

**Realisierung und Anwendung eines kinematischen
Multi-Sensor-Meßsystems zur Bestimmung von
dynamischen Bauwerksverformungen**

Von der Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Dipl.-Phys. Rainer Petzoldt

aus Stuttgart

Hauptberichter: em. Prof. Dr.-Ing. Dr. sc. Techn. h.c. Dr. h.c.
Klaus Linkwitz
Mitberichter: Prof. i. R. Eberhard Luz
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Möhlenbrink
Tag der mündlichen Prüfung: 19. Oktober 2000

Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen der Universität Stuttgart

2001

**So eine Arbeit wird eigentlich nie fertig,
man muß sie für fertig erklären,
wenn man nach Zeit und Umständen
das Möglichste getan hat.**

Johann Wolfgang von Goethe
(Italienische Reise II, 16.3.1787)

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	6
KURZFASSUNG	7
ABSTRACT	7
1 EINLEITUNG	8
1.1 Allgemein	8
1.2 Zielsetzung der Arbeit	9
2 AUFGABENSTELLUNGEN FÜR KINEMATISCHE MESSUNGEN	10
2.1 Begriffsbestimmung	10
2.2 Klassifizierung	12
2.3 Kinematische Bauwerksmessungen	14
2.3.1 Einsatzgebiete für kinematische Messungen an Bauwerken	15
2.3.2 Besonderheiten bei kinematischen Bauwerksmessungen	16
2.3.3 Vorgehensweise für kinematische Bauwerksmessungen	17
2.4 Multi-Sensor-Messungen	18
2.4.1 Besonderheiten bei Multi-Sensor-Messungen	19
2.5 Meßkette	20
2.6 Sensorsysteme	21
2.6.1 Definitionen	21
2.6.2 Allgemeine Sensoreigenschaften	22
2.6.3 Sensoranforderungen	23
3 MATHEMATIK ZU KINEMATISCHEN MESSUNGEN	25
3.1 Abtasttheorem (Samplingtheorem)	25
3.2 Diskretisierung	26
3.3 Beispiel	27
3.4 Auswertung	29
3.4.1 Signalaufbereitung	29
3.4.2 Anpassung der Abtastrate	29
3.4.3 FIR Filter und IIR Filter	30
3.4.4 Fouriertransformation	31
4 HARDWARE FÜR KINEMATISCHE MESSUNGEN	33
4.1 Ausgewählte Sensoren	33
4.1.1 Wegaufnehmer	33
4.1.2 Elektronische Kameras (CCD, PSD)	34
4.1.3 Beschleunigungsmesser	34
4.1.4 Kreisel	35
4.1.5 Inertialnavigationssysteme	36
4.2 Sensorauswahl	36
4.3 Tiefpaß	37
4.4 Sempel & Hold-Glied	38
4.5 Multiplexer	38
4.6 A/D-Wandler	38
4.6.1 Direkte Wandler	39
4.6.2 Spannungs-Frequenz-Wandler	39
4.6.3 Single-Slope-Wandler	40
4.6.4 Dual-Slope	40
4.6.5 Echt integrierende Wandler	41
4.6.6 Parallele Wandler	43
4.6.7 D/A-Wandler mit Komparator	44

