierungen der Transfornormale des BEV, ebenfalls nach

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

dem Ablauf der ISO, wurde bei der vorangegangenen internen Validierung ein ISO-konformer Messablauf ausgewählt. Dieser Messablauf geht im Wesentlichen auf die Charakteristik der Krafttransfornormale ein und bringt dadurch eine reproduzierbarere Aussage über die messtechnischen Eigenschaften des Sensors.

Da bei der Anlagenvalidierung in erster Linie nicht die Sensoren beschrieben werden sollen, sondern die Kraftnormalanlage selbst, wird hier ein alternativer Weg eingeschlagen. Durch die bessere Vergleichbarkeit und die höhere Aussagekraft in Bezug auf die Messanlage, wird bei den Vergleichen mit der PTB nach dem für Kalibrierlaboratorien vorgeschlagenen DKD-Messverfahren für Vergleichsmessungen [6] vorgegangen. Vorerst wurden aber, im Bestreben, eine Querverschränkung der beiden Messverfahren zu erhalten, bei einzelnen Transfornormalen Messungen, sowohl nach ISO- als auch nach DKD-Ablauf, vorgenommen und die Ergebnisse verglichen.

Am Beispiel des D 100 kN SN: 20701 Transfornormalen werden in der Tabelle 28 die Ergebnisse verschiedener Messabläufe gegenübergestellt, wobei hier nur die vier Laststufen angeführt sind, die von beiden Verfahren abgedeckt werden. Im oberen Drittel der Tabelle sind die Messungen (Referenzwerte und Vergleichsmessungen) rein nach dem DKD Verfahren durchgeführt worden. Im mittleren Bereich wurden die Referenzmessungen nach dem DKD Verfahren, die Vergleichsmessungen nach den 10%-Schritten des ISO-Ablaufes dargestellt.

Während die Referenzwerte der PTB und die Werte aus den Messungen an der Anlage im BEV, nach dem gleichen DKD-Verfahren ausgeführt, höchste Übereinstimmung zeigen, kommt es bei den Messungen an der Anlage des BEV nach dem ISO-Verfahren zu erheblichen Abweichungen von den Referenzwerten. Damit wird wieder gezeigt, dass ein Vergleich von Verformungswerten nur möglich ist, wenn der Messablauf völlig ident ist (vergleiche dazu die Erkenntnisse des internen Vergleichs der Gewichtscheiben in Kapitel 6.2.3).

Alle Messungen nach dem DKD-Verfahren zeigen in sich Übereinstimmung und Schlüssigkeit. Ebenso verhalten sich alle Messungen nach dem ISO-Verfahren. Werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Verfahren allerdings miteinander verglichen, ist der E_n -Faktor wesentlich größer als 1 und zeigt keine Überlappung der Unsicherheitsbereiche. Dies bedeutet, die Ergebnisse zeigen keine Übereinstimmung mit der angegebenen Messunsicherheit.

Erst durch Einfügung eines zusätzlichen Unsicherheitsanteiles für das Verfahren $u^2(\delta F_{\text{Verfahren}})$,

$$u(\Delta F_{\text{stat}}) = \sqrt{u^2(\bar{F}_{\text{BNME}}) - u^2(\bar{F}_{\text{NME}}) + u^2(\delta F_{\text{Real}}) + u^2(\delta F_{\text{Drift}}) + u^2(\delta F_{\text{Temp}}) + u^2(\delta F_{\text{Verfahren}})}$$

ist es möglich, eine Überdeckung der Messergebnisse mit einem E_n -Faktor kleiner 1 zu erhalten (siehe Ableitung Kapitel 7.5.1). Empirisch ermittelt, hat der zusätzliche, relative Unsicherheitsanteil eine Größe von $8 \cdot 10^{-5}$ bis $1 \cdot 10^{-4}$ zu haben, um diese Überdeckung zu erhalten (siehe Tabelle 28 unten).

Bei den ebenfalls verglichenen Transfornormalen der Nominalwerte 1 kN und 20 kN brachten die Vergleiche der Messungen mit unterschiedlichem Ablauf ein äquivalentes Ergebnis. Faktisch gesehen ist aber hier eine Beurteilung der Messergebnisse in Richtung der Aussagekraft über die Kraftanlagenleistung nicht mehr möglich.

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

Vergleich ISO Messung BEV -PTB Kalibrierschein								
	Referenzwert Kalibrierschein PTB 2012 Messablauf nach DKD		Messung BEV		Auswertung Messung			
Kraftstufe	Mittelwert Verformungs- werte Referenz	erw.rel. Mess- unsicherheit Referenz	Mittelwert Verformungs- wert	erw.rel. Mess- unsicherheit	Relative Abweichung ΔF_{stat}	erw.rel. Gesamt- Messunsicherheit $U(\Delta F_{stat})$	E_n -Faktor	
[kN]	[mV/V]	k=2	[mV/V]	k=2	[mV/V]	k=2		
Kraftaufnehmer:		100 kN SN: 20701 (Messbereich 100 kN) Messablauf nach DKD						
50	0,99469	$2,1 \cdot 10^{-5}$	0,999464	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$-1,71 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	0,16	
60	1,199397	$2,1 \cdot 10^{-5}$	1,199403	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$2,76 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	0,17	
80	1,599327	$2,1 \cdot 10^{-5}$	1,599330	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,06 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	0,06	
100	1,999299	$2,0 \cdot 10^{-5}$	1,999296	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$-1,37 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	0,05	
Kraftaufnehmer:		100 kN SN: 20701 (Messbereich 100 kN) Messablauf nach ISO						
50	0,99469	$2,1 \cdot 10^{-5}$	0,999502	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$3,32 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	1,04	
60	1,199397	$2,1 \cdot 10^{-5}$	1,199492	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$7,91 \cdot 10^{-6}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	2,53	
80	1,599327	$2,1 \cdot 10^{-5}$	1,599497	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$1,06 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	3,37	
100	1,999299	$2,0 \cdot 10^{-5}$	1,999468	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$8,47 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	2,68	
Kraftaufnehmer:		100 kN SN: 20701 (Messbereich 100 kN) Messablauf nach ISO					erweiterte Unsicherheit für Verfahren	
50	0,99469	$2,1 \cdot 10^{-5}$	0,999502	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$3,32 \cdot 10^{-5}$	$8,6 \cdot 10^{-5}$	0,39	
60	1,199397	$2,1 \cdot 10^{-5}$	1,199492	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$7,91 \cdot 10^{-6}$	$8,6 \cdot 10^{-5}$	0,92	
80	1,599327	$2,1 \cdot 10^{-5}$	1,599497	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$1,06 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	0,99	
100	1,999299	$2,0 \cdot 10^{-5}$	1,999468	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$8,47 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,81	

Tabelle 28: Bewertung DAkkS-DKD Messablauf mit Ergebnissen eines ISO-konformen Messablaufes und Erweiterung der Gesamtunsicherheit

Zur Auswertung herangezogen wurden die Messwerte von acht KrafttransfERNormalen im Messbereich von 500 N bis 250 kN und weiter bis 5 MN. Dabei wurde ausschließlich auf vergleichbare Messabläufe zurückgegriffen. Der Vergleich der Ergebnisse von ausgetragenen Messserien mit BEV-Kalibrierzertifikaten aus den Jahren 2004 bis 2008, Kalibrierzertifikaten der PTB aus 2010 und den ab August 2012 durchgeführten Messserien an der neuen Kraftnormalanlage, zeigten einen eindeutigen Verlauf mit großteils sich deckenden Messergebnissen. Dabei wurde festgestellt, dass, abhängig von der Qualität des TransfERNormalen, die Anzeigewerte (inklusive der Nullanzeige) einer mittleren jährlichen Drift der Größenordnung von $3 \cdot 10^{-5}$ bis $8 \cdot 10^{-5}$ unterliegen. Berücksichtigt man diese Drift direkt bei der Auswertung und der Abschätzung der Messunsicherheit, ergeben sich bei gleichem Messablauf in allen Laststufen Überschneidungen der Unsicherheitsbeträge mit einem E_n -Faktor kleiner 1.

Versucht man hingegen unterschiedliche Messabläufe direkt miteinander zu vergleichen, wird man feststellen, dass man mit einer Größenordnung der relativen Messunsicherheit, wie man sie von Standardkalibrierungen her kennt, kein Auslangen findet. Im beschriebenen Beispiel des D 100 kN-TransfERNormalen aus Tabelle 28 war diese bis $3,2 \cdot 10^{-5}$ bei einem E_n -Faktor > 3 . Auch hier hat sich gezeigt, dass die Vergleichbarkeit von Messergebnissen nur dann gegeben ist, wenn Einspannung, Kraftverlauf, Messablauf in Laststufen, Zeitsymmetrien und Umgebungsbedingungen ident sind. Treten hier Differenzen auf, erhält man Streuungen, Abweichungen und Standardabweichungen, die um ein Vielfaches größer sind, als zu erwarten wäre.

An dieser Stelle sei folgender Satz aus den DAkkS-DKD Richtlinien R3-3 [6] (Kapitel 7) und R 3-9 [7] (Kapitel 8) zitiert:

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

"Die Ermittlung der Messunsicherheit ersetzt nicht die Qualifikation und Erfahrung des Messtechnikers, z. B. bei der

- Auswahl des geeigneten Messverfahrens,
- Gestaltung des Messaufbaus,
- Durchführung der Messungen und
- Auswertung der Messungen."

7.5 Internationale Anerkennung

Als Partner für bilaterale Vergleichsmessungen in Form einer wissenschaftlichen Zusammenarbeit konnte die Physikalisch-Technische Bundesanstalt gewonnen werden. Für die angestrebte internationale Anerkennung wurden für die Zusammenarbeit die grundlegenden und bekannten Rahmenbedingungen für EURAMET-Vergleichsmessungen vereinbart. In der Datenbank der EURAMET bzw. in der BIPM-Key-Comparison-Database sind auf der Homepage der EURAMET die Ziele dieses Projektes, eine Beschreibung der Kraftanlage und der geplanten Vergleichsmessungen sowie die formellen Rahmenbedingungen festgelegt und veröffentlicht. Nur bei Einhaltung dieses vorher festgelegten, formellen Ablaufs kann von der internationalen Gemeinschaft das Endergebnis überprüft und anerkannt werden.

Nach EURAMET cg-4: Calibrations Guide [5] können proklamierte CMC-Einträge für Kraftmaschinen nur dann anerkannt werden, wenn entsprechende Vergleichsmessungen mit anerkannten nationalen Normalmaschinen durchgeführt und publiziert worden sind. Die Messungen und Auswertungen solcher Vergleichsmessungen sind aber nicht wie eine „Standard“-Kalibrierung nach ISO 376 zu sehen, sondern sollen nach den Regeln eines wissenschaftlichen internationalen Schlüsselvergleiches der EURAMET nach den Vorgaben des BIPM ausgeführt sein. Die Veröffentlichung der Analyse dieser Vergleichsmessungen sollte den Beweis erbringen, dass unter Verwendung derselben Prüfmethode und bei gleichem Ablauf die Ergebnisse beider Kraftmaschinen im metrologischen Sinne gleichwertig und vergleichbar sind.

Nur aufgrund derartiger Vergleichsmessungen ist es möglich, die Kraftskala einer neu aufgebauten Kraftnormalmaschine mit der Kraftskala anderer NMIs zu vergleichen und zu beurteilen. Vergleiche unter anderem [44], [45], [46], [47], [49], [50]. Werden diese Messungen vor der internationalen Gemeinschaft der NMIs offengelegt, erörtert und von der Gemeinschaft akzeptiert (z.B. im gegenständlichen Fall bei den jährlichen Treffen der EURAMET [51]) und weiter bei den Arbeitstreffen und Versammlungen des CCM, so kann der Antrag auf Eintragung in die CMC-tables erfolgen. Somit ist die Grundlage für die generelle Anerkennung anderer NMIs geschaffen. Die Teilnahme und Mitarbeit an weiteren internationalen Projekten und Vergleichsmessungen zum Nachweis der Aufrechterhaltung der Kompetenz sind obligat.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens FV.Nr. 12021 der PTB [51] wurden vergleichende Messungen zwischen der Kraftnormalanlage des BEV und den Kraftnormalanlagen der PTB, und somit mit der Kraftskala der Physikalisch-Technischen-Bundesanstalt in Braunschweig, durchgeführt. Die Durchführung von Vergleichsmessungen unterliegt einem in den Regeln des RMO festgelegten Prozedere, beschrieben im Begleitvertrag des Forschungsvorhabens BEV-PTB. Sobald von zwei oder mehreren Laboratorien

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

Vergleichsmessungen (Ringvergleiche) geplant werden, hat ein Labor die Organisation als „Pilotlabor“ zu übernehmen. Dem Sekretariat des RMO bzw. des BIPM ist Ablauf, Zweck und Ziel des Vergleiches zu melden, ebenso ist über den Fortschritt und das Ergebnis zu berichten.

Analog der Vorlage erfolgte die Meldung des bilateralen Projektes mit der PTB in der Datenbank der EURAMET bzw. in der BIPM-Key-Comparison-Database (KCDB).

Laborbedingungen

Der Aufstellungsort der Anlage ist zur Gänze klimatisiert. Die mittlere Raumtemperatur und die mittlere relative Luftfeuchte sind im BEV an die der PTB angeglichen und betragen im Zeitraum der Messungen $21,0 \pm 1,0$ °C sowie 45 ± 5 % rH (die exakten Klimadaten sind in den jeweiligen Messprotokollen aufgezeichnet).

Kraftnormalmesseinrichtung bis 2 kN

Die Kraftnormalmesseinrichtung ist als Messeinrichtung mit unmittelbarer Masse-wirkung mit zwei unabhängig wirkenden Massestapeln ausgeführt. Jeder Massestapel ist in einzeln ansteuerbaren Gewichtscheiben aufgeteilt. Die Verbindung erfolgt über ein Waagebalkensystem; einstellbare Kräfte: 5 N bis 2000 N in Stufen von 5 N.

Kraftnormalmesseinrichtung bis 250 kN

Die Kraftnormalmesseinrichtung ist als Messeinrichtung mit unmittelbarer Massewirkung und Massekompensation des Belastungsgehänges ausgeführt. Die Massen sind einzeln ansteuerbar; die Massekompensation erfolgt über ein fixes Waagebalkensystem mit Gegengewicht; einstellbare Kräfte: 50 N bis 250 kN in Stufen von 50 N.

Kraftnormalmesseinrichtung 1000 kN

Die Kraftnormalmesseinrichtung arbeitet nach dem Prinzip der hydraulischen Kraftmultiplikation, hervorgerufen durch unterschiedliche Wirkflächen von zwei Zylinder-Kolbensystemen. Die zu multiplizierende Kraft wird durch die Kraftnormalmesseinrichtung 250 kN generiert. Aus der Konstruktion ergibt sich ein Übersetzungsverhältnis von etwa 1:1; einstellbare Kräfte: 10 kN bis 1000 kN in Stufen von 5 kN.

Kraftnormalmesseinrichtung 5000 kN

Die Kraftnormalmesseinrichtung arbeitet nach identem Prinzip der 1 MN Kraftnormalmesseinrichtung. Aus der Konstruktion ergibt sich allerdings ein Übersetzungsverhältnis von etwa 1:50; einstellbare Kräfte: 50 kN bis 5000 kN in Stufen von 25 kN.

Belastung Körper/Massen

Alle eingesetzten Belastungsmassen sind aus korrosionsbeständigem Edelstahl gefertigt. Die Masse der Belastungskörper wurde jeweils unter Berücksichtigung der örtlichen Fallbeschleunigung in etwa auf Sollwerte justiert. Eine präzise Korrektur erfolgt im Zuge der Auswertung.

Funktion der Kraftnormalmesseinrichtung

Verweis auf die Maschinenbeschreibung aus Kapitel 5.3 und die Veröffentlichungen [34] und [35].

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

Verwendete Anzeigegeräte

PTB: Digitales Präzisionsmessgerät: DMP 40 Nr. 051320043 PTB

BEV: Digitales Präzisionsmessgerät: DMP 40 Nr. T540-4101/2

Beide Brückenspannung: 5 V; Messbereich: 2,5 mV/V; Auflösung: 0,000001 mV/V

Zeitraum der gemeinsam durchgeführten Vergleichsmessungen im BEV:

3. Dezember 2012 bis 19. Dezember 2012 und

2. April 2013 bis 24. April 2013.

Von August 2012 bis November 2012 fanden die Vormessungen in der PTB statt.

Von Jänner 2013 bis März 2013 sowie im Mai 2013 wurden weitere Messungen im BEV durchgeführt.

Die Rückmessungen erfolgten in der PTB im Juni/Juli 2013.

7.5.1 Messverfahren

Ziel der Messungen bzw. angestrebtes Ergebnis war die Feststellung der relativen Abweichung zwischen den Kraftskalen des BEV und der PTB.

Sowohl die Vormessungen in der PTB als auch die Messungen im BEV sind nach dem DKD-Messverfahren für Vergleichsmessungen für Kalibrierlaboratorien [6] durchgeführt worden. Dabei erfolgten zur Erzielung der höchsten Genauigkeit der TransfERNormale Messungen nur bei Laststufen, die größer gleich 50 % der Maximallast der TransfERNormale sind. Die Laststufen wurden in vier Einbaulagen bei identer Reihenfolge und immer ansteigenden Kräften realisiert. Der Messablauf der Kalibrierung des Kraftaufnehmers ist in Kapitel 3.6.3 detailliert beschrieben.

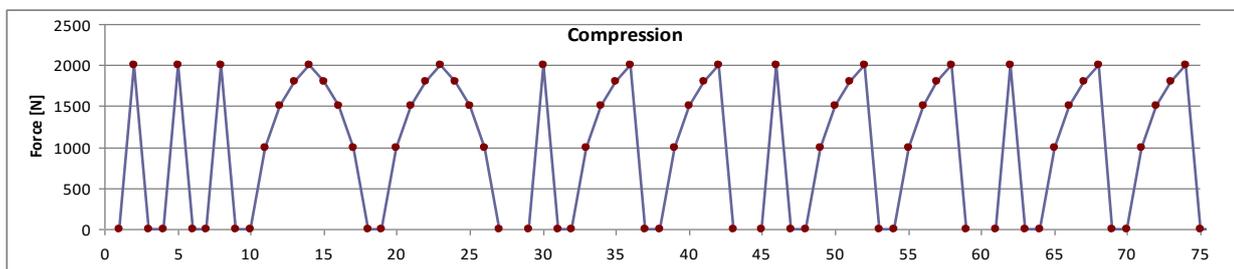


Abbildung 78: DKD-Messverfahren für Vergleichsmessungen für Kalibrierlaboratorien

Die Auswertung der Messungen nach dem DKD-Messverfahren für Vergleichsmessungen für Kalibrierlaboratorien [6] erfolgte zur Erzielung besserer Reproduzierbarkeit der Werte der TransfERNormale nur in vier Laststufen im oberen Belastungsbereich. Dabei wurden im Wesentlichen die Mittelwerte der Anzeigewerte bei zunehmender Last dem Vergleich unterzogen.

Um eine Aussage über die Linearität in den Ergebnissen der Messanlage treffen zu können, wurden in Summe 20 TransfERNormale unterschiedlicher Messbereiche verglichen. Aufgrund dieser zahlenmäßig äußerst umfangreichen Messungen und der damit verbundenen Fülle von Auswertungsdaten, wird hier exemplarisch das Ergebnis von je nur einer Auswertung pro Sensor gezeigt. Bei allen verwendeten TransfERNormalen wurden in analoger Vorgehensweise die Vergleiche durchgeführt. Alle Messserien, die im Dezember 2012 und im April 2013 durchgeführt worden sind, wurden sowohl mit der Standard-Auswerteroutine der PTB als auch mit jener Software ausgewertet, die für dieses Kraftnormalanlagensystem des BEV entwickelt wurden. Somit kann auch die Auswertung direkt gegenübergestellt und auf Richtigkeit beurteilt werden, da jeweils die

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

gleichen Messdaten verwendet werden. Als Ergebnis der Auswertung werden die erhaltenen, korrigierten Verformungswerte sowie die erhaltene, erweiterte relative Messunsicherheit der Transfornormalmessung herangezogen (siehe Kapitel 3.6.2 und 3.6.5). Bei den Messserien aus November 2012 und den Messserien von Jänner bis März 2013 ist nur die BEV-Auswertung verwendet worden.

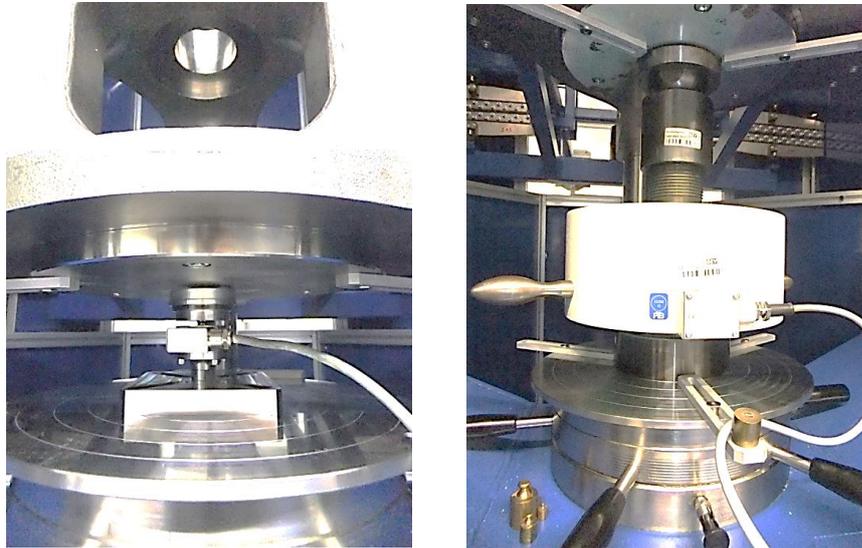


Abbildung 79: Bei den Vergleichsmessungen verwendete Transfornormale (2 kN-Sensor und 500 kN-Sensor) in der 250 kN-Kraftnormalanlage

Hier werden nur die Ergebnisse unter Berücksichtigung der Messunsicherheit auf Übereinstimmung überprüft und beurteilt. Tabelle 29 und Tabelle 30 zeigen auszugsweise die Gegenüberstellung der Ergebnisse von einzelnen Messreihen aus den Vormessungen entsprechend der Auswertung der PTB an den Anlagen der PTB (Referenzwert) mit den Ergebnissen der gemeinsamen Vergleichsmessungen mittels Auswertung durch die BEV-Auswertung. Alle Messungen beinhalten selbstverständlich eine Messunsicherheitsangabe. Diese Messungen wurden für jedes Transfornormal mindestens dreimal wiederholt, wobei für die schlussendliche Beurteilung die Mittelwerte der Teilergebnisse herangezogen worden sind. Die Gegenüberstellung der gemittelten Messergebnisse (Verformungswerte) aus Tabelle 29 und Tabelle 30 erfolgte aus den mittleren Anzeigewerten bei allen aufsteigenden Laststufen unterschiedlicher Einbaustellungen. Die relative Gesamtmessunsicherheit errechnet sich aus der Quadratwurzel der Summe der Quadrate der Messunsicherheit der Messungen an der PTB und der Summe der Quadrate der Messunsicherheit der Messungen im BEV sowie dem Quadrat eines zusätzlichen Unsicherheitsanteils aus Drift- und Temperaturverhalten (Temperaturdifferenz PTB - BEV Wien = 1 K). Weiters ist das Quadrat jenes Unsicherheitsanteiles bei beiden Verfahren zu addieren, der der Realisierung durch die verwendete bzw. betrachtete Kraftnormalmesseinrichtung zugeschrieben wird.

In Anlehnung an den DAkkS-DKD-R 3-9 [7] ist die Abweichung der Kraft

$$\Delta F_{stat} = \bar{F}_{BNME} - \bar{F}_{NME} + \sum_{i=1}^3 \delta F_{i,stat}$$

mit

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

$$\sum_{i=1}^3 \Delta F_{i,stat} = \Delta F_{Real} + \Delta F_{Drift} + \Delta F_{Temp}$$

wobei ΔF_{stat} die Abweichung der Kraftmittelwerte bei statischer Belastung, \bar{F}_{BNME} der Mittelwert der Kraftanzeige des Transfornormal in der Bezugsmesseinrichtung und \bar{F}_{NME} der Mittelwert der Kraftanzeige des Transfornormal in der Vergleichsmesseinrichtung ist. Weiters ist ΔF_{Real} die Messabweichung bei der Realisierung in der Vergleichsmesseinrichtung, ΔF_{Drift} die Messabweichung durch die Langzeitdrift des Transfornormal und ΔF_{Temp} die Messabweichung durch den Temperaturunterschied des Transfornormal in der Bezugsmesseinrichtung und der Vergleichsmesseinrichtung. Danach ergibt sich die Gesamtunsicherheit aus den Unsicherheitsanteilen nach

$$u(\Delta F_{stat}) = \sqrt{u^2(\bar{F}_{BNME}) + u^2(\bar{F}_{NME}) + u^2(\Delta F_{Real}) + u^2(\Delta F_{Drift}) + u^2(\Delta F_{Temp})}$$

und

$$U(\Delta F_{stat}) = u(\Delta F_{stat}) \cdot k.$$

wobei $U(\Delta F_{stat})$ die erweiterte Unsicherheit in den gegenständlichen Beispielen bei $k=2$ ist.

Verglichen und beurteilt werden wieder die relativen Abweichungen der Mittelwerte zwischen den jeweiligen Laststufen. Die Referenzwerte wurden an den Kraftanlagen der PTB realisiert, die Vergleichswerte an der Kraftanlage im BEV. Zum direkten Vergleich der unterschiedlichen Laststufen werden jeweils die relativen Abweichungen zum Referenzwert

$$rel. \Delta F_{sta} = \frac{\Delta F_{stt}}{\bar{F}_{BNME}}$$

betrachtet (siehe analoge Betrachtungsweise im Kapitel 7.3). Beurteilt wurde ebenfalls die Größe der dazugehörenden E_n -Faktor, dem Verhältnis aus der relativen Abweichung zwischen den Ergebnissen des BEV, denen der PTB und der Gesamtunsicherheit. Dieser E_n -Faktor ist in den vorliegenden Fällen bedeutend kleiner als 1. Daher liegt hier nicht nur eine Überschneidung der einzelnen Messunsicherheitsbereiche vor, sondern der Überlappungsbereich beträgt im Mittel mehr als 70% der Spannweite des Messunsicherheitsbereiches (E_n -Faktoren kleiner 0,3).

Die gegenübergestellten Messergebnisse mit den relativen Abweichungen zwischen den Ergebnissen der PTB- und BEV-Messungen erfolgten bei den genannten Transfornormalen und den Laststufen: 5 kN, 10 kN, 20 kN, 50 kN, 100 kN und 500 kN, sowie den Laststufen 10 N, 50 N, 100 N, 200 N, 500 N, 1 kN und 2 kN. Mit angegeben sind in der Gegenüberstellung der Tabelle 29 und Tabelle 30 die erzielten Einzelmessunsicherheiten, die erzielte Gesamtmessunsicherheit jeder Laststufe und den dazugehörenden ermittelten E_n -Faktoren (Überlappungsfaktoren).

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

Vergleich DAKKS-DKD Messung BEV - PTB bei Laststufen zwischen 2 kN und 250 kN							
Kraftstufe	Referenzwert Vormessungen PTB		Messung BEV		Auswertung Messung		
	Mittelwert Verformungs- werte Referenz	erw.rel. Mess- unsicherheit Referenz	Mittelwert Verformungs- wert	erw.rel. Mess- unsicherheit	Relative Abweichung <i>rel. ΔF_{stat}</i>	erw.rel. Gesamt- Messunsicherheit <i>U(ΔF_{stat})</i>	E _n -Faktor
[kN]	[mV/V]	k=2	[mV/V]	k=2		k=2	
Kraftaufnehmer: D 5 kN SN: 052930043 (Messbereich 5 kN) vom 7.12.12							
2	0,800378	4,1·10 ⁻⁵	0,800347	3,7·10 ⁻⁵	-3,77·10 ⁻⁵	5,5·10 ⁻⁵	0,69
3	1,200589	3,5·10 ⁻⁵	1,200554	3,6·10 ⁻⁵	-2,93·10 ⁻⁵	5,0·10 ⁻⁵	0,58
4	1,600816	3,1·10 ⁻⁵	1,600801	3,3·10 ⁻⁵	-9,10·10 ⁻⁵	4,5·10 ⁻⁵	0,20
5	2,001066	2,9·10 ⁻⁵	2,001048	2,1·10 ⁻⁵	-8,70·10 ⁻⁵	3,6·10 ⁻⁵	0,24
Kraftaufnehmer: D 10 kN SN: 051630022 (Messbereich 10 kN) vom 11.12.12							
5	1,000171	2,1·10 ⁻⁵	1,000186	1,5·10 ⁻⁵	1,51·10 ⁻⁵	2,6·10 ⁻⁵	0,58
6	1,200218	2,1·10 ⁻⁵	1,200225	2,6·10 ⁻⁵	6,18·10 ⁻⁶	3,3·10 ⁻⁵	0,19
8	1,600321	2,1·10 ⁻⁵	1,600332	3,7·10 ⁻⁵	6,88·10 ⁻⁶	4,2·10 ⁻⁵	0,16
10	2,000443	2,1·10 ⁻⁵	2,000463	2,6·10 ⁻⁵	1,02·10 ⁻⁵	3,3·10 ⁻⁵	0,31
Kraftaufnehmer: D 20 kN SN: 40278 (Messbereich 20 kN) vom 5.12.12							
10	1,002318	2,0·10 ⁻⁵	1,002303	2,5·10 ⁻⁵	-1,48·10 ⁻⁵	3,3·10 ⁻⁵	0,45
14	1,403368	2,0·10 ⁻⁵	1,403355	4,7·10 ⁻⁵	-9,48E-10 ⁻⁶	5,2·10 ⁻⁵	0,18
16	1,603917	2,1·10 ⁻⁵	1,603894	5,0·10 ⁻⁵	-1,46E-10 ⁻⁵	5,4·10 ⁻⁵	0,27
20	2,005029	2,1·10 ⁻⁵	2,005018	5,3·10 ⁻⁵	-5,75·10 ⁻⁶	5,7·10 ⁻⁵	0,10
Kraftaufnehmer: D 50 kN SN: 30835 (Messbereich 50 kN) vom 4.12.12							
20	0,800982	2,0·10 ⁻⁵	0,800972	2,5·10 ⁻⁵	-1,15·10 ⁻⁵	3,2·10 ⁻⁵	0,36
30	1,201589	2,1·10 ⁻⁵	1,201585	2,4·10 ⁻⁵	-3,63·10 ⁻⁶	3,2·10 ⁻⁵	0,11
40	1,602277	2,1·10 ⁻⁵	1,602305	2,4·10 ⁻⁵	1,76·10 ⁻⁵	3,2·10 ⁻⁵	0,55
50	2,003010	2,0·10 ⁻⁵	2,003011	2,1·10 ⁻⁵	4,30·10 ⁻⁷	3,0·10 ⁻⁵	0,01
Kraftaufnehmer: D 100 kN SN: 20701 (Messbereich 100 kN) vom 12.12.12							
50	0,999469	2,1·10 ⁻⁵	0,999464	2,1·10 ⁻⁵	-4,81·10 ⁻⁶	3,0·10 ⁻⁵	0,16
60	1,199397	2,1·10 ⁻⁵	1,199403	2,2·10 ⁻⁵	5,15·10 ⁻⁶	3,0·10 ⁻⁵	0,17
80	1,599327	2,1·10 ⁻⁵	1,599330	2,2·10 ⁻⁵	1,77·10 ⁻⁶	3,0·10 ⁻⁵	0,06
100	1,999299	2,0·10 ⁻⁵	1,999296	2,2·10 ⁻⁵	-1,37·10 ⁻⁶	3,0·10 ⁻⁵	0,05
Kraftaufnehmer: D 500 kN SN: 43010 (Messbereich 250 kN) vom 17.12.12							
100	0,399748	2,1·10 ⁻⁵	0,399745	2,2·10 ⁻⁵	-7,52·10 ⁻⁶	3,0·10 ⁻⁵	0,25
200	0,799506	2,0·10 ⁻⁵	0,799507	2,2·10 ⁻⁵	2,22·10 ⁻⁶	3,0·10 ⁻⁵	0,07
250	0,999404	2,0·10 ⁻⁵	0,999410	2,4·10 ⁻⁵	5,54·10 ⁻⁶	3,1·10 ⁻⁵	0,18

Tabelle 29: Ergebnisse der PTB als Referenz und des BEV bei der 250 kN-Kraftanlage

Vergleich DAKKS-DKD Messung BEV - PTB bei Laststufen zwischen. 5 N und 2 kN							
Kraftstufe	Referenzwert Vormessungen PTB		Messung BEV		Auswertung Messung		
	Mittelwert Verformungs- werte Referenz	erw.rel. Mess- unsicherheit Referenz	Mittelwert Verformungs- wert	erw.rel. Mess- unsicherheit	Relative Abweichung <i>rel. ΔF_{stat}</i>	erw.rel. Gesamt- Messunsicherheit <i>U(ΔF_{stat})</i>	E _n -Faktor
[N]	[mV/V]	k=2	[mV/V]	k=2		k=2	
Kraftaufnehmer: D 10 N SN: 040430208 (Messbereich 10 N) vom 17.04.13							
5	0,999537	2,3·10 ⁻⁵	0,999581	4,7·10 ⁻⁴	4,32·10 ⁻⁵	4,7·10 ⁻⁴	0,09
10	1,999149	2,1·10 ⁻⁵	1,999258	3,3·10 ⁻⁴	5,42·10 ⁻⁵	3,3·10 ⁻⁴	0,16
Kraftaufnehmer: D 50 N SN: 042030043 (Messbereich 50 N) vom 18.04.13							
10	0,400129	2,0·10 ⁻⁵	0,400137	1,9·10 ⁻⁴	2,06·10 ⁻⁵	1,9·10 ⁻⁴	0,11
20	0,800251	2,0·10 ⁻⁵	0,800268	9,7·10 ⁻⁵	2,21·10 ⁻⁵	9,9·10 ⁻⁵	0,22
40	1,600432	2,0·10 ⁻⁵	1,600461	7,5·10 ⁻⁵	1,81·10 ⁻⁵	7,8·10 ⁻⁵	0,23
50	2,000400	2,1·10 ⁻⁵	2,000419	8,6·10 ⁻⁵	9,44·10 ⁻⁶	8,8·10 ⁻⁵	0,11
Kraftaufnehmer: D 100 N SN: 160330035 (Messbereich 100 N) vom 18.04.13							
50	0,999204	2,1·10 ⁻⁵	0,999219	6,1·10 ⁻⁵	1,46·10 ⁻⁵	6,4·10 ⁻⁵	0,23
60	1,199055	2,1·10 ⁻⁵	1,199074	6,2·10 ⁻⁵	1,59·10 ⁻⁵	6,5·10 ⁻⁵	0,24
80	1,598738	2,1·10 ⁻⁵	1,598744	5,7·10 ⁻⁵	3,58·10 ⁻⁶	6,1·10 ⁻⁵	0,06
100	1,998413	2,1·10 ⁻⁵	1,998438	6,1·10 ⁻⁵	1,27·10 ⁻⁵	6,5·10 ⁻⁵	0,20
Kraftaufnehmer: D 200 N SN: 160330082 (Messbereich 200 N) vom 16.04.13							
100	0,999918	2,0·10 ⁻⁵	0,999922	2,8·10 ⁻⁵	3,51·10 ⁻⁵	3,5·10 ⁻⁵	0,10
120	1,199900	2,0·10 ⁻⁵	1,199913	2,9·10 ⁻⁵	1,12·10 ⁻⁵	3,6·10 ⁻⁵	0,31
160	1,599856	2,0·10 ⁻⁵	1,599861	2,6·10 ⁻⁵	2,90·10 ⁻⁶	3,3·10 ⁻⁵	0,09
200	1,999805	2,0·10 ⁻⁵	1,999808	1,7·10 ⁻⁵	1,26·10 ⁻⁶	2,7·10 ⁻⁵	0,05
Kraftaufnehmer: D 500 N SN: 00058 (Messbereich 500 N) vom 19.04.13							
200	0,803544	2,0·10 ⁻⁵	0,803527	3,3·10 ⁻⁵	-2,10·10 ⁻⁵	3,9·10 ⁻⁵	0,54
300	1,205359	2,0·10 ⁻⁵	1,205334	3,1·10 ⁻⁵	-2,05·10 ⁻⁵	3,8·10 ⁻⁵	0,55
400	1,607216	2,0·10 ⁻⁵	1,607237	1,5·10 ⁻⁴	1,30·10 ⁻⁵	1,5·10 ⁻⁴	0,09
500	2,009085	2,0·10 ⁻⁵	2,009094	2,0·10 ⁻⁴	4,20·10 ⁻⁶	2,0·10 ⁻⁴	0,02
Kraftaufnehmer: D 1000 N SN: 042030040 (Messbereich 1000 N) vom 15.04.13							
500	0,999705	2,0·10 ⁻⁵	0,999707	3,3·10 ⁻⁵	2,10·10 ⁻⁶	3,8·10 ⁻⁵	0,05
600	1,199643	2,0·10 ⁻⁵	1,199664	2,5·10 ⁻⁵	1,81·10 ⁻⁵	3,2·10 ⁻⁵	0,56
800	1,599496	2,0·10 ⁻⁵	1,599519	6,7·10 ⁻⁵	1,41·10 ⁻⁵	7,0·10 ⁻⁵	0,20
1000	1,999320	2,0·10 ⁻⁵	1,999304	3,9·10 ⁻⁵	-7,96·10 ⁻⁶	4,4·10 ⁻⁵	0,18
Kraftaufnehmer: D 2000 N SN: 052930064 (Messbereich 2000 N) vom 14.04.13							
1000	1,000484	3,6·10 ⁻⁵	1,000466	5,1·10 ⁻⁵	-1,79·10 ⁻⁵	6,2·10 ⁻⁵	0,20
1500	1,500752	3,5·10 ⁻⁵	1,500728	6,3·10 ⁻⁵	-1,61·10 ⁻⁵	7,2·10 ⁻⁵	0,14
1800	1,800931	3,4·10 ⁻⁵	1,800917	7,0·10 ⁻⁵	-8,10·10 ⁻⁶	7,8·10 ⁻⁵	0,06
2000	2,001058	3,4·10 ⁻⁵	2,001041	7,7·10 ⁻⁵	-8,40·10 ⁻⁶	8,4·10 ⁻⁵	0,06

Tabelle 30: Ergebnisse der PTB als Referenz und des BEV mit bei der 2 kN-Kraftanlage

7.5.2 Vergleich der Ergebnisse

Tabelle 31 und Tabelle 32 geben einen Überblick über die gegenübergestellten relativen Abweichungen der Ergebnisse, realisiert an der Kraftanlage des BEV. Für jede Laststufe sind gegenübergestellt die Ergebnisse der Auswertung der PTB und die Ergebnisse der BEV-Auswertung. Die Zahlen stellen die Abweichungen zum jeweiligen Referenzwert dar, jenem Wert, der aus den Vormessungen mit denselben TransfERNormalen bei denselben Laststufen an der PTB erzielt worden ist. Die farblich dargestellten Ergebnisse in Tabelle 31 und Tabelle 32 visualisieren den Überdeckungsfaktor; Ergebnisse mit einem E_n -Faktor kleiner 1 sind in Grün dargestellt.