4.7	Datenerfassung und Speicherung	44
5	AUFBAU EINES MULTI-SENSOR-MEßSYSTEMS	45
5.1	Konzeption des Meßsystems	45
5.1.1	Dezentrales Datenerfassungssystem (DDES).....	46
5.1.2	Zentrales Datenerfassungssystem (ZDES)	47
5.2	Einsetzbare Sensorsysteme	48
5.3	Synchronisation	49
6	KALIBRIERMETHODEN	50
6.1	Grundlagen	50
6.2	Die 24-Lagen-Kalibrierung	51
6.2.1	Problembeschreibung	51
6.2.2	Definitionen	53
6.2.3	Lösungsansatz	56
6.2.4	Beschreibung der Hardware	58
6.2.5	Theorie	59
6.2.6	Bestimmung der Schiefwinkligkeit	69
6.2.7	Durchführung einer 24-Lagen-Kalibrierung	71
6.2.8	Genauigkeit	76
6.2.9	Zusammenfassung	77
7	DEFORMATION EINER EISENBAHNBRÜCKE DURCH ZUGÜBERFAHRT ..	78
7.1	Problembeschreibung und Aufgabenstellung	78
7.2	Realisierung des Multi-Sensor-Meßsystems	80
7.2.1	Konzept der Messung	80
7.2.2	Beschreibung der verwendeten Sensoren.....	81
7.2.3	Beschreibung der Datenerfassung	86
7.3	Durchführung der Messungen	87
7.3.1	Kalibrierung	87
7.3.2	Deformation durch Zugüberfahrten	87
7.3.3	Schwingungsmessungen.....	89
8	THEORETISCHE UNTERSUCHUNG DER BRÜCKENVERFORMUNG	90
8.1	Koordinatensystem	90
8.2	Biegung	91
8.2.1	Schwingungseigenformen	92
8.2.2	Biegelinie der Brücke durch ihr Eigengewicht.....	95
8.2.3	Biegelinie der Brücke bei Belastung	95
8.2.4	Deformation durch Zugüberfahrt	98
8.3	Torsion	100
8.3.1	Torsionsanteil der Hauptträger	100
8.3.2	Torsionsanteil der Fahrbahn.....	100
8.3.3	Torsion bei Einzellast	104
8.3.4	Torsion durch Zugüberfahrt.....	105
9	AUSWERTUNG DER MESSUNG UND VERGLEICH MIT THEORIE	108
9.1	Zeitsynchronisation	108
9.2	Deformationsmessungen während Zugüberfahrt	108
9.2.1	Auswertung der Videodaten	108
9.2.2	Auswertung der Wegaufnehmerdaten	110
9.2.3	Deformation der Brücke	111
9.3	Ergebnisse der Deformationsmessungen und Vergleich mit der Theorie	112
9.3.1	Biegung	112
9.3.2	Torsion	114
9.4	Geschwindigkeitsabhängigkeit der maximalen Deformation	116
9.5	Schwingungsmessungen	116
9.5.1	Biegeschwingung	117
9.5.2	Torsionsschwingung.....	124

9.6	Ergebnisse der Schwingungsmessungen und Vergleich mit der Theorie	125
9.6.1	Biegeschwingungen	125
9.6.2	Torsionsschwingungen.....	126
10	ZUSAMMENFASSUNG	108
11	VERZEICHNISSE	128
11.1	Literaturverzeichnis	128
11.2	Abbildungsverzeichnis	136

Abkürzungsverzeichnis

ADC	Analog-Digital-Konverter
CCD	Charge Coupled Device
CUPT	Coordinate Update Point
DES	Datenerfassungssystem
DDES	Dezentrales Datenerfassungssystem
DFT	Diskrete Fouriertransformation
DGL	Differentialgleichung
DGM	Digitales Gelände Modell
DMS	Dehnmeßstreifen
EDM	electro-optic Distance Measurement
ESINS	Experimentelles Strapdown Inertialnavigationssystem
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFT	Fast Fouriertransformation
FGMT	Forschungsgesellschaft für Geodätische Meß- und Rechentechnik, Leonberg
FIR	Finite Impulse Response
FOG	Fiber Optic Gyro
GPS	Global Positioning System
IABSE	International Association for Bridge and Structural Engineering
IAGB	Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen, Universität Stuttgart
IIR	Infinite Impulse Response
IMU	Inertial Measurement Unit (Sensoreinheit)
INS	Inertialnavigationssystem
MSM	Multi-Sensor-Messungen
MSMS	Multi-Sensor-Meßsystem
NEMPLA	Neigungsmeß-Platte
PCM	Pulse Code Modulation
PSD	Position Sensitive Device
RLG	Ring Laser Gyro
S&H	Sample-and-Hold-Glied
STAB2D	Programm zur Berechnung von Stabtragwerken (Institut für Statik; Uni Hannover)
ZDES	Zentrales Datenerfassungssystem
ZUPT	Zero Velocity Update Point

Kurzfassung

Durch die Erweiterung der geodätischen Aufgabengebiete, insbesondere in der Ingenieurvermessung, werden zukünftig vermehrt interdisziplinäre Lösungen verlangt, die von einer Fachrichtung alleine nicht geliefert werden können. Dadurch entstehen zum Teil einfachere, schnellere und trotzdem genaue Methoden. Dies wird in der vorliegenden Arbeit veranschaulicht.