Relative Abweichung vom Referenzwert realisiert im BEV bei Laststufen zwischen 5 N und 2 kN																	
realisierte Laststufen [kN]	Druckrichtung														Zug		
	10 N PTB	10 N BEV	50 N PTB	50 N BEV	100 N PTB	100 N BEV	200 N PTB	200 N BEV	500 N PTB	500 N BEV	1000 N PTB	1000 N BEV	2000 N PTB	2000 N BEV	1000 N PTB		
5	4,34·10 ⁻⁵	4,32·10 ⁻⁵															
10	1,43·10 ⁻⁴	5,42·10 ⁻⁵	1,36·10 ⁻⁵	2,06·10 ⁻⁵													
20	Auswertung PTB	Auswertung BEV	2,70·10 ⁻⁵	2,21·10 ⁻⁵													
40			2,17·10 ⁻⁵	1,81·10 ⁻⁵													
50			9,90·10 ⁻⁶	9,44·10 ⁻⁶	9,53·10 ⁻⁶	1,46·10 ⁻⁵											
60			Auswertung PTB	Auswertung BEV	1,15·10 ⁻⁵	1,59·10 ⁻⁵											
80					6,43·10 ⁻⁶	3,58·10 ⁻⁶											
100					4,85·10 ⁻⁶	1,27·10 ⁻⁵	-1,01·10 ⁻⁵	3,51·10 ⁻⁶									
120					Auswertung PTB	Auswertung BEV	-6,07·10 ⁻⁶	1,12·10 ⁻⁵									
160							-7,95·10 ⁻⁶	2,90·10 ⁻⁶									
200							-1,12·10 ⁻⁶	1,26·10 ⁻⁶	-2,37·10 ⁻⁵	-2,10·10 ⁻⁵						-3,85·10 ⁻⁵	
300									-1,14·10 ⁻⁵	-2,05·10 ⁻⁵						-1,98·10 ⁻⁵	
400									-2,83·10 ⁻⁶	1,30·10 ⁻⁵						-3,79·10 ⁻⁵	
500									-1,01·10 ⁻⁵	4,20·10 ⁻⁶	-2,10·10 ⁻⁵	2,10·10 ⁻⁶				-1,02·10 ⁻⁵	
600											2,81·10 ⁻⁶	1,81·10 ⁻⁵				Auswertung BEV	
800									Auswertung PTB	Auswertung BEV	2,40·10 ⁻⁶	1,41·10 ⁻⁵					
1000											-1,26·10 ⁻⁵	-7,96·10 ⁻⁶	-2,73·10 ⁻⁵	-1,79·10 ⁻⁵			
1500											Auswertung PTB	Auswertung BEV	-1,79·10 ⁻⁵	-1,61·10 ⁻⁵			
1800													-1,32·10 ⁻⁵	-8,10·10 ⁻⁶			
2000													-1,19·10 ⁻⁵	-8,40·10 ⁻⁶			
Grün: E_n -Faktor < 1																	
Zugbereich nur ansatzweise untersucht																	
Grenzbereich der Anlage																	

Tabelle 31: Relative Abweichung der Ergebnisse der 2 kN-Totlastanlage des BEV zum Referenzwert der PTB (in Grün mit E_n -Faktor < 1)

Relative Abweichung vom Referenzwert realisiert im BEV bei Laststufen zwischen 2 kN und 250 kN														
realisierte Laststufen [kN]	Druckrichtung													
	5 kN PTB	5 kN BEV	10 kN PTB	10 kN BEV	20 kN PTB	20 kN BEV	50 kN PTB	50 kN BEV	100 kN PTB	100 kN BEV	250 kN PTB	250 kN BEV		
2	2,47·10 ⁻⁵	3,96·10 ⁻⁵												
3	1,94·10 ⁻⁵	2,20·10 ⁻⁵												
4	1,85·10 ⁻⁵	1,74·10 ⁻⁵												
5	1,99·10 ⁻⁵	1,95·10 ⁻⁵	7,71·10 ⁻⁶	1,51·10 ⁻⁵										
6			1,12·10 ⁻⁶	6,18·10 ⁻⁶										
8	Auswertung PTB	Auswertung BEV	3,91·10 ⁻⁶	6,88·10 ⁻⁶										
10			8,60·10 ⁻⁶	1,02·10 ⁻⁵	3,58·10 ⁻⁶	-1,48·10 ⁻⁵								
14					9,29·10 ⁻⁶	1,09·10 ⁻⁵								
16					6,48·10 ⁻⁶	1,28·10 ⁻⁵								
20					1,25·10 ⁻⁵	1,54·10 ⁻⁵	6,08·10 ⁻⁶	-1,15·10 ⁻⁵						
30							5,36·10 ⁻⁶	-3,63·10 ⁻⁶						
40							2,23·10 ⁻⁵	1,76·10 ⁻⁵						
50							2,71·10 ⁻⁶	4,30·10 ⁻⁷	-2,23·10 ⁻⁵	-1,71·10 ⁻⁵				
60									-6,62·10 ⁻⁷	2,76·10 ⁻⁶				
80									8,72·10 ⁻⁶	1,06·10 ⁻⁵				
100									2,54·10 ⁻⁶	3,23·10 ⁻⁶				
200									Auswertung PTB	Auswertung BEV	2,57·10 ⁻⁵	-7,52·10 ⁻⁶		
250											1,36·10 ⁻⁵	2,22·10 ⁻⁶		
											1,05·10 ⁻⁵	5,54·10 ⁻⁶		
Grün: E_n -Faktor < 1														
											Auswertung PTB	Auswertung BEV		

Tabelle 32: Relative Abweichung der Ergebnisse an der 250 kN-Totlastanlage zum PTB Referenzwert; (in Grün mit E_n -Faktor < 1)

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

Tabelle 31 bezieht sich auf die Transfernormale mit Nominalwert 10 N, 50 N, 100 N, 200 N, 500 N, 1000 N und 2000 N gemessen an der 2 kN-Totlastanlage bei Laststufen zwischen 5 N und 2 kN.

Tabelle 32 bezieht sich auf die Transfernormale mit den Nominalwerten 5 kN, 10 kN, 20 kN, 50 kN, 100 kN und 500 kN gemessen an der 250 kN-Totlastanlage bei Laststufen zwischen 2 kN und 250 kN.

Einen Eindruck der Wertigkeit des E_n -Faktors erhält man bei der graphischen Darstellung des Ergebnisses der Vergleichsmessungen. Normiert man die Referenzwerte, werden also die Bezugswerte gemessen an der Referenzkraftanlage relativ betrachtet null gesetzt, lässt sich der Unsicherheitsbereich des Referenzwertes (innerhalb der roten, strichlierten Linien) darstellen. D.h. der Bereich zwischen den rot-strichlierten Linien entspricht dem Unsicherheitsbereich des tatsächlichen, des wahren Wertes. Die vertikalen schwarzen Balken auf jeder Laststufe zeigen die Ausmaße der ermittelten Unsicherheit für jede realisierte Kraft.

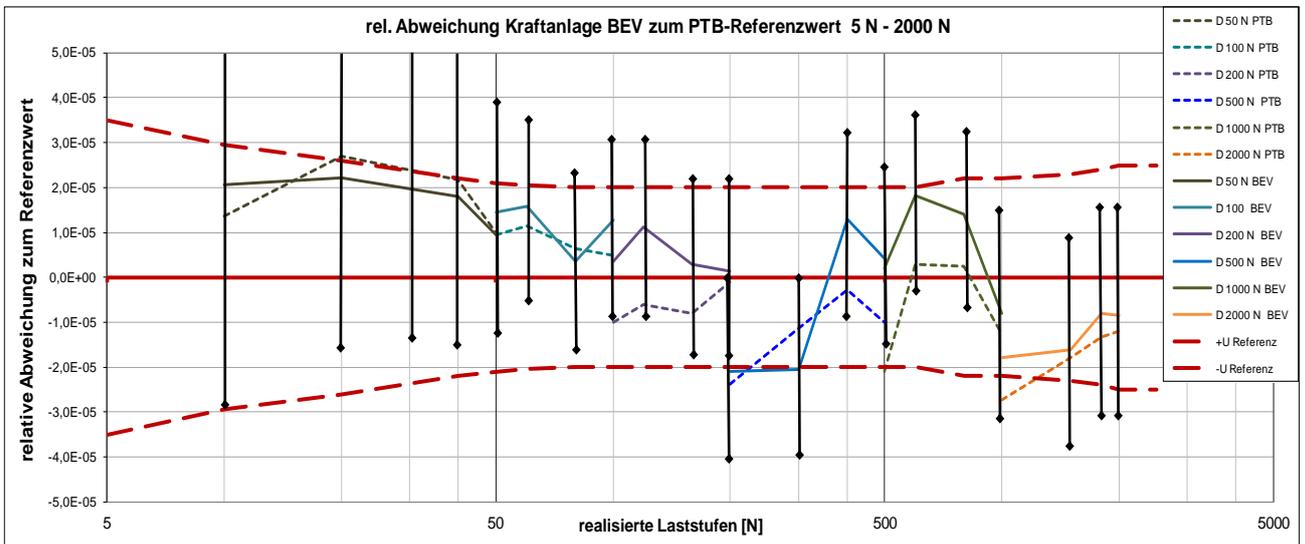


Abbildung 80: Graphische Darstellung der relativen Abweichung zum PTB-Referenzwert der 2 kN-Totlastanlage für jede Laststufe

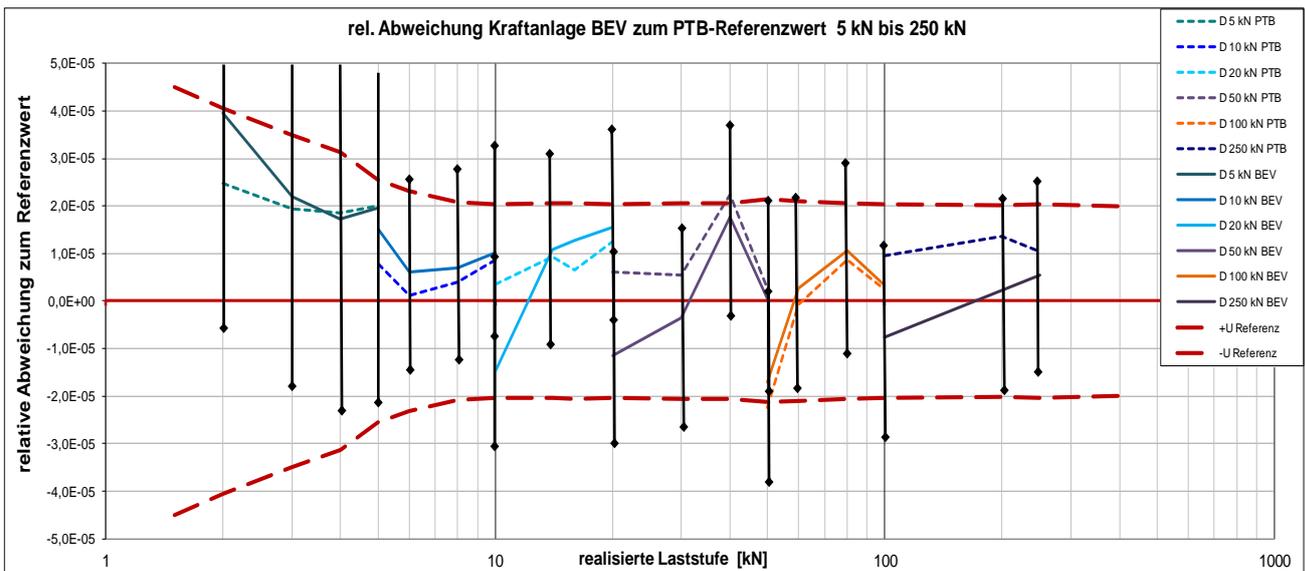


Abbildung 81: Graphische Darstellung der relativen Abweichung zum PTB-Referenzwert der 250 kN-Totlastanlage für jede Laststufe

Validierung der realisierten primären Kraftanlage

Abbildung 80 und Abbildung 81 stellen die relativen Abweichungen der Messwerte der Normalanlage des BEV zu den PTB-Referenzwerten dar. Die Überdeckung der schwarzen Balken mit der Fläche innerhalb der rot-strichlierten Linien visualisiert den E_n -Faktor. Dabei wurden je zwei Messreihen durchgeführt und ausgewertet, wobei in den farbigen durchgezogenen Linien die Ergebnisse der BEV-Auswertung, in den gleichfarbigen strichlierten Linien die PTB-Auswertung dargestellt wird. Abbildung 80 zeigt dabei das Ergebnis an der 2 kN-Normalanlage des BEV im Vergleich zum PTB Referenzwert bei den TransfERNormalen 10 N, 50 N, 100 N, 200 N, 500 N, 1000 N und 2000 N, Abbildung 81 zeigt graphisch die Darstellung der relativen Abweichung zum PTB Referenzwert bei den TransfERNormalen 5 kN, 10 kN, 20 kN, 50 kN, 100 kN und 250 kN. Die geringfügigen Unterschiede in den Ergebnissen der PTB-Auswertung zu den Auswertungen der Messungen des BEV ergeben sich vor allem aus der unterschiedlichen Bewertung und Zuordnung von Korrekturfaktoren.

7.5.3 Schlussfolgerung aus den bilateralen Vergleichsmessungen

Wie Abbildung 80 und Abbildung 81 zu entnehmen ist, zeigen die Abweichungen der Ergebnisse zwischen den an der PTB erzielten Messwerten und den im BEV erzielten Ergebnissen höchste Übereinstimmung. Die Absolutwerte der Abweichungen betragen weniger als $2 \cdot 10^{-5}$. Die E_n -Faktoren im gemessenen Druckbereich sind kleiner als 1 und zeugen somit von einer Überdeckung der Unsicherheitsbereiche. Die im Zugbereich durchgeführten Messungen dienen nur der Funktionsprüfung; aufgrund der unterschiedlichen Einspannungen bis 2 kN ist bei Direktvergleichen die Unsicherheit aus dem Verfahren zu erhöhen.

Somit konnte das EURAMET-Projekt EURAMET.M.F-S2 mit Dezember 2013 mit Erfolg erfolgreich beendet werden. Die Publikation erfolgte im Rahmen des nächsten Treffens des technischen Komitees der EURAMET und des CCM. Dabei wurden die Anforderungen der Vergleichsmessungen, das Prozedere und die Ergebnisse der internationalen Gemeinschaft präsentiert und diskutiert. Aufgrund der Zustimmung erfolgte die Meldung an das BIPB und die Aktualisierung der Datenbank der EURAMET bzw. der BIPM-Key-Comparison-Database.

7.6 Internationale Akzeptanz des QM-Systems und der technischen Verfahren

Im Rahmen des EURAMET Projektes 1283 D-A-Ch, bezüglich gegenseitiger Anerkennung zwischen den Metrologieinstituten der BRD (PTB), Österreichs (BEV) und der Schweiz (Eidgenössische Bundesanstalt für Metrologie, METAS) erfolgte im November 2013 im Fachbereich Kraft eine internationale Begutachtung (Peer-Audit) durch die Fachexperten der Schweiz im BEV. Dabei wurden entsprechend der EN ISO 17025 [3] das Regelwerk und die technischen Anforderungen an Laboratorien sowie deren Kompetenz begutachtet. Bei diesem internationalen Audit wurden die allgemeinen und technischen Verfahren des Kraftnormalensystem offengelegt, analysiert und die Eignung der Kraftnormalanlagen festgestellt. Dabei wurden im Speziellen der Dokumentation der Validierung und somit der Nachweisführung über die Anlageneignung durch die Schweizer Fachexperten das Vertrauen ausgesprochen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Um der Verpflichtung als nationales Metrologieinstitut nachzukommen, für die gesetzlichen Maßeinheiten (entsprechend der SI-Einheiten) den nationalen Etalon der Messnormale bereit zu halten, dessen internationale Vergleichbarkeit und Anerkennung sicherzustellen und die Maßeinheiten durch Kalibrierungen von Bezugs- und Arbeitsnormalen für Wirtschaft und Industrie weiterzugeben, wurde im BEV eine Anlage zur Darstellung der Kraft in direkter Ableitung aus der Masse und der Erdschwere realisiert.

Ausgehend von der Darstellung der Problematik, die sich für das BEV im Fachbereich Kraft gestellt hat, werden zielorientiert allgemeine und spezielle Vorgaben und Rahmenbedingungen zusammenfasst und beschrieben, die für die Schaffung einer primären Kraftnormalanlage als nationales Normal der Kraft zu erfüllen sind. Ein Vergleich der Vorgaben mit bestehenden Anlagen anderer Metrologieinstitute zeigt eine Reihe unvereinbarer Probleme. Zur Lösung der Diskrepanzen wurde zum Teil auf Methoden zurückgegriffen, die verglichen mit bestehenden Realisierungsmöglichkeiten der Kraft Modifikationen enthalten oder einen alternativen Lösungsansatz bieten.

Es erfolgt daraus die Analyse der Vorgaben und die Erstellung eines detaillierten Anforderungskataloges. Führt man die gesetzten Anforderungen überblicksmäßig zusammen, so lassen sich die technischen Forderungen auf folgende Kernaussage reduzieren:

Geforderter Messumfang und verfügbarer Raum:

- Realisierung Kraft bis 5 MN
- primäre Totlastkraftnormalanlage mit einem mechanisch Messbereich: 5 N bis 250 kN
- Richtung der Kraft: Zug und Druck
- geforderte relative Unsicherheit: kleiner $2 \cdot 10^{-5}$
- Implementierung der hydraulischen Anlage für 1MN und 5MN
- verfügbare Grundfläche: 68 m² .

Vergleicht man die gesetzten Anforderungen und die erzielten Ergebnisse, so erhält man folgende Zusammenhänge:

Messumfang und verfügbaren Platz:

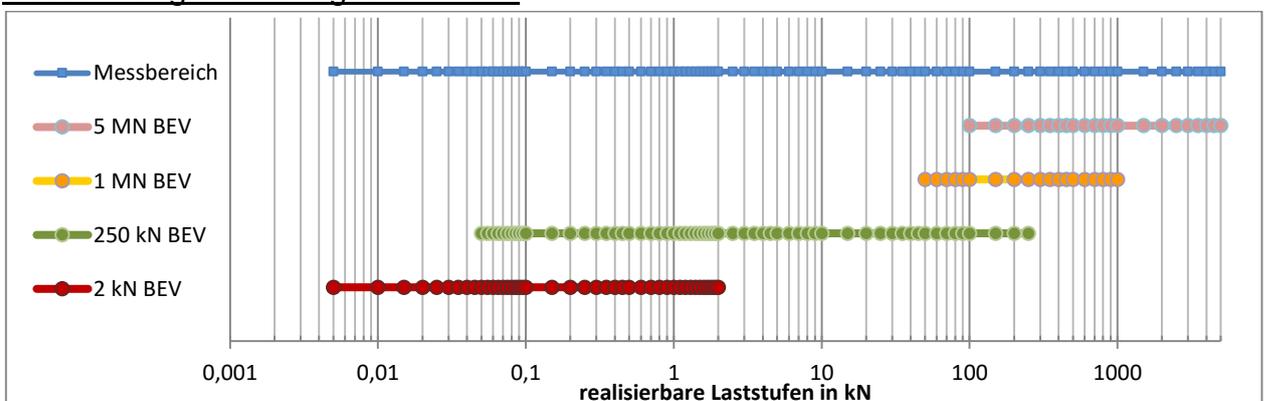


Abbildung 82: Abdeckung des geforderten Messbereiches

Abschließende Betrachtung und Ausblick

Durch die Umsetzung des abgeleiteten Konzepts wurden Bedingungen geschaffen, die nicht nur die Messmöglichkeiten einer primären Kraftnormalanlage wesentlich erweitern, sondern es auch ermöglichen, Einflussfaktoren bzw. Störgrößen bei der Realisierung der Kraft zu eliminieren. Damit ist, bezogen auf die Größe der Anlage, eine beachtenswerte Verbesserung im Messumfang und auch der erreichten Genauigkeit der Messergebnisse erzielt worden. Somit wurden die gestellten Anforderungen erfüllt. Durch eine umfangreiche Dokumentation werden diese entwickelten Erweiterungen und Lösungen beschrieben und messtechnisch belegt (siehe auch Vorstellungen auf der Internationalen Metrologiekonferenz 2012, [34] und [35]).

In Abbildung 82 sind die Überlappungsbereiche der realisierten Kraftnormalanlage über den geforderten Messbereich (in Hellblau) zu entnehmen. Es zeigt sich die Abdeckung des geforderten Messbereiches mit ausreichender Überlappung im mechanischen Bereich (in Rot die 2 kN-Totlastanlage und Grün die 250 kN-Totlastanlage).

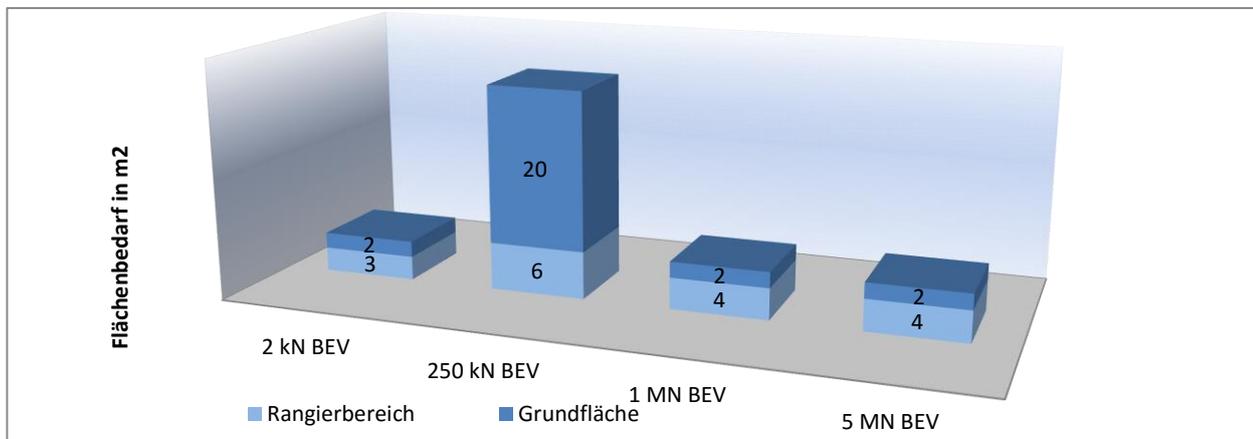


Abbildung 83: Benötigte Fläche der realisierten Anlagen

Betrachtet man die gesetzten Anforderungen bezüglich des Messumfanges und des Platzbedarfes mit der tatsächlich benötigte Grundfläche für die Gesamtanlage von 43 m², stellt man fest dass diese eingehalten werden.

Der umgesetzte Messbereich ist dabei realisiert durch die:

- Totlastkraftanlage bis 2 kN
- Totlastkraftanlage bis 250 kN
- implementierten hydraulischen Kraftanlagen bis 5 MN.

Messgenauigkeit:

Damit aufgrund erzielter Messergebnisse die vom BEV ausgestellten Zertifikate durch die Unterzeichnerstaaten des CIPM-MRA-Abkommens akzeptiert werden, ist eine umfassende Beweisführung zur Prozessfähigkeit der Kraftnormalanlage obligatorisch. Zu dieser Beweisführung wurde methodisch die Verifizierung der realisierten Anlage, deren anschließende Validierung zur Einsatztauglichkeit und die messtechnische Beweisführung der Prozessbeherrschung verfolgt. Es wird detailliert gezeigt, wie bei herkömmlichen und gleichwertigen Anlagen auftretende Störgrößen kompensiert worden sind, sodass man auf die Berücksichtigung dieser Störgrößen, wie sie durch internationale Kalibrierrichtlinien geregelt sind, bei der Auswertung und der dazugehörigen Messunsicherheitsbetrachtung verzichten kann. Mittels zahlreicher Beispiele wurde diese Methodik der Vergleiche offengelegt und veranschaulicht und somit die Nachweisführung erbracht, die in der Metrologie anerkannt ist.

Abschließende Betrachtung und Ausblick

Auf Basis der Auswertung der Vergleichsmessungen kann gezeigt werden, dass für die realisierten Kräfte der primären Kraftnormalanlagen die Angabe der erweiterten relativen Messunsicherheit für:

- die 2 kN-Totlast-Anlage mit: $\leq 2 \cdot 10^{-5}$ und
- für die 250 kN-Totlast-Anlage mit: $\leq 2 \cdot 10^{-5}$

in allen Laststufen gerechtfertigt ist.

Die Beurteilung der Kraftmessgeräte und deren Messergebnisse erfolgen konform Punkt 7.5 EN ISO 376:2011.

Die Klassifizierung der Kraftmessgeräte erfolgt nach den Kriterien aus Punkt 8 der EN ISO 376:2011. Nach der erreichten relativen Messunsicherheit im gesamten Kraftbereich bis 250 kN ist eine Klassifizierung von Kraftnormalen der Klasse 00 möglich.

Anerkennung:

In zwei internationalen Projekten wurden die Ergebnisse der Anlage offengelegt. Dabei wurde durch Transfernormale auf die nationalen Normale der Kraft der PTB zurückgegriffen. Diese Messungen bilden die Grundlage der Validierung dieser Anlage und des gesamten Prozesses zur Realisierung der Kraft im BEV und sind somit die notwendige Beweisführung über die Prozessbeherrschung. Durch Zusammenführung und Interpretation der Messergebnisse wird die Prozessfähigkeit der neuen Anlage belegt und die Erfüllung aller gestellten Anforderungen (vor allem in Bezug auf Messbereichsumfang und die dabei erreichte Messgenauigkeit bzw. Messunsicherheit) nachgewiesen. Kernteil dieser Beweisführung sind die im Rahmen einer wissenschaftlichen Zusammenarbeit mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt-PTB durchgeführten Vergleichsmessungen und den in mehreren Berichten und Präsentationen vor den internationalen Gremien vorgetragenen Ergebnissen. Aufgrund dieser Offenlegung der Nachweisführung vor der internationalen Gemeinschaft der Fachexperten aus dem Fachbereich Kraft, unter anderem durch den Abschlussbericht des Projektes EURAMET.M.F-S2 [53], die Präsentation vor dem EURAMET-TCM meeting 2013 [47] und vor dem EURAMET-TCM meeting 2014 [51], wurde in den folgenden Stellungnahmeverfahren dieser Anlage das Vertrauen ausgesprochen. Somit wurde die Grundlage für die Beantragung auf Eintragung in die CMCs beim BIPM geschaffen. Mit Eintragung in die CMCs werden aufgrund erzielter Messergebnisse die vom BEV ausgestellten Zertifikate in Bezug auf die Messmöglichkeiten durch die Unterzeichnerstaaten des CIPM-MRA-Abkommens akzeptiert.

Die Methodik der Entwicklung dieses Gesamtprojektes und in weiterer Folge die Methode der messtechnischen Beweisführung konnten den benötigten Nachweis über die Fähigkeit dieser neuartigen Anlage erbringen. Durch die in der Fachwelt akzeptierte Beweisführung über die Prozessfähigkeit dieser Anlage konnte die Richtigkeit der Methode zur Validierung dieser Kraftnormalanlage gezeigt werden. Mit der Implementierung der Dokumentation der Kraftnormalanlage in das QM-System des BEV und den veröffentlichten und nachgewiesenen Übereinstimmungen der Messergebnisse aus der internationalen Zusammenarbeit, erfolgte im BEV die Freigabe für die Durchführung von Kalibrierungen im proklamierten und ausgewiesenen Umfang.

Ergänzend zu der Beantragung auf Eintragung in die BIPM-Datenbank werden Präsentationen über die Messmöglichkeiten der Anlage vor allem für Konferenzen und Kongresse wie der IMEKO 2015 vorbereitet. Ebenso werden Vorschläge für

Abschließende Betrachtung und Ausblick

weiterführende Forschungsprojekte im Bereich der Kraftmessung im Rahmen diverser europäischer Forschungsprogramme (EMPIR) für Meetings des technischen Komitees der Masse und verwandte Größen der EURAMET ausgearbeitet.

Zur Aufrechterhaltung der Akzeptanz seitens des CIPM-MRA-Abkommens ist die Zusammenarbeit mit verschiedenen Metrologieinstituten und die Teilnahme an internationalen Vergleichsmessungen im Rahmen von CCM oder EURAMET Projekten notwendig. Darüber hinaus ist diese Zusammenarbeit der laufende Nachweis der Eignung der Anlage und der Grundstock für die Teilnahme an weiteren nationalen und internationalen wissenschaftlichen Projekten im Fachbereich Kraft.

Literaturverzeichnis

- [1] Maß- und Eichgesetz (MEG) BGBl. Nr. 152/1950, idF. BGBl. I Nr. 129/2013
- [2] BIPM, "Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes," Paris; 14 October 1999
- [3] ÖNORM, EN ISO / IEC 17025: Allgemeine Anforderung an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien; 2007
- [4] ÖNORM, EN ISO 376 Metallische Werkstoffe — Kalibrierung der Kraftmessgeräte für die Prüfung von Prüfmaschinen mit einachsiger Beanspruchung; 2011
- [5] Calibration Guide; EURAMET cg-4, Version 2.0; 2011
- [6] Richtlinie DAkkS / DKD-R 3-3; Kalibrierung von Kraftmessgeräten; 2010
- [7] Richtlinie DAkkS / DKD-R 3-9; Kontinuierliche Kalibrierung von Kraftaufnehmern nach dem Vergleichsverfahren; 2010
- [8] OIML R111: International Organization of Legal Metrology: Recommendation R 111 (2004) Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 and M3
- [9] GUM, „Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement“, JCGM 100; 2008
- [10] International Organization for Standardization (ISO), Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement; 1995
- [11] EAL-R2; Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, Richtlinie EAL-European cooperation for Accreditation of Laboratories; 1997
- [12] Internationales Wörterbuch der Metrologie (VIM); Deutsch-Englische Fassung, ISO/IEC Leitfaden 99; 2007
- [13] Schwartz R. in: Kochsiek, M., Gläser, M.: Comprehensive Mass Metrology, Wiley-VCH, , Kap. 3.4, Weinheim; 2000
- [14] Adunka F.: Messunsicherheiten, Theorie und Praxis, 2.Auflage: Vulkan-Verl. Essen; 2000
- [15] Dubois R., Krebs T., Kurz D.: Neues Laboratorium für Kraftmessung; EAM in OFMET Info Vol 5 Nr.3; (EAM vormals METAS, Ch); 1998
- [16] Weiler W., Peters M., Gassmann H., Ackerschott W.: Die 1-MN-Kraft-Normalmesseinrichtung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig; VDI Zeitschrift 120 Nr.1/2; (1978)
- [17] Yon-Kyu P., Min-Seok K., Jong-Ho K., ea: 100 kN Deadweight Force Standard Machine and Evaluation; Journal of Mechanical Science and Technology Vol 20, No 7; 2006
- [18] Franco A., Mendoza J., Torres J.C.: Determination of the Masses Value and Uncertainty for the 150 kN Force National Standard Machine from CENAM, Mexico; Int. Conference IMEKO TC3 T, Taejon Rep. of Korea; 1998
- [19] Ferrero C., Marinari C., Origalia C.: The Dissemination of the Force Unit in Italy; Veröffentlichung CNR-IMGC (INRIM) Italy; 2005
- [20] Schlegel C., Slanina O., Hauke G., Kumme R.: Konstruktion of a Standard Force Machine for the Range of 100 μ N – 20 mN; IMEKO TC3, TC5 and TC22 Conference, Nov 2010, Pattaya, Chonburi, Thailand
- [21] Illeman J., Kumme R.: The achievable uncertainty for balance- based force standard machines in the range from Micronewton to Newton; IMEKO, TC3, TC 16, Merida, Mexico; Int. Conference 2007

Verzeichnis

- [22] Buchner C.: Determination of Micro- Forces from 1 μ N up to 10 N realized with a full automatically Dead Load Machine developed by the BEV; XIX IMEKO World Congress, Fundamental and Applied Metrology, Lisbon, Portugal; 2009
- [23] Kumme R., Illemann J., Nesterov V., Brand U.: Kraftmessung von Mega- bis Nanonewton; PTB Mitteilung 118, Heft 3; 2008
- [24] Knott A.: NPL 1,2 MN Deadweight Force Standard Machine; NPL-Mitteilung; 2006
- [25] Tegtmeier F., Kumme R., Seidl M.: Improvement of Realisation of Forces between 2 MN and 5 MN at PTB- The new 5 MN Force Standard Machine; XIX IMEKO World Congress, Fundamental and Applied Metrology, Lisbon, Portugal; 2009
- [26] Bartel T., Yaniv S., Seifarth R.: Force Measurement Service at NIST, NCSL Symposium and Workshop; 1997
- [27] Buchner C.: Determination of Micro- Forces from 1 μ N up to 10 N expansion of the full automatically Dead Load Machine developed by the BEV; IMEKO Conference, Pattaya, Chonburi, Thailand; 2010
- [28] VDI-Richtlinie VDI/VDE/DKD 2638, Kenngrößen für Kraftaufnehmer- Begriffe und definitionen, Beuth Verlag: Berlin; 2006
- [29] Sawla A.: Kraftsskala, Messen von Kräften – praktische Physik, Band 1, 24. Aufl., Teubner Verlag, S.133-137; 1996
- [30] Peters M., Sawla A., Peschel D.: Uncertainty in force measurement; Report of the CCM Working Group Force; PTB Bericht MA-17, 1990
- [31] Shainin D.: (contributing editor), Manufacturing, Planning, and Estimating Handbook, McGraw-Hill Book Company, New York; 1963,
- [32] Davis R.: Equation for the Determination of the Density of Moist Air (1981/91), Metrologia; 1992
- [33] Picard A., Davis R., Gläser M., Fujii K.: Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007), Metrologia; 2008
- [34] Buchner C., Mikats T., Bleicher F.: Determination of Forces from 10 N up to 250 kN using two full automatical Dead Weight Machines developed by the BEV; IMEKO Conference, 21st Conference on Measurement of Force, Mass and Torque, Bexco, Busan, Republic of Korea; 2012
- [35] Buchner C.: Determination of Forces from 5 N up to 250 kN using two full automatically Dead Weight Machines developed by the BEV; EURAMET TCM meeting, Cavtat/Dubrovnik, Kroatien; März 2013
- [36] Mikats T.: Dissertation: Methodische Optimierung von Normal-Kraftmaschinen zur Realisierung der Kraft; Institut für Fertigungstechnik TU Wien; 2013
- [37] Mikats T.: Posterpräsentation, Force Projekts at BEV; EURAMET meeting TC-M, März 2012
- [38] Binder C.: Einflussfaktoren auf die Messung von Kräften, Okt. 2012; IFT, TU- Wien
- [39] Schwartz R.: Guide to mass determination with high accuracy, PTB-MA-40, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig; 1995
- [40] Buchner C.: Darstellung der Dichte von Festkörpern mit vollautomatischen Fundamentalapparaturen auf Basis der hydrostatischen Wägung, Thesis Internationaler Wirtschaftsingenieur, Technikum Wien; Juni 2007
- [41] Lindau A., Kumme R., Heiker A.: Investigation in the local gravity field of the force laboratory of PTB; IMEKO Conference TC3, TC5, TC20, Celle, BRD; 2002

Verzeichnis

- [42] Peters M.: Influence of the uncertainty of force standard machines with hydraulic multiplication; IMEKO TC3 Conference on force and mass measurement; Helsinki, Finland;1993
- [43] Verfahrensweisung des BEV VL511401 Hierarchieschema Schwere, Version 01; BEV Internes Dokument; Freigabe 2003
- [44] Sawla A., Peters M.: EC – Intercomparison of Force Transducer Calibration. Brussels, Commission of the European Communities, Bureau of Reference, EUR 11324 EN; 1987
- [45] Sawla A., Peters M.: WECC Inter-laboratory Comparison F2 Force Transducer Calibration. Braunschweig, PTB-Bericht PTB-MA-28; 1993.
- [46] Ferrero C., Marinari C., Kumme R., Herte W.: PTB and INRIM high force intercomparison up to 9 MN; IMEKO XVIII World Congress Rio de Janeiro, Brazil; 2006
- [47] Frank S., Kumme R., Bülent A., Ercan P., Glöckner B., Hauke G.: Intercomparison of 3 MN hydraulic build-up and 1.1 MN lever amplification force standard machine between UME and PTB; IMEKO XVIII World Congress Rio de Janeiro, Brazil; 2006
- [48] REFA, Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.; Methodenlehre des Arbeitsstudiums, Teil 2, Datenermittlung; Carl Hanser Verlag; 1978
- [49] Knott A., Abu-Elezz A.: Comparison of Force Standards between NIS (Egypt) and NPL (United Kingdom); IMEKO XVIII World Congress Rio de Janeiro, Brazil; 2006
- [50] Kumme R., Brito, L.: Investigation of the Measurement Uncertainty of Force Standard Machines of IPQ by intercomparison Measurement with PTB; IMEKO TC3, Istanbul, Turkey; 2001
- [51] Buchner C.: Determination of Forces from 50 N up to 250 kN using a full automatically Dead Weight Machines; Bilateral EURAMET supplementary comparison, KCDB EURAMET.M.F-S2;, EURAMET TCM meeting, Cavtat/Dubrovnik, Kroatien; März 2013
- [52] Buchner C.: Determination of Forces from 10 N up to 250 kN using two full automatically Dead Weight Machines; Bilateral EURAMET supplementary comparison, KCDB EURAMET.M.F-S2; 11., EURAMET TCM meeting, Brno, Czech Rep.; April 2014
- [53] Veröffentlichung der EURAMET Data base /BIPM-KCDB unter: EURAMET.M.F-S2:http://www.euramet.org/index.php?id=tc-projects&no_cache=1&tx_nneuramet_ctcp_projects; 2014

Internetquellen

BEV	http://www.bev.gv.at
BIPM	http://www.bipm.org/en/bipm/
CCM	http://www.bipm.org/en/committees/cc/ccm/
CIPM	http://www.bipm.org/en/committees/cipm/
CIPM-MRA	http://www.bipm.org/en/cipm-mra/
CMCs	http://kcdb.bipm.org/appendixC/
EURAMET	http://www.euramet.org
GUM	http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html
ISO	http://www.iso.org/iso/home.html
KCDB	http://kcdb.bipm.org/
PTB	http://www.bev.gv.at
SI	http://www.bipm.org/en/si/
TCM	http://www.euramet.org/index.php?id=tc-m
VIM	http://www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html
IMEKO	http://www.imeko.org/

9 Anhang

9.1 Unsicherheitsfaktoren von Kraftaufnehmern zu 3.6.5

Die kombinierte Standardabweichung und die erweiterte Messunsicherheit wird entweder in Einheiten der Kraft (für u_c und U) oder als Relativwerte (w_c und W) angegeben.

Nach EN ISO 376:2011 [3] ist:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^8 u_i^2} \quad \text{und} \quad U = k \cdot u_c$$

Daraus lässt sich der Wert W der erweiterten relativen Unsicherheit berechnen.

$$W = \frac{U}{F}$$

Dabei ist

- u_1 die mit der eingeleiteten Kalibrierkraft verbundene Standardunsicherheit
- u_2 die mit der erweiterten Vergleichspräzision der Kalibrierergebnisse verbundene Standardunsicherheit
- u_3 die mit der Wiederholpräzision der Kalibrierergebnisse verbundene Standardunsicherheit
- u_4 die mit der Auflösung der Anzeige verbundene Standardunsicherheit
- u_5 die mit dem Kriechverhalten des Messgeräts verbundene Standardunsicherheit
- u_6 die mit der Drift des Nullwerts verbundene Standardunsicherheit
- u_7 die mit der Temperatur des Messgeräts verbundene Standardunsicherheit
- u_8 die mit der Interpolation verbundene Standardunsicherheit

Die einzelnen Komponenten für Kraftaufnehmer selbst, sind nach Anhang C (informativ) der EN ISO 376:2011 [3]:

Berechnung der Unsicherheit der Kalibrierkraft, u_1 und w_1

u_1 ist die Standardunsicherheit, die mit den von der Kalibriereinrichtung eingeleiteten Kalibrierkräften verbunden ist und in Einheiten der Kraft angegeben wird, während w_1 der entsprechende Relativwert ist.

Berechnung der Unsicherheit der erweiterten Vergleichspräzision u_2 und w_2

u_2 ist die Standardunsicherheit, die mit den, während der Kalibrierung erhaltenen mittleren Verformungsmesswerten bei zunehmender Kraft verbunden (Reihe 1, 3 und 5) ist und in Einheiten der Kraft angegeben wird; w_2 ist der entsprechende Relativwert. Es gilt:

$$u_2 = \left| \frac{F_N}{X_N} \right| \cdot \sqrt{\frac{1}{6} \cdot \sum_{i=1,3,5} (X_i - \bar{X}_r)^2} \quad \text{und} \quad w_2 = \left| \frac{1}{\bar{X}_r} \right| \cdot \sqrt{\frac{1}{6} \cdot \sum_{i=1,3,5} (X_i - \bar{X}_r)^2}$$

mit F_N in N als Höchstkraft der Kalibrierung; X_N , Verformungsmesswert entsprechend der Höchstkraft der Kalibrierung; X , dem Verformungsmesswert bei zunehmender Prüfkraft; \bar{X}_r , Mittelwert des Verformungsmesswertes in verschiedenen Einbau-stellungen und X_i , die in den inkrementellen Reihen 1, 3 und 5 erhaltenen Verformungsmesswerte.

Berechnung der Unsicherheit der Wiederholpräzision u_3 und w_3

u_3 ist der Unsicherheitsbeitrag infolge der Wiederholpräzision des gemessenen Verformungswerts, angegeben in Einheiten der Kraft. w_3 ist der entsprechende Relativwert. Für jede Kraft F kann von folgender Annahme ausgegangen werden:

Anhang

$$u_3 = \frac{b' \cdot F}{100 \cdot \sqrt{3}} \quad \text{und} \quad w_3 = \frac{b'}{100 \cdot \sqrt{3}}$$

Dabei ist b' die relative Wiederholpräzision wie definiert:

$$b' = \left| \frac{X_2 - X_1}{\bar{X}_{wr}} \right| \cdot 100$$

mit X : dem Verformungsmesswert bei zunehmender Prüfkraft und \bar{X}_{wr} : dem Mittelwert des Verformungsmesswertes in gleicher Einbaustellung.

$$\bar{X}_{wr} = \frac{X_1 + X_2}{2}$$

Berechnung der Unsicherheit der Auflösung u_4 und w_4

Jeder Verformungswert wird aus zwei Ablesewerten berechnet (als Ergebnis des Ablesewerts bei wirkender Kraft minus des Ablesewerts im unbelasteten Zustand). Infolgedessen muss die Auflösung der Anzeige zweifach in Form zweier Rechteckverteilungen mit jeweils einer Standardunsicherheit von $r / (2\sqrt{3})$ einbezogen werden, wobei r die in Einheiten der Kraft angegebene Auflösung ist:

$$u_4 = \frac{r}{\sqrt{6}} \quad \text{und} \quad w_4 = \frac{r}{F \cdot \sqrt{6}}$$

Berechnung der Unsicherheit des Kriechverhaltens u_5 und w_5

Diese Unsicherheitskomponente ist durch die Tatsache bedingt, dass der bei einer gegebenen Kraft gemessene Verformungswert durch den Verlauf der vorausgegangenen Kurzzeitbelastungen beeinflusst werden kann. Ein Maß für diesen Einfluss ist die Änderung des Ausgabewerts des Kraftaufnehmers im Zeitraum von 30 s bis 300 s nach Aufbringung oder Wegnahme der Höchstkraft für die Kalibrierung. Diese Wirkung ist in der Vergleichspräzision nicht enthalten, weil in der Regel für alle Messreihen dieselbe Kalibriereinrichtung verwendet wird und das zeitliche Belastungsverfahren das gleiche ist. Diese Wirkung, mit der relativen Kriechabweichung c in %, lässt sich folgendermaßen abschätzen:

$$u_5 = \frac{c \cdot F}{100 \cdot \sqrt{3}} \quad \text{und} \quad w_5 = \frac{c}{100 \cdot \sqrt{3}}$$

Falls keine Kriechmessung durchgeführt wird, kann die Unsicherheit des Kriechverhaltens durch Teilung der Hysterese durch einen Faktor 3 abgeschätzt werden. Daher kann die folgende Gleichung genutzt werden, um die Unsicherheit für zunehmende Kräfte zu bestimmen:

$$u_5 = \frac{v \cdot F}{100 \cdot 3\sqrt{3}} \quad \text{und} \quad w_5 = \frac{v}{100 \cdot 3\sqrt{3}}$$

V ist dabei die relative Umkehrspanne des Kraftmessgerätes in %.