Dazu werden zuerst die aus den Einzeldisziplinen stammenden Verfahren klassifiziert und anschließend ein auf diesen Verfahren basierendes neu entwickeltes Feldkalibrierverfahren für Inertialnavigationssysteme vorgestellt. Es basiert auf der Messung des Erdschwerevektors und der Erddrehrate in 24 Lagen und erlaubt die Bestimmung der Kalibrierparameter Offset, Skalenfaktor und Fehlausrichtungswinkel. Die erreichbare Genauigkeit liegt für Beschleunigungsmesser in der gleichen Größenordnung wie bei aufwendigeren Laborkalibrierungen, für Kreisel ergibt sich, bedingt durch die sehr kleine Erddrehrate, eine um ein bis drei Größenordnungen schlechtere Genauigkeit.

Im zweiten Schwerpunkt der Arbeit wird am Beispiel der Messung der Deformation einer Eisenbahnbrücke während der Überfahrt eines Zuges gezeigt, daß neben der eigentlichen Messung auch die Auswertung der Meßergebnisse von einer Zusammenarbeit verschiedener Fachrichtungen profitiert. Die in den ersten Kapiteln beschriebenen Methoden werden konkret angewandt. Ausgehend von der Problembeschreibung werden Konzeption und Realisierung des Multi-Sensor-Meßsystems entwickelt und die Durchführung und Auswertung der Messungen beschrieben. Die Ergebnisse werden mit dem theoretischen Modell verglichen, wobei trotz der nur parametrischen Zeitabhängigkeit eine sehr gute Übereinstimmung festgestellt wird. Dies zeigt, daß an einem Modell, je nach Art der Fragestellung, viele wohlüberlegte Vereinfachungen vorgenommen werden können, ohne daß es seine Aussagekraft verliert.

Abstract

The enlarged geodetic fields of work - especially the field of engineer geodesy - will require more and more solutions which cannot be provided any more by only one discipline. These solutions call for the cooperation of the separate departments and will lead in part to easier and faster methods which are nevertheless exact. The present thesis illustrates this.

In the first part, the methods coming from the separate disciplines are classified. Then, based on these methods, a new field calibration method for inertial navigation systems is presented. It bases on the measurement of the gravity vector and the earth rotation rate in 24 faces and determines the calibration parameters „offset“, „scale factor“ and „misalignment angle“. For accelerometers, the accuracy which can be achieved is on the scale of a more complicated calibration in a laboratory. For gyros, the accuracy is worse by the factor 10 to 1000, which is due to the very small earth rotation rate.

The second part of the thesis gives an example of a measurement. The deformation of a railway bridge is measured when a train is passing. This example shows how the cooperation of experts of separate departments benefits not only the measuring method itself, but also its evaluation. The methods which have been described in the first part, are applied now. Starting with the description of the problem, the design of a multi-sensor measurement system is developed and then realized. It is described how the measurements are carried out and how they are evaluated. Results are compared with the theoretically calculated values. You will find that they correspond very well, in spite of the fact that time is considered only parametrically. This shows that, depending on the problem given, you can make a lot of well-considered simplifications on a model without losing its validity.