Berechnung der Unsicherheit der Nullpunktdrift u_6 und w_6

Diese Unsicherheitskomponente ist durch die Tatsache bedingt, dass der Nullpunktausgabewert des Messgeräts von Messreihe zu Messreihe schwanken kann und die gemessenen Verformungswerte von der Zeit abhängig sein können, die das Messgerät zwischen den Messreihen auf null gestanden ist. Diese Drift ist in der Vergleichspräzision nicht enthalten, weil dieses Intervall in der Regel für alle Messreihen gleich lang ist. Ein Maß für diese Schwankung ist die Nullpunktabweichung f_0 (f_0 in %:

Anhang

Relative Nullpunktabweichung), sodass diese Wirkung wie folgt abgeschätzt werden kann:

$$u_6 = \frac{f_0 \cdot F}{100} \quad \text{und} \quad w_6 = \frac{f_0}{100}$$

Berechnung der Temperaturunsicherheit u_7 und w_7

Hierbei handelt es sich um den durch Temperaturschwankungen im Verlauf der Kalibrierung und durch die Messunsicherheit der Kalibriertemperatur bedingten Unsicherheitsbeitrag. Die Empfindlichkeit des Messgeräts in Bezug auf die Temperatur muss entweder durch Prüfungen bestimmt, aus den Herstellerspezifikationen entnommen oder aber theoretisch oder anhand von Erfahrungen ermittelt werden. Bei Angabe dieser Komponente in Einheiten der Kraft oder als Relativwert ergibt sich mit K der Temperaturkoeffizient des Messgeräts in $1 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ und ΔT der Bereich der Kalibriertemperatur unter Berücksichtigung der Messunsicherheit der Temperatur:

$$u_7 = \frac{K \cdot \Delta T}{2} \cdot \frac{F}{\sqrt{3}} \quad \text{und} \quad w_7 = \frac{K \cdot \Delta T}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$$

Berechnung der Interpolationsunsicherheit u_8 und w_8

Diese Komponente wird bei der Berechnung der Kalibrierunsicherheit für Messgeräte, die nur für bestimmte Kräfte klassifiziert sind, nicht berücksichtigt.

Es handelt sich dabei um den Beitrag der in der graphischen Darstellung eingetragenen Kraftverformungswerte, die außerhalb des Bereichs der Kurvenanpassung liegen und zu einer Unsicherheit in der Interpolationsgleichung führen. Zur Berechnung dieses Beitrags darf eines der beiden folgenden Verfahren herangezogen werden:

- Residuum-Verfahren

Die Komponente kann mit Hilfe von Theorien der Statistik abgeschätzt werden. Ausgehend von der Annahme, dass die Kalibrierkräfte gleich verteilt sind, lässt sie sich zu den folgenden Gleichungen vereinfachen:

$$u_2 = \frac{F_N}{X_N} \cdot \sqrt{\frac{\delta_r}{n-d-1}} \quad \text{und} \quad w_2 = \frac{F_N}{F \cdot X_N} \cdot \sqrt{\frac{\delta_r}{n-d-1}}$$

Dabei ist δ_r die Summe der quadratischen Abweichungen zwischen der mittleren Verformung und dem mit Hilfe der Interpolationsgleichung berechneten Wert, n die Anzahl der Kraftkalibrierstufen und d der Grad der Interpolationsgleichung.

- Abweichungsverfahren

Die Komponente ist die Differenz zwischen der mittleren gemessenen Verformung und dem mit Hilfe der Interpolationsgleichung berechneten Wert:

$$u_2 = \left| \frac{\bar{X}_r - X_a}{\bar{X}_r} \right| \cdot F \quad \text{oder} \quad w_2 = \left| \frac{\bar{X}_r - X_a}{\bar{X}_r} \right|$$

9.2 Anforderungen an die österreichische Kraftnormalanlage

Im Folgenden werden die prägnantesten Anforderungen an eine Kraftanlage zusammengefasst, die aufgrund der Rahmenbedingungen im BEV abgeleitet worden sind. Darauf basierend wurde 2009 ein Anforderungskatalog für die Konstruktion erstellt. Im Text genannte Grenzwerte ergeben sich entweder aus normativen oder konstruktionsbedingten Vorgabewerten oder sie basieren auf Erfahrungswerten aus dem Vergleich mit ähnlichen Lösungen.

9.2.1 Anforderungen an die Konstruktion

Es erfolgen eine Ausarbeitung der Anforderungen aus messtechnischer und konstruktiver Sicht sowie eine Formulierung von Anforderungen aus Vorgaben unter der Berücksichtigung von Erfahrungswerten aus der Arbeit mit anderen Kraftmaschinen. Weiters mussten Vorgaben aus Fakten (zum Beispiel bestehenden Komponenten wie vorhandene Kraftsensoren) berücksichtigt werden.

(Im Aufgeschlüsselten wird auf die hydraulischen Applikationen nur mehr untergeordnet eingegangen, da sie nicht Gegenstand dieser Arbeit sind.)

➤ **Arbeitsraum**

Die Festlegung des Mindestarbeitsraums erfolgt aus Überlegungen der Abmaße möglicher Kraftaufnehmer inklusive deren Einspannteilen sowie notwendigem Manipulationsspielraum:

- Der Durchmesser der Auflagefläche für Druckkraftaufnehmer im Bereich bis 5 kN muss mindestens 350 mm betragen (ohne seitliche Einschränkungen).
- Der Durchmesser der Auflagefläche für die Druckkraftaufnehmer im Bereich bis 250 kN muss mindestens 800 mm betragen (ohne seitliche Einschränkungen).
- Die Einbauhöhe für die Zug-Kraftaufnehmer im Bereich bis 5 kN muss mindestens 500 mm betragen.
- Die Einbauhöhe für die Zug-Kraftaufnehmer im Bereich bis 250 kN muss mindestens 1000 mm betragen

➤ **Trägerkonstruktion**

• *Aufstellung*

Die Aufstellung erfolgt auf einem bauseitigen, zentralen Stahlrahmen in der Bodenplatte mit einer zentralen Öffnung von 2000 mm × 2000 mm und einer seitlichen Auflagefläche von 350 mm Breite.

• *Durchbiegung*

Die Durchbiegung von Bauteilen unter alternierender Last ist zulässig, falls nicht die Parallelität und Ebenheit der Druckplatten eine Form annehmen, die die Zentrität der Krafteinleitung beeinflusst.

• *Steifigkeit*

Die Steifigkeit der Trägerkonstruktion muss derart ausgeführt sein, dass die Verformung bei der Realisierung der Kraft im Messbereich 5 N bis 250 kN eine relative erweiterte Messunsicherheit von maximal $2 \cdot 10^{-5}$ zulässt.

Ein akzeptierbarer Erfahrungswert als Grenze für eine kritische Abweichung der Masseschwerpunkte vom Lot bei unterschiedlicher Belastung (bis Maximallast) ist 0,5 mm.

• *Verformung durch Kräfte*

Die Verformung von Bauteilen unter alternierender Last ist zulässig, sofern nicht die

Anhang

Parallelität und Ebenheit der Druckplatten einen bei der Tolerierung unzulässigen Wert annimmt. Auf Beibehaltung der Zentralachse ist zu achten. Als Erfahrungswert wird hier eine maximale Abweichung der Masseschwerpunkte vom Lot bei unterschiedlicher Belastung (bis Maximallast) größer 0,5 mm gesehen.

- *Schwingungsdämpfung*

Ein Schwingen der Massestapel (ausgelöst durch die Manipulation der Massescheiben oder angeregt durch die Erdrotation: Foucault'sches Pendel, ...) ist konstruktiv zu verhindern.

- *Verformung durch Temperaturänderung*

Konstruktiv ist auf gleichmäßige thermische Ausdehnung zu achten. Die Verformung von Bauteilen ist zulässig, sofern nicht die Parallelität und Ebenheit der Druckplatten einen bei der Tolerierung unzulässigen Wert annimmt. Auf Beibehaltung der Zentralachse ist zu achten. Eine kritische Abweichung der Masseschwerpunkte vom Lot bei unterschiedlicher Belastung (bis Maximallast) um mehr als 0,5 mm ist unzulässig.

Unzulässig ist jede Art der Verformung, die eine Erhöhung der Gesamtmessunsicherheit (bei $k=2$) der Anlage auf mehr als $2 \cdot 10^{-5}$ verursacht. Als kritischer Wert wird erfahrungsgemäß $0,3^\circ\text{C}$ gesehen.

- *Wärmeabfuhr*

Die Konstruktion muss so ausgelegt sein, dass die Abwärme von Wärme erzeugenden Komponenten so abgeführt wird, dass eine Beeinträchtigung durch Temperaturunterschiede der Trägerkonstruktion keinen unzulässigen Wert annimmt.

Wärmeabgebende Komponenten mit einer Heizleistung von mehr als 500 W sind soweit wie möglich separat unterzubringen, geeignet zu isolieren (z.B. Schrank) und die Wärme ist gegebenenfalls (bauseits) abzuführen (Vorgabe Klimatechnik).

➤ **Dimensionierung der Trägerkonstruktion für Gewichte (Gehänge)**

- *Wahl des Hubes*

Der Arbeitshub der Gewichte während der Manipulation ist zu minimieren. Ebenso sind in Anbetracht der Zykluszeit alle Leerwege zu minimieren.

- *Messbereichsumfang*

Die Anlage muss konstruktiv so ausgeführt sein, dass eine Verwendung der Totlasteinrichtung auf einen Endwert von 250 kN möglich ist.

- *Dimensionierung der Gewichtsaufnahmekonstruktion*

Eine Auslegung der Gewichtsgehängekonstruktion auf 250 kN Maximallast plus Sicherheitszuschlag ist vorzusehen, die bei Bruch des Kraftsensors oder von Einspannteilen bei Vollast und einem Abfallen der Massescheiben aus Hub_{max} eine Beschädigung des Gehänges oder der im Gehänge aufgelegten Massescheiben verhindert.

- *Leergewichtskompensation der Gewichtsaufnahme*

Bei herkömmlichen Totlastkraftanlagen entspricht das Eigengewicht des Gehänges in der Regel der ersten, minimalen Laststufe. Bei der Konstruktion ist eine Kompensation des Eigengewichtes des Gehänges so vorzusehen, dass die erzeugte Gegenkraft eine Realisierung der Kraft nur in dem Ausmaß beeinflusst, dass die Gesamtunsicherheit gewährleistet ist. In die Praxis umgesetzt bedeutet das, dass die Größe der zu realisierenden Kraft unabhängig von der Größe des Eigengewichts der Gewichtsaufnahme sein muss.

Anhang

- *Messbereichsumfang*

TransfERNORMALE namhafter Hersteller haben etwa folgende Nominalwerte an Maximallasten: 10 N, 50 N, 100 N, 200 N, 500 N, 1 kN, 2 kN, 5 kN, 10 kN, 20 kN, 50 kN, 100 kN, 200 kN, 250 kN,...

Eine ISO-konforme Kalibrierung dieser Kraftaufnehmer ist verbindlich vorgeschrieben. Sonderformen sind zulässig.

- *Wahl des Kraftbereiches*

Aufgrund des zur Verfügung stehenden Platzes ist eine Lösung mit zwei Massestapeln vorzuziehen. Bei der Teilung des Kraftbereiches ist eine Überlappung der realisierbaren Laststufen von mindestens 20 Laststufen zu berücksichtigen. Unter Berücksichtigung der Dimensionierung der Lastgehänge und der Anzahl der zur Verfügung stehenden Kraftsensoren erscheint eine Teilung der Lastbereiche bei 2 kN sinnvoll. Somit ist der Lastbereich von 100 N bis 2000 N jeweils von zwei Maschinen abgedeckt.

➤ **Krafteinleitung und Kraftschluss zwischen Kraftaufnehmer und Maschine**

Grundsätzlich hat die Kraftübertragung über zwei parallele Druckplatten beziehungsweise Platten mit zentrischer Aufnahme zu erfolgen. Momenten- und querkräftefreie Klemmvorrichtungen sind zulässig.

- *Einspannung der Kraftnormale*

Die Einspannvorrichtung ist so auszuführen, dass eine Kalibrierung nach ISO 376 möglich ist.

Die Einspannvorrichtung wird so ausgeführt, dass eine manuelle oder halbautomatische Verdrehung (90° oder 120°) der zu kalibrierenden Kraftmessgeräte (Kraftaufnehmer) möglich ist, ohne dass Querkräfte oder Drehmomente eingebracht werden, wonach eine relative Gesamtmessunsicherheit (bei $k=2$) der Anlage (alle Messunsicherheitskomponenten) von weniger als $2 \cdot 10^{-5}$ überschritten wird.

Im unteren Messbereich von 5 N bis 2 kN (bis 10 kN) wird die Konstruktion derart ausgeführt, dass mit einer einzigen Aufspannung (ohne Umspannung des TransfERNORMALS) sowohl im Zug- als auch Druckbereich gemessen werden können (kontinuierliche Messung über den Nullpunkt). Eine derartige Einspannung der Kraftaufnehmer wurde bisher noch nicht realisiert, soll aber die Möglichkeit geben, Messungen zwischen Zug- und Druckbereich um den Nullpunkt durchzuführen, ohne an der Einspannung Änderungen vornehmen zu müssen.

- *nicht planparallele Auflageflächen*

Bei allen Auflageflächen ist die erlaubte Toleranz:

auf Ebenheit: maximale Abweichung 0,05 mm auf der gesamten Platte

auf Parallelität: 0,01mm auf 100 mm

In der Praxis wird als Übergangselement zum Kraftmessgerät ein Druckstück belastet, das ebene, konvexe oder konkave Flächen hat und mit der Grundplatte des Kraftmessgerätes in Kontakt steht. Die konkaven und konvexen Flächen gelten als Ausgleich von Ebenheitsabweichungen und von Härteschwankungen.

Als zweckmäßig hat sich für diese Zusatzdruckstücke aus Stahl eine Härte zwischen 400 HV 30 und 650 HV 30 ergeben. Konvexität und Konkavität der Flächen betragen $1,0 \pm 0,1$ von 1000 des Radius [(0,1 \pm 0,01) % des Radius] [3].

- *Momentbeaufschlagung*

Führungen, Flächen und Bewegungen sind so auszuführen, dass unter Belastung kein Verzug in Form einer Dreh- oder Kippbewegung auftritt. Infolgedessen soll das Auftreten

Anhang

von Drehmomenten in der Anlage oder im TransfERNormal vermieden werden. Querkräfte durch Drehmomente dürfen eine relative erweiterte Gesamtmessunsicherheit (bei $k=2$) der Anlage (alle Messunsicherheitskomponenten) von weniger als $2 \cdot 10^{-5}$ nicht übersteigen.

- *Exzentrizität der Krafteinbringung*

Die Anlage muss eine einfache Zentrierung der Kraftaufnehmer bei der Einspannung zulassen, die eine Krafteinleitung in der Symmetrieachse des Kraftnormals und der Kraftnormalanlage ermöglicht. Die Anlage hat eine Zentriereinrichtung, mit deren Hilfe es möglich ist, die Kraftaufnehmer rasch und ohne weitere Hilfsmittel zentrisch in die Anlage einzuspannen, ohne dass Querkräfte oder Drehmomente eingebracht werden, die eine relative Gesamtmessunsicherheit (bei $k=2$) der Anlage von mehr als $2 \cdot 10^{-5}$ übersteigen.

- *ungleichmäßige Belastung*

Alle Belastungen eines TransfERNormals sind so zu verteilen, dass sie symmetrisch zur Kraftachse erfolgen. Ungleichmäßige, asymmetrische Krafteinleitungen sind in Bezug auf Einleitung unzulässiger Momente auszuschließen.

- *Verformung*

Auftretende Verformungen im Kraftsensor sind konstruktiv so zu berücksichtigen, dass eine Abweichung der Krafteinleitung von der Symmetrieachse des Kraftnormals und der Kraftnormalanlage nicht auftreten kann, die eine erweiterte relative Gesamtmessunsicherheit der Anlage von mehr als $2 \cdot 10^{-5}$ übersteigt.

- *Querhaupt*

Die Bewegung der Querhäupter muss so steuerbar sein, dass Vorschubgeschwindigkeiten zwischen 2 mm/min und 50 mm/min (Schnellvorschub) möglich sind. Dabei sind kontinuierlicher Vorschub und Stepmodus erforderlich.

Je nach Programmablauf ist die freie Wahl der Vorschubgeschwindigkeiten der Querhäupter vorzusehen.

➤ **Krafthaltung**

- *Koppelemente*

Die Kraft, die über die Krafthaltung erzeugt wird, ist zentrisch in den Kraftaufnehmer einzuleiten.

➤ **Gewichte**

- *Ansteuerung der Gewichte*

Gefordert ist eine Einzelaufhängung der Massen bzw. der Massestapel; jede Massescheibe bzw. jeder Massestapel muss sich separat ansteuern lassen bzw. muss unabhängig von anderen Massen aufgelegt oder abgehoben werden können.

- *Auswahl der Gewichte*

Die Anlage darf maximal über zwei Gewichtstapel verfügen, wobei der eine Laststapel einen Messbereich von mindestens 5 N bis maximal 2 kN, der andere Laststapel einen Bereich von 50 N bis 100 kN abdecken muss.

Der Gewichtstapel für den kleineren Kraftbereich (5 N bis 2 kN) muss über Massescheiben verfügen, die jeweils Kraftschritte von max. 5 N zulassen.

Der Gewichtstapel für den großen Kraftbereich (50 N bis 250 kN) muss über Massescheiben verfügen, die jeweils Kraftschritte von max. 200 N über den gesamten Bereich zulassen, d.h. Werte wie folgt: 50 N, 100 N, 150 N, 200 N, 250 N, bis... 99850 N, 99900 N, 99950 N, 100000 N, bis 249950 N, 250000 N.

Anhang

Der Nennwert der größten Einzelmasse darf maximal 510 kg betragen. Für den Aufbau können einzelne Massen zu Massegruppen zusammengefasst sein und auf einmal aufgelegt werden. Die Abstufung muss aber so ausgeführt werden, dass kontinuierlich alle Werte mit einer Laststufenänderung von 50 N gebildet werden können.

Folgende Laststufen sind erforderlich: Scheiben für großen Gewichtstapel mit: 50 N; 100 N; 200 N; 200 N; 500 N; 1000 N; 2000 N; 2000 N; 5000 N; 5000 N; 5000 N; 2 Stk. je 5000 N zu 10 kN zusammengefasst; 4 Stk. je 5000 N zu 20 kN zusammengefasst; 4 Stk. je 5000 N zu 20 kN zusammengefasst.

- *Einzelaufnahme und Einzelansteuerung*

Die Anlage hat über eine Einrichtung zu verfügen, die es ermöglicht, eine in den Auflagen der Aufnahmen nicht exakt oder gar nicht aufliegende Massescheibe zu erkennen. Eine Überwachungseinrichtung die detektiert, ob eine Massescheibe angehoben ist und sich auf dem Stapel befindet oder sich auf den Aufnahmen des Magazins befindet. D.h. eine Sensorik für jede Scheibe ist zu verwenden, die Auskunft über deren Position gibt.

- *Zentrierung (zentrische Krafteinleitung in Trägerkonstruktion)*

In der Halterung der Massescheiben, sowohl bei den Gewichtsauflagen der Magazine als auch bei den Gewichtsauflagen im Gehänge, sind Lösungen zu realisieren, die eine Justierbarkeit zulassen (justierbare Aufhängung der Massescheiben in Bezug auf deren Zentrizität).

Im Weiteren ist die Aufhängeeinrichtung des Massestapels so auszuführen, dass sich die einzelnen Massescheiben selbst zueinander positionieren und zentrieren. Die Scheiben müssen zueinander parallel sein.

Ebenso ist eine Justagemöglichkeit der Massescheiben in der Aufhängung (Neigung und Zentrizität) vorzusehen.

- *Justierbarkeit*

Um eine Versetzung des Masseschwerpunktes während des Gewichtwechsels von der vertikalen Achse zu vermeiden, sind zusätzliche (zu der in der OIML R111:2004 geforderten Justierkammer) Justagemöglichkeiten der Gewichtsscheiben in Bezug auf den Masseschwerpunkt jeder Massescheibe (Zentrizität) zu schaffen (mindestens 3 Justierkammern).

➤ **Steuerungstechnische Einrichtungen**

Die Anlage muss über eine Antastvorrichtung zwischen Druckplatte der Maschine und dem eingespannten Kraftaufnehmer verfügen. Die Antastung hat automatisch zu erfolgen.

- *Korrektur der Verformung*

Systematisch auftretende, für die Messergebnisse relevante Verformungen jeder Art sind zu erfassen, zu dokumentieren und mechanisch zu korrigieren bzw. zu kompensieren.

- *Schwingungen*

Infolge der Manipulation der Massestapel bei der Übergabe auftretende Schwingungen sind mittels Sensoren zu detektieren, durch entsprechende Vorrichtungen zu dämpfen bzw. ist bei Anhalten von Schwingungen eine Messung zu unterbinden.

Umgebungsbedingte Schwingungen (hoch- oder niederfrequente Einflüsse aus der Umgebung) sind in der Aufstellung der Anlage bzw. in deren Fundamentierung zu berücksichtigen und eine Dämpfung bzw. eine dämpfende Ausführung zur Reduktion auftretender Schwingungen ist vorzusehen.

- *Überprüfung der Sensorik: Position, Pendeln / Schrägstellung*

Die verwendeten Sensoren zur Detektion von Schwingungen/ Pendeln/ Schrägstellung

Anhang

und Sensoren zur Positionsbestimmung, zum Beispiel der Massen oder Hydraulikzylinder, sind so auszuwählen oder zu beschalten, dass ein Ausfall erkannt werden kann.

➤ **Sicherheitseinrichtungen**

- *Auffangvorrichtung und erhöhte Sicherheit bei Auflagen und Gehänge*

Es ist eine Sicherheitsvorkehrung vorzusehen, die bei Bruch des Kraftsensors oder von Einspannteilen ein unkontrolliertes oder ungebremstes Herabfallen der Massescheiben (von Höhe Hub_{max} mit g beschleunigt) und somit eine Beschädigung der nicht im Gehänge aufgelegten Massescheiben oder deren Auflagen in den Magazinplätzen verhindert.

- *Gefahr durch schwere Gewichte*

Durch die Manipulation von großen Massen sind entsprechende Sicherheitsvorrichtungen in der Anlage vorzusehen wie z.B. Auffangvorrichtung der Massen bei Materialbruch von Prüflingen bzw. die konstruktive Verwendung von Bauteilen (Auflagen und Gehänge) mit erhöhten Sicherheitsgrenzen zur Bruchdehnung.

- *Ausfall*

Die Anlage muss so ausgeführt sein, dass bei Stromausfall oder Ausfall von Steuerkomponenten eine Beschädigung von Kraftaufnehmern ausgeschlossen ist (z.B. durch Überlast oder absinkende Massestapel).

- *Erkennungseinrichtung*

Für das Erkennen und Vermeiden von Überlasten sind sowohl in der Software als auch in der Steuerung Vorkehrungen zu treffen, die die Möglichkeit einer Beschädigung des Kraftsensors minimieren. Damit ein Kraftaufnehmer nicht beschädigt oder überlastet wird, ist bei der Detektion einer drohenden Überlast mit automatischem Anhalten und langsamem Entlasten zu reagieren. Softwaretechnisch sind Sicherungsroutinen vorzusehen, die vor jeder Kraftbeaufschlagung eines Kraftsensors die Routinen und Programme auf Bedienungsfehler (Fehlprogrammierung, falsche Auswahl, ...) in Bezug auf Überlastung des verwendeten Kraftsensors verhindern.

9.2.2 Anforderung Verfahrenstechnik

➤ **Temperaturänderung durch Betrieb**

Auf Einflüsse thermischer Natur ist zu achten. Die Konstruktion muss so ausgelegt sein, dass eine Klimatisierung der Anlage durch die Konstanthaltung der Laborumgebungstemperatur auf $21\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$ möglich ist bzw. der Einfluss der Temperatur auf die Gesamtmessunsicherheit (bei $k=2$) der Anlage (alle Messunsicherheitskomponenten) geringer als $2 \cdot 10^{-5}$ ist.

Die Gesamtkonstruktion ist so auszuführen, dass alle Anlagenbereiche thermisch voneinander getrennt werden können. So ist eine entkoppelte Messkammer, mehrere unterteilte Bereiche für Massescheiben und separate Bereiche für Maschinenkomponenten wie die Hydraulik vorzusehen.

Eine Simulation über das Verhalten der Anlage bei thermischen Einflüssen inkl. thermischer Schichtungen ist durchzuführen.

Jede thermische Veränderung des Transfornormales in der Messkammer bedingt eine Verschiebung des Nullpunkts des Normals bzw. der Kraftnormalanlage. Daher ist die thermische Entkopplung der Messkammer so auszuführen, dass eine Temperaturkonstanz über den gesamten Messablauf (mehrere Stunden) besser $\pm 0,5\text{ °C}$ gewährleistet ist. Eine thermische Veränderung ist nur zulässig, wenn sie weniger als

Anhang

$\pm 0,01 \text{ }^\circ\text{C /h}$ beträgt. Hier nicht zu berücksichtigen ist die Eigenerwärmung des Transfornormales.

➤ **Konvektionsströmungen/ parasitäre Kräfte**

Durch Konvektionsströmungen in der Maschine ausgelöste Störkräfte oder parasitäre Kräfte sind zu verhindern. Der Einfluss der Temperatur bzw. Temperaturänderungen, inklusive Konvektionsströmungen, sind derart zu berücksichtigen bzw. zu verhindern, dass auftretende Störgrößen die Gesamtmessunsicherheit (bei $k=2$) der Anlage (alle Messunsicherheitskomponenten) von $2 \cdot 10^{-5}$ nicht erhöhen. Das bedeutet, dass Wärmequellen derart zu positionieren sind, dass für den Messbetrieb günstige Bedingungen vorliegen. Nicht zu verhindernde Konvektionsströmungen sind derart abzuleiten, dass keine parasitären Kräfte auf bewegte Teile ausgelöst werden.

➤ **Nullpunkt**

Sowohl bei der Kraftnormalanlage bis 250 kN als auch bei der Kraftnormalanlage bis 2 kN muss eine Realisierung des Nullpunktes des Transfornormales im abgehobenen Zustand realisierbar sein. Das bedeutet, dass das Gehänge in Schwebe positioniert gehalten werden muss während der Kraftsensor freizufahren ist. Darüber hinaus ist bei der Kraftnormalanlage bis 2 kN die Konstruktion so auszuführen, dass der Nullpunkt des Kraftaufnehmers auch im eingespannten Zustand realisiert werden kann. Das bedeutet, dass im Messbereich von 5 N bis 2 kN die Konstruktion so ausgeführt ist, dass über den Nullpunkt des Kraftaufnehmers hinaus (zwischen Zug und Druck) gemessen werden kann (Aussage über die Hysterese im Nullpunkt). Bei beiden Anlagen hat das gesamte bewegte System selbsttätig seine Nullposition einzunehmen. Die maximale Abweichung der Ruheposition von der Ausgangsposition darf dabei 0,01 mm nicht überschreiten (Entstehung von Rückstellkräften).

➤ **Kriechverhalten**

Bei einer Dauerbelastung der Anlage durch das Halten der Kraft über eine längere Zeit (mindestens 10 Minuten) darf die Konstanz der Kraft den Maximalwert der relativen erweiterten Messunsicherheit von $2 \cdot 10^{-5}$ nicht übersteigen (Drift der realisierten Kraft).

➤ **Pendelbewegung oder Schwingungen**

Jeglicher Lastwechsel muss möglichst ruckfrei (vibrationsfrei) und ohne Schwingen erfolgen. Schwingungen in den Laststapeln bzw. in den Gehängeteilen sind während der Übergabe der Massen konstruktiv und durch Justage der Zentrizität zu minimieren. Um Schwingungen während der Messung zu verhindern, sind geeignete Dämmelemente vorzusehen. Diese Dämmelemente sind derart auszuführen, dass im Ruhezustand keine unbekanntes Kräfte in vertikaler Richtung auftreten können.

➤ **Reibung**

Gelenke jeder Art (Drehgelenke, Schubgelenke) sind so auszuführen, dass die auftretende Reibung nach dem Stand der Technik minimiert wird; auftretende Reibkräfte müssen nachvollziehbar und berechenbar sein. Die Verwendung von Festkörperlager wird empfohlen.

➤ **Krafthaltung und Konstanz der Krafthaltung**

• *Konstanz*

Die Konstanthaltung der Kraft ist während des Lastwechsels der Massescheiben aufrecht zu erhalten. Als Grenzwert für die Konstanthaltung der Kraft ist jenes Kraftintervall

Anhang

anzusehen (Regelgenauigkeit) und zu gewährleisten, dass 5 % der Kraftdifferenz der zu wechselnden Massen entspricht.

- *Kraftverlauf*

Bei Aufrechterhaltung der Kraft durch die Krafthaltung ist der Übergang zu den Kräften der einzelnen Laststufen möglichst kontinuierlich und ohne Überschwingen zu realisieren.

➤ **Störfelder**

- *Magnetische Felder, elektrostatische Aufladung*

Auf Einflüsse elektrostatischer, magnetischer oder thermischer Natur ist konstruktiv zu achten.

Elektrische Komponenten wie Hardwarekomponenten der Steuerung oder andere „felderzeugende“ Komponenten müssen örtlich so weit wie möglich von der Anlage getrennt werden.

➤ **Fallbeschleunigung der Erde**

- *Schweremessungen*

Die Schweremessung hat im Anschluss an die nächstgelegenen Basis-Stationen des Österreichischen Schweregrundnetzes ÖSGN mittels Absolutgravimeter rückführbar auf die nationalen Normale der Länge und der Frequenz zu erfolgen.

- *Erdschwere*

Die örtliche Erdschwere ist mindestens in einem Punkt mit einem Absolutgravimeter zu bestimmen. daran angeschlossen sind weitere Fixpunkte mittels Relativgravimeter zu ermitteln.

- *Höhenkorrektur der Erdschwere*

Der für die Berechnung der Kraft relevante Schwerewert hat mittels Relativgravimeter mindestens in drei, über die Gesamthöhe der Anlage verteilten Messpunkten nach Herstellung der Masseverhältnisse (nach Einbringung aller Massen) zu erfolgen.

- Jedem Massestapel ist eine Erdschwerewert zuzuordnen. Dies ist durch mehrere Messungen mit Gravimeter in verschiedenen Höhen bzw. einer Korrektur der Erdbeschleunigung zwischen den Messpunkten zu gewährleisten.

- *Gezeiten*

Bei der Erdschweremessung ist der Einfluss der Gezeiten zu korrigieren.

- *Gravitation der Massen*

Dabei ist darauf zu achten, dass der endgültige Wert der Erdschwere erst nach Fertigstellung und Einbringung der Massen bestimmt wird.

➤ **Verfahrenstechnische Dimensionierung der Trägerkonstruktion**

- *Referenzsensoren*

Für Vergleichszwecke und zur Überwachung der Steuerung (z.B. Detektion der aufgebrachten Last, Erreichen der Maximallast,...) sind in der Kraftnormalanlage Kraftmesssensoren bzw. Wägezellen (Klasse 0,5 oder in Auflösung und Messbereich gleichwertig) für beide Krafrichtungen vorzusehen, die die aufgebrachte Last überwachen und anzeigen.

Diese Kraftsensoren können auch im Arbeitstisch der Anlage (Gegenstück) implementiert

Anhang

sein.

- *Dimensionierung der Gewichtsaufnahmekonstruktion*

Aus Gründen der Gewichtsersparnis ist ein Teil des Gehänges als Fachwerk auszuführen. Das Fachwerk hat für die notwendige Steifigkeit zu sorgen und damit ein Kippen der Massestapel zu verhindern. Auf die Steifigkeit des Gehänges ist auch aus Gründen der Wirksamkeit der Pendeldämpfung zu achten.

- *Leergewichts-Kompensation der Gewichtsaufnahme*

Zur Messbereichserweiterung ist das Eigengewicht der Gewichtsaufnahmen kräftemäßig zu kompensieren.

- *Waagenkonstruktion*

Die Waagenkonstruktion ist als Fachwerkskonstruktion mit definierter Durchbiegung auszuführen. Dabei ist auf eine reibungsfreie Lagerung zu achten. Der Schwerpunkt der Konstruktion ist aus Gründen der Sensitivität nur geringfügig unter der Drehachse vorzusehen.

➤ **Gewichte**

- *Manipulation der Massescheiben*

Die Anlage muss so konzipiert sein, dass ein einfacher Ausbau aller Massescheiben ohne Abbau der Anlage oder Zerlegen von Teilen der Anlage (insbesondere der Rahmenkonstruktion), deren Entfernung einen relevanten Einfluss auf das Messverhalten der Anlage nach sich zieht, möglich ist. Das heißt, eine Entnahme der Massescheiben für eine Kalibrierung der Massen ist zu ermöglichen, ohne dass das Gesamtverhalten der Anlage verändert wird. Der erneute Einbau der Massescheiben muss ohne erforderliche oder wiederkehrende Justage der Anlage möglich sein.

Dafür ist ein „Schubladensystem“ für die Massescheiben vorzusehen, aus dem eine Entnahme ohne nennenswerte Demontage von Haltekonstruktionen möglich ist.

- *Verfahren der Massescheiben*

Die Absenkgeschwindigkeit des Massestapels muss frei regelbar (einstellbar) sein. Das Aufbringen der einzelnen Massescheiben muss frei einstellbar sein (justierbares Absenken der einzelnen Massescheiben).

Die Übergabe der Laststapel hat erschütterungsfrei und ohne Schwingen zu erfolgen, wobei die Konstanz der Kraft den Maximalwert der relativen erweiterten Messunsicherheit von $2 \cdot 10^{-5}$ nicht übersteigen darf.

9.2.3 Maschineninterne Reaktion der Kraftaufbringung

➤ **Verformung durch Krafteinleitung (Durchbiegung)**

Kraftflüsse in der Konstruktion sind derart zu gestalten, dass eine Veränderung der Wirkkräfte auf die Teile der Konstruktion, welche Rückkopplung auf die Kraftaufnehmer haben, keine die Messgenauigkeit beeinträchtigende Auswirkungen zeigt.

➤ **Temperaturänderung durch Betrieb**

Über die Höhe der Anlage ist eine Temperaturdifferenz nicht auszuschließen. Wie die Erfahrung zeigt, wird durch den Betrieb die Temperatur in der Anlage zu Beginn der Messungen um etwa $0,3 \text{ °C}$ steigen. Nach Stabilisierung ist die Temperatur derartiger Anlagen stabil. Speziell der Arbeitsraum ist konstruktiv so zu gestalten, dass für im Betrieb wärmebildende Komponenten (Lager, Führungen, ...) ausreichende Möglichkeit

Anhang

besteht, die entstehende Wärme abzuleiten und nach außen abzugeben.

Da eine Temperaturveränderung nicht zu verhindern ist, ist die Konstruktion so auszuführen, dass Wärmequellen symmetrisch angeordnet und die Verformung somit symmetrisch erfolgt.

Der thermische Einfluss auf die Kraftsensoren ist dabei durch entsprechende Abstände zu den Wärmequellen und über Abschirmungen zu minimieren.

➤ **Querkräfte durch Kraftschluss zu Kraftaufnehmer**

Grundsätzlich ist die gesamte Anlage so auszuführen, dass rein axiale Kräfte in die Kraftsensoren bzw. deren Einspannteile eingeleitet werden. Kraftsensoren sind in einer solchen Ausführung zu verwenden, dass die axiale Kraft mit einer rotationssymmetrischen Reaktion aufgenommen wird. Abweichungen von diesem Grundprinzip (z.B. verursacht durch Fertigungstoleranzen) sind in der Messunsicherheitsbetrachtung zu analysieren.

➤ **Kraftaufnehmer**

Kraftaufnehmer sind von der Kraftnormalanlage separat zu betrachten, da ihre Ausführung nicht vom Betreiber der Kraftnormalanlage beeinflussbar ist. Die Krafteinleitungsteile der Kraftaufnehmer sind in der Regel normativ geregelt, wobei Sonderbauarten zulässig sind. Vor der Einbringung von Kraftaufnehmern sind diese auf Zustand und Ausführung zu kontrollieren. Beschädigte Kraftaufnehmer oder Bauarten, die auf eine Beeinträchtigung der Kraftmaschine hindeuten, sind von der Verwendung in der Kraftmaschine ausgeschlossen.

➤ **Nullpunktabweichung und Vorlast**

Jeder Kraftaufnehmer sowie dessen Einspannteile sind nachweislich (nach EN ISO 376) einer Belastung von 110 % der Nominal-Maximalbelastung auszusetzen. Die Anlage muss in der Lage sein diese Belastung aufzubringen.

Die Nullpunktdrift ist als sensorabhängige Kenngröße zu bestimmen. Laststufen und Messprogramm haben entsprechende Möglichkeiten zu bieten.

➤ **Ausführung Kraftsensor**

Es ist eine mögliche Kalibrierung von jedem handelsüblichen Verformungskörper vorzusehen, sofern seine Bauart oder Zustand keine Beschädigung oder Beeinträchtigung der Kraftmaschine vermuten lässt. Rückwirkungen der Kraftsensoren auf die Kraftmaschine finden sich im Ergebnis und in der berechneten Messunsicherheit wieder (Streuung, Reproduzierbarkeit, Wiederholbarkeit, ...).

➤ **Anzeigegerät Vorspannung**

Anzeigegeräte sind so zu verwenden, dass keine Rückwirkung auf den Kraftsensor oder die Kraftmaschine erfolgen kann. Davon nicht betroffen sind Rückwirkungen aufgrund des physikalischen Messprinzipes (Anstellkräfte, elektrische Eigenerwärmung des Sensors).

➤ **Temperatureinfluss Maschine**

Kraftsensoren erfahren während des Betriebes eine Temperaturänderung durch Eigenerwärmung. Diese entsteht durch die interne Verformung durch die alternierende Belastung, durch Temperatureinwirkung von außen und bei Kraftaufnehmern, deren Verformungsbestimmung auf elektrischem Prinzip beruht (Widerstandsmessung bei DMS), durch die Eigenerwärmung aufgrund des Stromflusses.

Anhang

Jede Wärmeänderung eines DMS applizierten Kraftsensors bewirkt eine Änderung der sensorinternen Kräfteverhältnisse und damit eine Drift. Da aber genau die Auswirkungen dieser inneren Kräfte gemessen werden, ergibt eine Temperaturänderung eine Änderung des Messsignals. Durch elektrische Kompensation der Temperatur lässt sich die Empfindlichkeit gegenüber Temperaturschwankungen reduzieren, es ist aber bei der Auslegung des Arbeitsraumes darauf zu achten, dass zum einen die für den Kraftsensor relevante Temperatur bestimmt werden kann und zum anderen der Kraftsensor vor allem keine einseitige Erwärmung oder Abkühlung erfährt (z.B. durch Kühlung).

➤ **Einspannteile**

Einspannteile wie Kugelschalen, Verteilerplatten oder Zugaufnehmer werden hier in einer Einheit mit dem Kraftsensor gesehen. Daher werden für die Einspannteile dieselben Vorgaben vorgesehen wie für Kraftsensoren.

➤ **Abweichungen zu Vorkalibrierungen**

Die Aufnahmen der Einspannteile sind möglichst universell auszuführen. Wo möglich, ist die Art der Einspannungen bei Vorkalibrierungen zu kopieren bzw. auf analoge Weise vorzunehmen.

9.2.4 Umgebungsbedingungen

➤ **Gewichte**

• *Nominalwerte und Massen*

Die Kraftwerte, die die einzelnen Massescheiben repräsentieren, müssen derart ausgelegt sein, dass ihre Nominalwerte am Aufstellungsort der Anlage (Arltgasse 35, 1160 Wien, neue Kraftmesshalle) erreicht werden. Der exakte Wert für die örtliche Fallbeschleunigung wird vorerst laut österreichischem Schwerkennetz mit $g = 9,80841263 \text{ m/s}^2$ angenommen.

• *Luftauftrieb Massen*

Zur Bestimmung des örtlichen Luftauftriebes der Massescheiben hat die Anlage mindestens über acht, über die Räume der Massestapel verteilte, automatische Luftdichtebestimmungen zu verfügen (Sensoren zur Luftfeuchte, Temperatur und Luftdruck), die es ermöglichen, automatisch die Luftauftriebskorrektur für jede einzelne Massescheibe zu bestimmen und die Berechnung der realisierten Kraftwerte zu korrigieren. Die Messsensoren sind dabei über den Raum zu verteilen und die Messwerte linear interpoliert den Massescheiben für die Berechnung der Auftriebswerte zuzuordnen.

• *Eigenschaften Massen*

Als Mindestanforderung für die Massescheiben wird gesehen:

maximaler Masse-Nominalwert: 500 kg, Gewichtsklasse F1, Material: austenitischer, nichtmagnetisierbarer Edelstahl, poliert, lt. Bauanforderungen und Justierkammer gemäß OIML R111:2004 mit zusätzlich Justierkammern, Oberflächenrauheit $R_z < 2 \text{ } \mu\text{m}$, magnetische Eigenschaften: Magnetisierung $< 25 \text{ } \mu\text{T}$; Suszeptibilität $\mu_r < 0,2$.