1 Einleitung

1.1 Allgemein

In den letzten Jahren hat sich das Aufgabengebiet der Geodäsie stark erweitert. Standen früher die Landesvermessung, die Erdmessung, die Land- bzw. Feldvermessung und die baubegleitenden Messungen im Vordergrund, so gewinnt heute in zunehmendem Maße die Ingenieurgeodäsie an Bedeutung, d.h. alle im Rahmen von Ingenieurprojekten durchgeführten Vermessungsaufgaben, die im allgemeinen nicht nur die klassischen Meßverfahren beinhalten, sondern auch neue interdisziplinäre Lösungswege verlangen. Dabei werden nicht mehr bloß die statischen Maße eines Bauwerks bestimmt, vielmehr ist deren dynamisches Verhalten von wachsendem Interesse. Um dieses Verhalten zu erfassen, sind nicht nur Kenntnisse der technischen Statik und Dynamik nötig; zusätzlich wird auch Wissen aus den Gebieten Physik, Bauingenieurwesen, Meß- und Regelungstechnik, Elektronik und Informatik benötigt. Neben der Aufstellung eines physikalischen Modells ist die Verifikation desselben durch Messungen an realen Bauwerken ein Schwerpunkt der geodätischen Arbeiten auf diesem Gebiet (Deutsche Reichsbahn, 1933; Bojen, 1983; Pelzer, 1987; Heunecke, 1995; Kuhlmann, 1996).

Deformationsmessungen werden an Staudämmen (Huggenberger, 1951; Werner, 1966; Penman und Charles, 1971) schon lange durchgeführt, allerdings geht der Trend bei der Erstellung großer Bauwerke seit einigen Jahren zu immer grazileren Konstruktionen (Obrebski, 1996; Reissig, 1996), deren Vorteile im geringeren Materialverbrauch und der gesteigerten ästhetischen Wirkung liegen, deren Nachteil aber die größere Materialbeanspruchung ist. Deshalb haben in den letzten Jahren Deformationsmeßverfahren auch an Brücken, Türmen und Hochhäusern an Bedeutung gewonnen (Möhlenbrink und Krystek, 1984; IABSE, 1987; Mönicke und Heck, 1992; Hollmann et.al., 1994).

Durch die stärkere Materialbeanspruchung sind die bisher verwendeten Verfahren nicht mehr ausreichend, die im wesentlichen langperiodische Verformungen über längere Zeiträume hinweg bestimmten. Dabei kamen zum einen die epochenweise geometrische Vermessung der Objekte mittels geodätischer Netze, zum anderen Neigungsmesser, Lote, Dehnungsmeßstreifen, Extensometer, Kraftmesser und andere klassische Sensoren zur Anwendung, die vor allem in Staudämmen eingesetzt wurden (Schlemmer, 1996 ; Möhlenbrink und Welsch, 1984).

Während die Strukturen der Bauwerke immer feiner und graziler wurden, nahmen die Belastungen zum Teil sogar zu, so daß neben der Untersuchung der Statik (Szabó, 1977; Wagner und Erlhof, 1984) auch eine intensive Betrachtung der Dynamik von Baukonstruktionen erforderlich wurde (Speier, 1960; Nowacki 1974; Krämer 1985; Pahnke, 1991; Flesch, 1993; Synold, 1995), da diese leichten Bauwerke durch die niedrigeren Eigenfrequenzen bereits durch natürliche Anregungen oder Verkehrsbelastung nahe der Resonanzfrequenz zum Schwingen gebracht werden. So können durch Wind angeregte Schwingungen Brücken zum Einsturz bringen¹ oder Erdbeben ein Hochhaus so anregen, daß es in sich zusammenstürzt (Ewert, 1992; Manolis, 1997).

Die theoretische Behandlung der Dynamik von komplizierten Bauwerken (Bojen, 1983; Pelzer, 1987; Kuhlmann und Pelzer, 1997) ist nicht trivial und sollte möglichst durch Messungen verifiziert werden. Die dazu eingesetzten Verfahren zur Erfassung schneller Bauwerksbewegungen basieren hauptsächlich auf Wegmessungen mit Laserentfernungsmessern oder Extensometern, auf der Auswertung von elektronischen Kameras oder auf dem Einsatz von Inertialsensoren. In Einzelfällen werden auch Interferometer, Ultraschallentfernungsmesser,

¹ Die Hängebrücke von Tacoma Narrows (USA) wurde am 7.11.1940 durch Windturbulenzen so angeregt, daß sie einstürzte.

GPS und konventionelle Tachymetermessungen eingesetzt (Joeckel und Stober, 1995; Welsch et.al., 1985).

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Erst in den letzten Jahren machen auch die Messungen der Bewegungen von großen Bauwerken einen nennenswerten Anteil der von Geodäten durchgeführten Aufgaben aus. Dabei werden meistens Multi-Sensor-Meßsysteme eingesetzt, über deren Einsatzgebiete und Verwendung im klassischen Vermessungswesen nur wenig Erfahrungen vorliegen.

Ziel der Arbeit ist es, den Einsatz von kinematischen Messungen und speziell kinematischen Multi-Sensor-Messungen bei der Lösung von ingenieurgeodätischen Aufgaben zu beschreiben. Diese Verfahren sind innerhalb der Geodäsie bisher weniger verbreitet. Bei vielen zukünftigen Problemstellungen können sie aber einfacher zu aussagekräftigen Lösungen führen.

Aus diesem Grund wird **im ersten Teil dieser Arbeit (Kapitel 2)** ein kurzer Einblick in die Problematik der kinematischen Meßtechnik gegeben, außerdem werden die verwendeten Begriffe definiert und gegeneinander abgegrenzt sowie mögliche Einsatzgebiete aufgezeigt.

Im zweiten Teil (Kapitel 3 bis 5) werden die bisher in der geodätischen Literatur nicht so verbreiteten mathematischen und meßtechnischen Werkzeuge vorgestellt und die möglichen Konzepte für Multi-Sensor-Meßsysteme dargelegt.

Der dritte Teil bildet den Schwerpunkt der Arbeit. Es wird an Beispielen die Vorgehensweise für den Einsatz von kinematischen Multi-Sensor-Meßsystemen dargestellt. Ein am IAGB (Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen, Universität Stuttgart) entwickeltes Feldkalibrierverfahren für Inertialnavigationssysteme wird vorgestellt, und in einem Beispiel werden die in den ersten beiden Teilen vorgestellten Verfahren angewandt.

2 Aufgabenstellungen für kinematische Messungen

2.1 Begriffsbestimmung

Die für die Untersuchung von Deformationen verwendeten Teilwissenschaften können nach folgendem Schema eingeteilt werden:

		Betrachtung von Kräften	
		Nein	Ja
Betrachtung von Zeitabhängigkeiten	Nein	Geometrie	Statik
	Ja	Kinematik	Dynamik

Abbildung 2.1: Verwendete Teilwissenschaften bei Deformationsmessungen

Betrachtet man diese Einteilung in Hinblick auf Deformationsmessungen, so ergeben sich folgende Beschreibungen:

Geometrie

Es werden keine Änderungen der Deformation und keine Kräfte betrachtet.

Statik

Kräfte werden als Ursache für Deformationen betrachtet, allerdings keine Änderungen der Deformation.

Kinematik

Die Änderungen der Deformation werden untersucht, allerdings nicht die Kräfte als Ursachen dieser Änderungen.

In HÜTTE, "Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften" ist Kinematik folgendermaßen definiert:

"Gegenstand der Kinematik ist die Beschreibung der Lagen und Bewegungen von Punkten und Körpern mit Mitteln der analytischen Geometrie. Dabei spielen weder physikalische Körpereigenschaften noch Kräfte als Ursachen von Bewegungen eine Rolle. ..."

Beschreibung D.h. die Kinematik ist eine reine Beschreibung der Bewegung, Fragen nach den Ursachen oder der Vorhersagbarkeit von Bewegungszuständen kann sie nicht beantworten.

Lage Dies ist bei Punkten die Position im Raum bei starren Körpern kommt zusätzlich die Orientierung hinzu. Bei deformierbaren Körpern muß auch deren Form angegeben werden.

Bewegungen Beschrieben wird die Lage zu jedem beliebigen Zeitpunkt. Damit geht die Zeit in die Betrachtung ein und die gesamte Bewegung ist festgelegt.