• *Wasserhaut der Massen*

Als Gewährleistung einer konstanten Oberfläche der Massescheiben in Bezug auf Feuchtigkeitsaufnahme wird die Luftfeuchtigkeit im Labor auf unter $45 \% \pm 3 \% \text{ rH}$ gehalten. Zur Vermeidung einer elektrostatischen Aufladung der Massescheiben durch die Bewegung (Luftreibung) darf die Luftfeuchte im Labor nicht unter 42% rH sinken.

Anhang

- *Verschmutzung der Massen*

Die Anlage ist so auszuführen, dass die Massescheiben von Staub oder sonstigen Verunreinigungen mittels Einhausungen geschützt sind.

➤ **Bediener**

- *Messablauf*

Der Messablauf hat in erster Linie nach einer vorzugebenden Routine vollautomatisch zu erfolgen, wobei darauf zu achten ist, dass die Möglichkeit einer Fehlmessung oder Fehlbedienung minimiert wird. Die Steuerung der Anlage hat zu gewährleisten, dass eine Beschädigung durch Fehlbedienung ausgeschlossen ist. Durch den Bediener sind vorgefertigte oder zu erstellende Routinen auszuwählen, die anschließend ohne weiteres Zutun abgearbeitet werden. Sofern nicht anders ausgewählt, sind alle erhaltenen Messwerte aufzuzeichnen.

Für besonders eingeschulte Bediener ist ein Modus zur halbautomatischen Steuerung (z.B. manuelle Messauslösung) vorzusehen. Dabei ist aber darauf zu achten, dass ein Eingriff in fundamentale Bewegungsabläufe nicht möglich ist (z.B. Auslösen von Fehlfunktionen). Aus Sicherheitsgründen muss für den Bediener während des Prüfablaufes die Möglichkeit bestehen, in den Prüfablauf einzugreifen und gegebenenfalls abweichende Messschritte durchzuführen; dabei dürfen aber Sicherheitsmechanismen nicht umgangen werden. Softwaremäßige Sicherungsvorkehrungen (Programmausstiegsmöglichkeit, Programmstopp, Überlast, Warnhinweise im Betrieb, Ausfall von Komponenten) sind zu realisieren.

- *Datenaufzeichnung*

Alle Daten und Ergebnisse müssen, soweit sie nicht in einem MS-Word oder MS-Excel Format vorliegen, in einem einheitlichen Format in ASCII gespeichert werden, sodass sie in nachfolgende Anwenderprogramme (z.B. MS-Excel) einfach importiert werden können.

- *Programmbedienung*

Userorientierte Programmoberfläche: Die Bedienung der Anlage erfolgt über menügeführte Eingabemasken, wobei die gesamte Steuerung der Anlage durch den Bediener über das Menü zu erfolgen hat.

- *Programmoberfläche*

Die Anzeige aller Messergebnisse aller verwendeten Sensoren am Desktop ist vorzusehen; Die graphische Darstellung der Positionen von Lasten (Position der Massescheiben), optische Anzeigen und Informationen über Messfortschritt, Anweisungen und Fehlermeldungen sind anzuzeigen.

- *Programmeingabe*

Vorzusehen sind die Auswahl von Prüfroutinen nach ISO bzw. nach DKD -R 3-3-/2007 sowie automatische, frei wählbare und zusammenstellbare Belastungsroutinen von Laststufen („Programmierung“ von Belastungsroutinen). Eine tabellarische Eingabe der notwendigen Parameter und Messvorgaben im Steuerprogramm basierend auf einer Datenbank (z.B. Haltezeit, Ansteuerzeit, Zeit für Aufbringen der Last, Wartezeit für Auslesen des Anzeigewertes des Messverstärkers usw.) ist umzusetzen.

- *Programmhilfe*

Zu den einzelnen Bedienknöpfen und -befehlen sind Hilfestellungen zu hinterlegen (Pop-up-Menü). Die Software hat Überwachungsprozeduren der Messergebnisse mit

Anhang

entsprechender Anzeige zur Überwachung der Eignung von Messungen und Messserien zu beinhalten.

- *Datenspeicherung und Aufzeichnung*

Ein Auslesen von Messverstärkern von verschiedenen gängigen Herstellern muss möglich sein (HBM DMP 40, HBM DK 38, MGC plus, DMP 39, GTM VN-Digitizer usw.). Die Software muss so konzipiert sein, dass ein Nachrüsten mit zusätzlichen Auslesemöglichkeiten von Messverstärkern durchgeführt werden kann (z.B. zu modularem Aufbau der Software).

- *Wartung*

Für Wartungs- und Montagezwecke ist ein Modus vorzusehen, der eine gänzlich manuelle Steuerung der Anlagen ermöglicht. Dieser Modus ist entsprechend softwaremäßig zu schützen und darf nur von besonders geschultem Personal bedient werden.

9.3 Ergebnisse der Vergleichsmessungen BEV – PTB zu 7.5

2 kN-Totlastanlage:

Ergebnisse der Vergleichsmessung zwischen PTB-Braunschweig und BEV Wien														
Kraftaufnehmer: D 10 N SN: 040430208														
Messung in PTB					Messung im BEV Wien					Auswertung Programm PTB				
File:	00113_50N	vom	09.04.2013	File:	00113_10N_BEV	vom	17.04.2013							
Nullpunkt zu Beginn der Messung:		0,020331		mV/V		Nullpunkt zu Beginn der Messung:		0,020331		mV/V				
Nullpunkt am Ende der Messung:		0,020272		mV/V		Nullpunkt am Ende der Messung:		0,020272		mV/V				
				Auswertung PTB	Mittelwert	relative	relative	rel. Messuns.	relative Gesamt-	E _n				
Kraft	Mittelwert	rel. Messuns.			in mV/V	Messuns.	Abweichung	Drift/Temp.-Koeff.	messuns.*					
in N	in mV/V	k=2			k=2	BEV-PTB			k=2					
5	0,999537	2,3E-5			0,999581	1,6E-4	4,3E-05	1,0E-06	1,6E-04	0,27				
10	1,999149	2,1E-5			1,999435	7,8E-5	1,4E-04	1,0E-06	8,1E-05	1,77				
				Auswertung BEV	Messung im BEV Wien vom 17.04.13					Auswertung BEV Programm				
					0,999581	4,7E-04	4,32E-05	1,0E-06	4,7E-04	0,09				
					1,999258	3,3E-04	5,42E-05	1,0E-06	3,3E-04	0,16				
Umkehrspannen														
Kraft	Umkehrspannen		Differenz der Umkehrspannen											
in kN	PTB	BEV Wien												
	in mV/V	in mV/V	in mV/V											
5	0,000217	0,000217	0,000000			Messung im BEV Wien vom 22.01.13								
10	--	--	--			Auswertung BEV Programm								

Ergebnisse der Vergleichsmessung zwischen PTB-Braunschweig und BEV Wien														
Kraftaufnehmer: D 50 N SN: 042030043														
Messung in PTB					Messung im BEV Wien					Auswertung Programm PTB				
File:	00413_50 N	vom	28.03.2013	File:	00313_50N_BEV	vom	18.04.2013							
Nullpunkt zu Beginn der Messung:		0,010320		mV/V		Nullpunkt zu Beginn der Messung:		0,010876		mV/V				
Nullpunkt am Ende der Messung:		0,010530		mV/V		Nullpunkt am Ende der Messung:		0,011117		mV/V				
				Auswertung PTB	Mittelwert	relative	relative	rel. Messuns.	relative Gesamt-	E _n				
Kraft	Mittelwert	rel. Messuns.			in mV/V	Messuns.	Abweichung	Drift/Temp.-Koeff.	messuns.*					
in N	in mV/V	k=2			k=2	BEV-PTB			k=2					
10	0,400129	2,0E-5			0,400134	3,0E-5	1,4E-05	1,0E-06	3,6E-05	0,37				
20	0,800251	2,0E-5			0,800272	2,7E-5	2,7E-05	1,0E-06	3,3E-05	0,81				
40	1,600432	2,0E-5			1,600467	2,9E-5	2,2E-05	1,0E-06	3,5E-05	0,61				
50	2,000400	2,1E-5			2,000420	3,0E-5	9,9E-06	1,0E-06	3,6E-05	0,27				
				Auswertung BEV	Messung im BEV Wien vom 18.04.13					Auswertung BEV Programm				
					0,400137	1,9E-04	2,06E-05	1,0E-06	1,9E-04	0,11				
					0,800268	9,7E-05	2,21E-05	1,0E-06	9,9E-05	0,22				
					1,600461	7,5E-05	1,81E-05	1,0E-06	7,8E-05	0,23				
					2,000419	8,6E-05	9,44E-06	1,0E-06	8,8E-05	0,11				
Umkehrspannen														
Kraft	Umkehrspannen		Differenz der Umkehrspannen											
in N	PTB	BEV Wien												
	in mV/V	in mV/V	in mV/V											
10	0,000066	0,000088	-0,000023			Messung im BEV Wien								
20	0,000066	0,000049	0,000017			Auswertung BEV Programm								
40	0,000046	0,000047	-0,000001											
50	--	--	--											

*Die relative Messunsicherheit errechnet sich aus der Messunsicherheit der Messungen in der PTB, im BEV Wien und einem Unsicherheitsanteil aus Drift- und Temperaturverhalten (Temperaturdifferenz PTB - BEV Wien = 1 K) sowie der verwendeten K-NME.

Anhang

Ergebnisse der Vergleichsmessung zwischen PTB-Braunschweig und BEV Wien														
Kraftaufnehmer:		D 100 N SN: 160330035												
Messung in PTB					Messung im BEV Wien					Auswertung Programm PTB				
File:	00513_100N	vom	26.03.2013	File:	00513_100N_BEV	vom	18.04.2013							
Nullpunkt zu Beginn der Messung:		-0,000636 mV/V		Nullpunkt zu Beginn der Messung:		-0,000597 mV/V								
Nullpunkt am Ende der Messung:		-0,000458 mV/V		Nullpunkt am Ende der Messung:		-0,000378 mV/V								
				Auswertung PTB										
Kraft	Mittelwert	rel. Messuns.		Mittelwert	relative	relative	rel. Messuns.	relative Gesamt-	E_n					
in N	in mV/V	$k=2$		in mV/V	Messuns.	Abweichung	Drift/Temp.-Koeff.	messuns.*						
					$k=2$	BEV-PTB		$k=2$						
50	0,999204	2,1E-5		0,999214	2,6E-5	9,5E-06	1,0E-06	3,3E-05	0,29					
60	1,199055	2,1E-5		1,199068	2,5E-5	1,2E-05	1,0E-06	3,3E-05	0,35					
80	1,598738	2,1E-5		1,598749	2,2E-5	6,4E-06	1,0E-06	3,0E-05	0,21					
100	1,998413	2,1E-5		1,998422	2,2E-5	4,8E-06	1,0E-06	3,0E-05	0,16					
				Auswertung BEV										
Umkehrspannen					Messung im BEV Wien vom 18.04.13					Auswertung BEV Programm				
Kraft	Umkehrspannen		Differenz der Umkehrspannen	0,999219		6,1E-05	1,46E-05	1,0E-06	6,4E-05	0,23				
in N	PTB	BEV Wien		1,199074		6,2E-05	1,59E-05	1,0E-06	6,5E-05	0,24				
	in mV/V	in mV/V	in mV/V	1,598744		5,7E-05	3,58E-06	1,0E-06	6,1E-05	0,06				
				1,998438		6,1E-05	1,27E-05	1,0E-06	6,5E-05	0,20				
50	0,000055	0,000057	-0,000001	Messung im BEV Wien vom 22.01.13						Auswertung BEV Programm				
60	0,000046	0,000043	0,000003											
80	0,000031	0,000034	-0,000003											
100	--	--	--											

*Die relative Messunsicherheit errechnet sich aus der Messunsicherheit der Messungen in der PTB, im BEV Wien und einem Unsicherheitsanteil aus Drift- und Temperaturverhalten (Temperaturdifferenz PTB - BEV Wien = 1 K) sowie der verwendeten K-NME.

Ergebnisse der Vergleichsmessung zwischen PTB-Braunschweig und BEV Wien														
Kraftaufnehmer:		D 200 N SN: 160330082												
Messung in PTB					Messung im BEV Wien					Auswertung Programm PTB				
File:	00713_200N	vom	26.03.2013	File:	00713_200N_BEV	vom	18.04.2013							
Nullpunkt zu Beginn der Messung:		-0,002996 mV/V		Nullpunkt zu Beginn der Messung:		-0,002920 mV/V								
Nullpunkt am Ende der Messung:		-0,002882 mV/V		Nullpunkt am Ende der Messung:		-0,002836 mV/V								
				Auswertung PTB										
Kraft	Mittelwert	rel. Messuns.		Mittelwert	relative	relative	rel. Messuns.	relative Gesamt-	E_n					
in N	in mV/V	$k=2$		in mV/V	Messuns.	Abweichung	Drift/Temp.-Koeff.	messuns.*						
					$k=2$	BEV-PTB		$k=2$						
100	0,999918	2,0E-5		0,999908	2,0E-5	-1,0E-05	1,0E-06	2,9E-05	0,35					
120	1,199900	2,0E-5		1,199892	2,1E-5	-6,1E-06	1,0E-06	2,9E-05	0,21					
160	1,599856	2,0E-5		1,599843	2,0E-5	-8,0E-06	1,0E-06	2,9E-05	0,28					
200	1,999805	2,0E-5		1,999803	2,2E-5	-1,1E-06	1,0E-06	3,0E-05	0,04					
				Auswertung BEV										
Umkehrspannen					Messung im BEV Wien vom 18.04.13					Auswertung BEV Programm				
Kraft	Umkehrspannen		Differenz der Umkehrspannen	0,999922		2,8E-05	3,51E-06	1,0E-06	3,5E-05	0,10				
in N	PTB	BEV Wien		1,199913		2,9E-05	1,12E-05	1,0E-06	3,6E-05	0,31				
	in mV/V	in mV/V	in mV/V	1,599861		2,6E-05	2,90E-06	1,0E-06	3,3E-05	0,09				
				1,999808		1,7E-05	1,26E-06	1,0E-06	2,7E-05	0,05				
				Auswertung BEV										
Umkehrspannen					Messung im BEV Wien vom 17.04.13					Auswertung BEV Programm				
Kraft	Umkehrspannen		Differenz der Umkehrspannen	1,000086		2,1E-04	1,68E-04	1,0E-06	2,1E-04	0,81				
in N	PTB	BEV Wien		1,200067		1,8E-04	1,39E-04	1,0E-06	1,9E-04	0,75				
	in mV/V	in mV/V	in mV/V	1,600008		1,4E-04	9,52E-05	1,0E-06	1,4E-04	0,69				
				1,999958		1,3E-04	7,65E-05	1,0E-06	1,3E-04	0,60				

*Die relative Messunsicherheit errechnet sich aus der Messunsicherheit der Messungen in der PTB, im BEV Wien und einem Unsicherheitsanteil aus Drift- und Temperaturverhalten (Temperaturdifferenz PTB - BEV Wien = 1 K) sowie der verwendeten K-NME.

Anhang

Ergebnisse der Vergleichsmessung zwischen PTB-Braunschweig und BEV Wien																	
Kraftaufnehmer:		D 500 N SN: 00058															
Messung in PTB					Messung im BEV Wien					Auswertung Programm PTB							
File:	00913_500N	vom	27.03.2013		File:	00913_500N_BEV	vom	19.04.2013									
Nullpunkt zu Beginn der Messung:		-0,002877		mV/V		Nullpunkt zu Beginn der Messung:		-0,002875		mV/V							
Nullpunkt am Ende der Messung:		-0,002813		mV/V		Nullpunkt am Ende der Messung:		-0,002847		mV/V							
				Auswertung PTB													
Kraft	Mittelwert	rel. Messuns.				Mittelwert	relative	relative	rel. Messuns.	relative Gesamt-	E_n						
in N	in mV/V	k=2				in mV/V	Messuns.	Abweichung	Drift/Temp.-Koeff.	messuns.*							
							k=2	BEV-PTB		k=2							
200	0,803544	2,0E-5				0,803525	2,2E-5	-2,4E-05	1,0E-06	3,0E-05	0,80						
300	1,205359	2,0E-5				1,205345	2,2E-5	-1,1E-05	1,0E-06	3,0E-05	0,38						
400	1,607216	2,0E-5				1,607211	2,0E-5	-2,8E-06	1,0E-06	2,9E-05	0,10						
500	2,009085	2,0E-5				2,009065	2,1E-5	-1,0E-05	1,0E-06	2,9E-05	0,35						
				Auswertung BEV													
Umkehrspannen					Messung im BEV Wien vom 19.04.13					Auswertung BEV Programm							
Kraft		Umkehrspannen		Differenz der Umkehrspannen		0,803527		3,3E-05		-2,10E-05		1,0E-06		3,9E-05		0,54	
in N	PTB	BEV Wien				1,205334	3,1E-05	-2,05E-05		1,0E-06		3,8E-05		0,55			
	in mV/V	in mV/V	in mV/V			1,607237	1,5E-04	1,30E-05		1,0E-06		1,5E-04		0,09			
						2,009094	2,0E-04	4,20E-06		1,0E-06		2,0E-04		0,02			
200	-0,000022	-0,000026	0,000004			0,803510		3,7E-05		-4,14E-05		1,0E-06		4,2E-05		0,99	
300	-0,000033	-0,000047	0,000015			1,205404		3,8E-05		3,75E-05		1,0E-06		4,3E-05		0,87	
400	-0,000033	-0,000045	0,000012			1,607202		3,9E-05		-8,90E-06		1,0E-06		4,4E-05		0,20	
500	--	--	--			2,009139		9,1E-05		2,69E-05		1,0E-06		9,4E-05		0,29	

*Die relative Messunsicherheit errechnet sich aus der Messunsicherheit der Messungen in der PTB, im BEV Wien und einem Unsicherheitsanteil aus Drift- und Temperaturverhalten (Temperaturdifferenz PTB - BEV Wien = 1 K) sowie der verwendeten K-NME.

Ergebnisse der Vergleichsmessung zwischen PTB-Braunschweig und BEV Wien																	
Kraftaufnehmer:		D 1000 N SN: 042030040															
Messung in PTB					Messung im BEV Wien					Auswertung Programm PTB							
File:	01113	vom	05.04.2013		File:	01113_1000N_BEV	vom	15.04.2013									
Nullpunkt zu Beginn der Messung:		0,006720		mV/V		Nullpunkt zu Beginn der Messung:		0,006723		mV/V							
Nullpunkt am Ende der Messung:		0,006838		mV/V		Nullpunkt am Ende der Messung:		0,006856		mV/V							
				Auswertung PTB													
Kraft	Mittelwert	rel. Messuns.				Mittelwert	relative	relative	rel. Messuns.	relative Gesamt-	E_n						
in N	in mV/V	k=2				in mV/V	Messuns.	Abweichung	Drift/Temp.-Koeff.	messuns.*							
							k=2	BEV-PTB		k=2							
500	0,999705	2,0E-5				0,999684	2,2E-5	-2,1E-05	1,0E-06	3,0E-05	0,70						
600	1,199643	2,0E-5				1,199646	2,0E-5	2,8E-06	1,0E-06	2,9E-05	0,10						
800	1,599496	2,0E-5				1,599500	2,3E-5	2,4E-06	1,0E-06	3,0E-05	0,08						
1000	1,999320	2,0E-5				1,999295	2,1E-5	-1,3E-05	1,0E-06	2,9E-05	0,44						
				Auswertung BEV													
Umkehrspannen					Messung im BEV Wien vom 15.04.13					Auswertung BEV Programm							
Kraft		Umkehrspannen		Differenz der Umkehrspannen		0,999707		3,3E-05		2,10E-06		1,0E-06		3,8E-05		0,05	
in N	PTB	BEV Wien				1,199664	2,5E-05	1,81E-05		1,0E-06		3,2E-05		0,56			
	in mV/V	in mV/V	in mV/V			1,599519	6,7E-05	1,41E-05		1,0E-06		7,0E-05		0,20			
						1,999304	3,9E-05	-7,96E-06		1,0E-06		4,4E-05		0,18			
500	0,000007	0,000010	-0,000003			0,999637		1,7E-04		-6,81E-05		1,0E-06		1,7E-04		0,39	
600	0,000002	0,000006	-0,000004			1,199585		2,0E-04		-4,79E-05		1,0E-06		2,1E-04		0,23	
800	0,000009	0,000008	0,000000			1,599404		2,5E-04		-5,78E-05		1,0E-06		2,5E-04		0,23	
1000	--	--	--			1,999172		2,6E-04		-7,41E-05		1,0E-06		2,6E-04		0,28	

*Die relative Messunsicherheit errechnet sich aus der Messunsicherheit der Messungen in der PTB, im BEV Wien und einem Unsicherheitsanteil aus Drift- und Temperaturverhalten (Temperaturdifferenz PTB - BEV Wien = 1 K) sowie der verwendeten K-NME.

Anhang

Ergebnisse der Vergleichsmessung zwischen PTB-Braunschweig und BEV Wien														
Kraftaufnehmer:		D 2000 N SN: 052930064												
Messung in PTB					Messung im BEV Wien					Auswertung Programm PTB				
File:	003_PTB*		vom 02.10.2012		File:	01313_2000N_BEV		vom 14.04.2013						
Nullpunkt zu Beginn der Messung:		-0,001135		mV/V		Nullpunkt zu Beginn der Messung:		-0,001265		mV/V				
Nullpunkt am Ende der Messung:		-0,001007		mV/V		Nullpunkt am Ende der Messung:		-0,001098		mV/V				
Kraft	Mittelwert	rel. Messuns.	Auswertung PTB			Mittelwert	relative	relative	rel. Messuns.	relative Gesamt-	E_n			
in N	in mV/V	$k=2$				in mV/V	Messuns.	Abweichung	Drift/Temp.-Koeff.	messuns.*				
1000	1,000484	3,6E-5	Auswertung BEV			Messung im BEV Wien vom 14.04.13		Auswertung BEV Programm						
1500	1,500752	3,5E-5				1,000466	8,0E-05	-1,79E-05	1,0E-06	8,8E-05	0,20			
1800	1,800931	3,4E-5				1,500728	1,1E-04	-1,61E-05	1,0E-06	1,2E-04	0,14			
2000	2,001058	3,4E-5				1,800917	1,3E-04	-8,10E-06	1,0E-06	1,3E-04	0,06			
Umkehrspannen		Differenz der Umkehrspannen		Messung im BEV Wien vom 12.03.13		Auswertung BEV Programm								
Kraft	Umkehrspannen	Differenz der Umkehrspannen		1,000506	5,1E-05	2,25E-05	1,0E-06	6,2E-05	0,36					
in N	PTB	BEV Wien	in mV/V	1,500778	6,3E-05	1,71E-05	1,0E-06	7,2E-05	0,24					
	in mV/V	in mV/V	in mV/V	1,800965	7,0E-05	1,85E-05	1,0E-06	7,8E-05	0,24					
1000	0,000080	0,000071	0,000009	2,001041	1,4E-04	-8,40E-06	1,0E-06	1,4E-04	0,06					
1500	0,000063	0,000057	0,000006	Messung im BEV Wien vom 25.01.13		Auswertung BEV Programm								
1800	0,000031	0,000031	0,000001	0,800347	3,7E-05	-3,77E-05	1,0E-06	5,5E-05	0,69					
2000	--	--	--	1,200554	3,6E-05	-2,93E-05	1,0E-06	5,0E-05	0,58					
				1,600801	3,3E-05	-9,10E-06	1,0E-06	4,5E-05	0,20					
				2,001048	2,1E-05	-8,70E-06	1,0E-06	3,6E-05	0,24					

*Die relative Messunsicherheit errechnet sich aus der Messunsicherheit der Messungen in der PTB, im BEV Wien und einem Unsicherheitsanteil aus Drift- und Temperaturverhalten (Temperaturdifferenz PTB - BEV Wien = 1 K) sowie der verwendeten K-NME.

250 kN-Totlastanlage:

Ergebnisse der Vergleichsmessung zwischen PTB-Braunschweig und BEV Wien														
Kraftaufnehmer:		D 5 kN SN: 052930043												
Messung in PTB					Messung im BEV Wien					Auswertung Programm PTB				
File:	005		vom 14.09.2012		File:	005_BEV		vom 07.12.2012						
Nullpunkt zu Beginn der Messung:		-0,001240		mV/V		Nullpunkt zu Beginn der Messung:		-0,001142		mV/V				
Nullpunkt am Ende der Messung:		-0,001206		mV/V		Nullpunkt am Ende der Messung:		-0,001210		mV/V				
Kraft	Mittelwert	rel. Messuns.	Auswertung PTB			Mittelwert	relative	relative	rel. Messuns.	relative Gesamt-	E_n			
in kN	in mV/V	$k=2$				in mV/V	Messuns.	Abweichung	Drift/Temp.-Koeff.	messuns.*				
2	0,800378	4,1E-5	Auswertung BEV			Messung im BEV Wien vom 07.12.12		Auswertung BEV Programm						
3	1,200589	3,5E-5				0,800409	3,7E-05	3,96E-05	1,0E-06	5,5E-05	0,72			
4	1,600816	3,1E-5				1,200615	3,9E-05	2,20E-05	1,0E-06	5,3E-05	0,42			
5	2,001066	2,9E-5				1,600843	3,9E-05	1,74E-05	1,0E-06	5,0E-05	0,35			
Umkehrspannen		Differenz der Umkehrspannen		Messung im BEV Wien vom 25.01.13		Auswertung BEV Programm								
Kraft	Umkehrspannen	Differenz der Umkehrspannen		0,800347	3,7E-05	-3,77E-05	1,0E-06	5,5E-05	0,69					
in kN	PTB	BEV Wien	in mV/V	1,200554	3,6E-05	-2,93E-05	1,0E-06	5,0E-05	0,58					
	in mV/V	in mV/V	in mV/V	1,600801	3,3E-05	-9,10E-06	1,0E-06	4,5E-05	0,20					
2	0,000066	0,000081	-0,000015	2,001048	2,1E-05	-8,70E-06	1,0E-06	3,6E-05	0,24					
3	0,000063	0,000042	0,000020	Messung im BEV Wien vom 25.01.13		Auswertung BEV Programm								
4	0,000042	0,000012	0,000030	0,800347	3,7E-05	-3,77E-05	1,0E-06	5,5E-05	0,69					
5	--	--	--	1,200554	3,6E-05	-2,93E-05	1,0E-06	5,0E-05	0,58					
				1,600801	3,3E-05	-9,10E-06	1,0E-06	4,5E-05	0,20					
				2,001048	2,1E-05	-8,70E-06	1,0E-06	3,6E-05	0,24					

*Die relative Messunsicherheit errechnet sich aus der Messunsicherheit der Messungen in der PTB, im BEV Wien und einem Unsicherheitsanteil aus Drift- und Temperaturverhalten (Temperaturdifferenz PTB - BEV Wien = 1 K) sowie der verwendeten K-NME.

Anhang

Ergebnisse der Vergleichsmessung zwischen PTB-Braunschweig und BEV Wien									
Kraftaufnehmer: D 10 kN SN: 051630022									
Messung in PTB				Messung im BEV Wien			Auswertung Programm PTB		
File:	008*	vom	30.10.2012	File:	008_1_BEV*	vom	11.12.2012		
Nullpunkt zu Beginn der Messung:		0,004793	mV/V	Nullpunkt zu Beginn der Messung:		0,004887	mV/V		
Nullpunkt am Ende der Messung:		0,004863	mV/V	Nullpunkt am Ende der Messung:		0,004933	mV/V		
				Auswertung PTB					
Kraft	Mittelwert	rel. Messuns.		Mittelwert	relative	relative	rel. Messuns.	relative Gesamt-	E_n
in kN	in mV/V	$k=2$		in mV/V	Messuns.	Abweichung	Drift/Temp.-Koeff.	messuns.*	
					$k=2$	BEV-PTB		$k=2$	
5	1,000171	2,1E-5		1,000179	2,2E-5	7,7E-06	1,0E-06	3,1E-05	0,25
6	1,200218	2,1E-5		1,200219	2,6E-5	1,1E-06	1,0E-06	3,3E-05	0,03
8	1,600321	2,1E-5		1,600328	2,6E-5	3,9E-06	1,0E-06	3,4E-05	0,12
10	2,000443	2,1E-5		2,000460	2,8E-5	8,6E-06	1,0E-06	3,4E-05	0,25
*Ref. Nr. 2 PTB Messung				Auswertung BEV					
				Messung im BEV Wien vom 11.12.12			Auswertung BEV Programm		
				1,000186	1,5E-05	1,51E-05	1,0E-06	2,6E-05	0,58
				1,200225	2,6E-05	6,18E-06	1,0E-06	3,3E-05	0,19
				1,600332	3,7E-05	6,88E-06	1,0E-06	4,2E-05	0,16
				2,000463	2,6E-05	1,02E-05	1,0E-06	3,3E-05	0,31
				Messung im BEV Wien vom 22.01.13			Auswertung BEV Programm		
				1,000199	2,3E-05	2,81E-05	1,0E-06	3,2E-05	0,89
				1,200246	3,0E-05	2,32E-05	1,0E-06	3,7E-05	0,63
				1,600376	4,0E-05	3,42E-05	1,0E-06	4,5E-05	0,76
				2,000460	2,9E-05	8,68E-06	1,0E-06	3,5E-05	0,25
Umkehrspannen									
Kraft	Umkehrspannen		Differenz der Umkehrspannen						
in kN	PTB	BEV Wien	in mV/V						
	in mV/V	in mV/V	in mV/V						
5	0,000052	0,000062	-0,000009						
6	0,000047	0,000046	0,000000						
8	0,000029	0,000024	0,000006						
10	--	--	--						

*Die relative Messunsicherheit errechnet sich aus der Messunsicherheit der Messungen in der PTB, im BEV Wien und einem Unsicherheitsanteil aus Drift- und Temperaturverhalten (Temperaturdifferenz PTB - BEV Wien = 1 K) sowie der verwendeten K-NME.

Ergebnisse der Vergleichsmessung zwischen PTB-Braunschweig und BEV Wien									
Kraftaufnehmer: D 20 kN SN: 40278									
Messung in PTB				Messung im BEV Wien			Auswertung Programm PTB		
File:	009	vom	25.10.2012	File:	009_BEV	vom	05.12.2012		
Nullpunkt zu Beginn der Messung:		-0,007754	mV/V	Nullpunkt zu Beginn der Messung:		-0,007791	mV/V		
Nullpunkt am Ende der Messung:		-0,007695	mV/V	Nullpunkt am Ende der Messung:		-0,007422	mV/V		
				Auswertung PTB					
Kraft	Mittelwert	rel. Messuns.		Mittelwert	relative	relative	rel. Messuns.	relative Gesamt-	E_n
in kN	in mV/V	$k=2$		in mV/V	Messuns.	Abweichung	Drift/Temp.-Koeff.	messuns.*	
					$k=2$	BEV-PTB		$k=2$	
10	1,002318	2,0E-5		1,002321	2,2E-5	3,6E-06	1,0E-06	3,0E-05	0,12
14	1,403368	2,0E-5		1,403381	2,2E-5	9,3E-06	1,0E-06	3,0E-05	0,31
16	1,603917	2,1E-5		1,603928	2,2E-5	6,5E-06	1,0E-06	3,0E-05	0,22
20	2,005029	2,1E-5		2,005054	2,1E-5	1,2E-05	1,0E-06	3,0E-05	0,42
				Auswertung BEV					
				Messung im BEV Wien vom 05.12.12			Auswertung BEV Programm		
				1,002303	2,5E-05	-1,48E-05	1,0E-06	3,3E-05	0,45
				1,403383	4,7E-05	1,09E-05	1,0E-06	5,2E-05	0,21
				1,603938	5,0E-05	1,28E-05	1,0E-06	5,4E-05	0,24
				2,005060	5,3E-05	1,54E-05	1,0E-06	5,7E-05	0,27
				Messung im BEV Wien vom 21.01.13			Auswertung BEV Programm		
				1,002345	2,6E-05	2,76E-05	1,0E-06	3,3E-05	0,82
				1,403355	4,8E-05	-9,48E-06	1,0E-06	5,2E-05	0,18
				1,603894	5,0E-05	-1,46E-05	1,0E-06	5,5E-05	0,27
				2,005018	5,3E-05	-5,75E-06	1,0E-06	5,7E-05	0,10
				Messung im BEV Wien vom 22.01.13			Auswertung BEV Programm		
				1,002338	2,5E-05	2,06E-05	1,0E-06	3,3E-05	0,63
				1,403382	4,7E-05	9,87E-06	1,0E-06	5,1E-05	0,19
				1,603924	5,0E-05	4,22E-06	1,0E-06	5,4E-05	0,08
				2,005051	5,3E-05	1,10E-05	1,0E-06	5,7E-05	0,19
Umkehrspannen									
Kraft	Umkehrspannen		Differenz der Umkehrspannen						
in kN	PTB	BEV Wien	in mV/V						
	in mV/V	in mV/V	in mV/V						
10	0,000177	0,000202	-0,000025						
14	0,000146	0,000173	-0,000027						
16	0,000106	0,000132	-0,000026						
20	--	--	--						

*Die relative Messunsicherheit errechnet sich aus der Messunsicherheit der Messungen in der PTB, im BEV Wien und einem Unsicherheitsanteil aus Drift- und Temperaturverhalten (Temperaturdifferenz PTB - BEV Wien = 1 K) sowie der verwendeten K-NME.

Anhang

Ergebnisse der Vergleichsmessung zwischen PTB-Braunschweig und BEV Wien										
Kraftaufnehmer: D 50 kN SN: 30835										
Messung in PTB				Messung im BEV Wien			Auswertung Programm PTB			
File: 011	vom 12.09.2012		File: 011_BEV		vom 04.12.2012					
Nullpunkt zu Beginn der Messung: -0,001557 mV/V		Nullpunkt zu Beginn der Messung: -0,001501 mV/V								
Nullpunkt am Ende der Messung: -0,001573 mV/V		Nullpunkt am Ende der Messung: -0,001535 mV/V								
Kraft in kN	Mittelwert in mV/V	rel. Messuns. k=2	Auswertung PTB		Mittelwert in mV/V	relative Messuns. k=2	relative Abweichung BEV-PTB	rel. Messuns. Drift/Temp.-Koeff.	relative Gesamt-messuns.* k=2	E _n
20	0,800982	2,0E-5			0,800986	2,1E-5	6,1E-06	1,0E-06	2,9E-05	0,21
30	1,201589	2,1E-5			1,201596	2,1E-5	5,4E-06	1,0E-06	2,9E-05	0,18
40	1,602277	2,1E-5			1,602312	2,0E-5	2,2E-05	1,0E-06	2,9E-05	0,77
50	2,003010	2,0E-5			2,003015	2,0E-5	2,7E-06	1,0E-06	2,9E-05	0,09
Umkehrspannen				Auswertung BEV						
				Messung im BEV Wien vom 04.12.12		Auswertung BEV Programm				
				0,800972		2,5E-5	-1,15E-05	1,0E-06	3,2E-05	0,36
				1,201585		2,4E-5	-3,63E-06	1,0E-06	3,2E-05	0,11
				1,602305		2,4E-5	1,76E-05	1,0E-06	3,2E-05	0,55
				2,003011		2,1E-5	4,30E-07	1,0E-06	3,0E-05	0,01
				Messung im BEV Wien vom 18.01.13		Auswertung BEV Programm				
				0,800980		2,5E-05	-1,70E-06	1,0E-06	3,2E-05	0,05
				1,201587		2,4E-05	-1,93E-06	1,0E-06	3,2E-05	0,06
				1,602310		2,5E-05	2,06E-05	1,0E-06	3,2E-05	0,64
				2,003018		2,1E-05	4,18E-06	1,0E-06	3,0E-05	0,14

*Die relative Messunsicherheit errechnet sich aus der Messunsicherheit der Messungen in der PTB, im BEV Wien und einem Unsicherheitsanteil aus Drift- und Temperaturverhalten (Temperaturdifferenz PTB - BEV Wien = 1 K) sowie der verwendeten K-NME.

Ergebnisse der Vergleichsmessung zwischen PTB-Braunschweig und BEV Wien										
Kraftaufnehmer: D 100 kN SN: 20701										
Messung in PTB Braunschweig				Messung im BEV Wien			Auswertung Programm PTB			
File: 013	vom 11.09.2012		File: 013_BEV		vom 04.12.2012					
Nullpunkt zu Beginn der Messung: -0,004936 mV/V		Nullpunkt zu Beginn der Messung: -0,004933 mV/V								
Nullpunkt am Ende der Messung: -0,004930 mV/V		Nullpunkt am Ende der Messung: -0,004922 mV/V								
DAKKS-DKD konforme Messung										
Kraft in kN	Mittelwert in mV/V	rel. Messuns. k=2	Auswertung PTB		Mittelwert in mV/V	relative Messuns. k=2	relative Abweichung BEV-PTB	rel. Messuns. Drift/Temp.-Koeff.	relative Gesamt-messuns.* k=2	E _n
50	0,999469	2,1E-5			0,999446	4,3E-5	-2,23E-05	1,0E-06	4,8E-05	0,46
60	1,199397	2,1E-5			1,199396	3,4E-5	-6,62E-07	1,0E-06	4,0E-05	0,02
80	1,599327	2,1E-5			1,599341	2,7E-5	8,72E-06	1,0E-06	3,4E-05	0,25
100	1,999299	2,0E-5			1,999304	3,0E-5	2,54E-06	1,0E-06	3,6E-05	0,07
				Auswertung BEV						
				Messung im BEV Wien vom 04.12.12		Auswertung BEV Programm				
				0,999451		2,1E-5	-1,71E-05	1,0E-06	3,0E-05	0,57
				1,199400		2,2E-5	2,76E-06	1,0E-06	3,0E-05	0,09
				1,599344		2,2E-5	1,06E-05	1,0E-06	3,0E-05	0,35
				1,999306		2,2E-5	3,23E-06	1,0E-06	3,0E-05	0,11
				Messung im BEV Wien vom 17.01.13		Auswertung BEV Programm				
				0,999464		2,1E-05	-4,81E-06	1,0E-06	3,0E-05	0,16
				1,199403		2,2E-05	5,15E-06	1,0E-06	3,0E-05	0,17
				1,599330		2,2E-05	1,77E-06	1,0E-06	3,0E-05	0,06
				1,999296		2,2E-05	-1,37E-06	1,0E-06	3,0E-05	0,05

*Die relative Messunsicherheit errechnet sich aus der Messunsicherheit der Messungen in der PTB, im BEV Wien und einem Unsicherheitsanteil aus Drift- und Temperaturverhalten (Temperaturdifferenz PTB - BEV Wien = 1 K) sowie der verwendeten K-NME.

Anhang

Ergebnisse der Vergleichsmessung zwischen PTB-Braunschweig und BEV Wien																																		
Kraftaufnehmer: D 500 kN SN: 43010 (Messbereich 250 kN)																																		
Messung in PTB					Messung im BEV Wien					Auswertung Programm PTB																								
File: 017 vom 17.10.2012					File: 017_BEV vom 12.12.2012																													
Nullpunkt zu Beginn der Messung: 0,000739 mV/V					Nullpunkt zu Beginn der Messung: 0,000755 mV/V																													
Nullpunkt am Ende der Messung: 0,000734 mV/V					Nullpunkt am Ende der Messung: 0,000736 mV/V																													
					Auswertung PTB																													
Kraft			Mittelwert		rel. Messuns.					Mittelwert			relative		relative		rel. Messuns.		relative Gesamt-		E _n													
in kN			in mV/V		k=2					in mV/V			Messuns.		Abweichung		Drift/Temp.-Koeff.		messuns.*															
										k=2			BEV-PTB				k=2																	
100			0,399748		2,1E-5					0,399758			2,4E-5		2,6E-05		1,0E-06		3,2E-05		0,81													
200			0,799506		2,0E-5					0,799517			2,1E-5		1,4E-05		1,0E-06		2,9E-05		0,47													
250			0,999404		2,0E-5					0,999415			2,0E-5		1,0E-05		1,0E-06		2,9E-05		0,37													
					Auswertung BEV																													
					Messung im BEV Wien vom 12.12.12					Auswertung BEV Programm																								
					0,399745					2,2E-05					-7,52E-06					1,0E-06					3,0E-05					0,25				
					0,799507					2,2E-05					2,22E-06					1,0E-06					3,0E-05					0,07				
					0,999410					2,4E-05					5,54E-06					1,0E-06					3,1E-05					0,18				
					Messung im BEV Wien vom 16.01.13					Auswertung BEV Programm																								
					0,399738					2,2E-05					-2,45E-05					1,0E-06					3,0E-05					0,81				
					0,799500					2,2E-05					-6,61E-06					1,0E-06					3,1E-05					0,22				
					0,999400					2,4E-05					-3,93E-06					1,0E-06					3,1E-05					0,13				
					Messung im BEV Wien vom 17.01.13					Auswertung BEV Programm																								
					0,399739					2,5E-05					-2,37E-05					1,0E-06					3,3E-05					0,73				
					0,799502					2,2E-05					-4,90E-06					1,0E-06					3,0E-05					0,16				
					0,999402					2,4E-05					-2,15E-06					1,0E-06					3,1E-05					0,07				
Umkehrspannen																																		
Kraft			Umkehrspannen			Differenz der Umkehrspannen																												
in kN			PTB		BEV Wien		in mV/V																											
			in mV/V		in mV/V		in mV/V																											
100			0,000055		0,000040		0,000015																											
200			0,000043		0,000035		0,000008																											
250			--		--		--																											

*Die relative Messunsicherheit errechnet sich aus der Messunsicherheit der Messungen in der PTB, im BEV Wien und einem Unsicherheitsanteil aus Drift- und Temperaturverhalten (Temperaturdifferenz PTB - BEV Wien = 1 K) sowie der verwendeten K-NME.