Punkte In der Praxis kommen nie "Punkte" vor, doch kann im Modell ein Körper oft auf Punkte reduziert oder die Lage eines starren Körpers durch einige repräsentative Punkte beschrieben werden.

Körper Ein Körper ist ein beliebiges materielles Objekt. Es wird zwischen starren Körpern und deformierbaren Körpern unterschieden. Starre Körper haben 6 Freiheitsgrade (Lage und Orientierung), bei deformierbaren Körpern kommen noch zusätzliche innere Freiheitsgrade für die Form hinzu.

Dynamik

Die Dynamik ist das Teilgebiet der Mechanik, das Bewegungen unter dem Einfluß von Kräften untersucht.

Sowohl die Änderungen der Deformation sowie die Kräfte als Ursache der Änderungen werden betrachtet.

Folgende Begriffe werden in dieser Arbeit verwendet:

Toleranzen

Die Abweichungen des Istwertes vom Sollwert wird als Toleranz bezeichnet.

Genauigkeit

Als Genauigkeit wird die Standardabweichung des wahren Fehlers bezeichnet. Der wahre Fehler ist (z.B. nach Linkwitz, 1991) die Differenz von wahren Wert und gemessenem Wert.

Robustheit von Sensoren

Ein Sensor wird in dieser Arbeit als Robust bezeichnet, wenn der Einfluß von Störgrößen auf das Ausgangssignal klein im Vergleich zur erreichbaren Genauigkeit ist. Störgrößen können mechanische Beanspruchungen, elektrische Effekte und die Wirkung von externen physikalischen Größen (z.B. Beschleunigungen auf mech. Kreisel) sein.

Dynamisches Bauwerksmodell

In dieser Arbeit wird ein mathematisches Modell, welches ausgehend vom zeitlichen Verlauf der Lasten und internen (dynamischen) Parametern den zeitlichen Verlauf der Deformation eines Bauwerks liefern kann, als dynamisches Bauwerksmodell bezeichnet.

Dynamische Parameter

Die internen Parameter eines dynamischen Bauwerksmodells werden hier als dynamische Parameter bezeichnet. Dies sind u.a.: Eigenfrequenzen, Dämpfungen, ...

System

Als System wird hier eine bezüglich der interessierenden physikalischen Eigenschaften abgeschlossene Einheit bezeichnet.

Physikalischer Zustand

Als physikalischer Zustand wird hier die Summe aller interessierenden physikalischen Eigenschaften eines Systems bezeichnet.

Physikalische Größe

Eine physikalische Größe ist ein Wert, der eine physikalische Eigenschaft eindeutig beschreibt. Dies ist z.B. Druck, Beschleunigung, Masse, Temperatur, ...

Meßsignal

Ein Meßsignal ist die Folge von zu aufeinanderfolgenden Zeitpunkten gemessenen Werten einer physikalischen Größe.

Sensorsystem

Ein Sensorsystem dient der Erfassung einer physikalischen Größe und Transformation in eine für die Datenerfassung geeignete Form. Dies ist meistens ein elektrisches Signal, kann aber in Spezialfällen auch in anderer Form, z.B. Licht in einer Glasfaser,

bereitgestellt werden. Eine genauere Untergliederung eines Sensorsystems in Sensor und Sensorelement wird in Kapitel 2.6 vorgenommen.

Hauptsensor

In dieser Arbeit wird ein Sensor als Hauptsensor bezeichnet, wenn aus seinen Daten direkt oder indirekt die gewünschte Information gewonnen werden kann. (Im Gegensatz zum Hilfssensor)

Hilfssensor

In dieser Arbeit wird ein Sensor als Hilfssensor bezeichnet, wenn seine Daten nur für die Kalibrierung von anderen (Haupt-)Sensoren (z.B. interne Temperatursensoren) oder für interne Gerätefunktionen benötigt werden (z.B. elektronische Libellen im Theodolit).

Datenerfassung

Die Datenerfassung erhält die von den angeschlossenen Sensorsystemen gelieferten Signale und speichert diese in geeigneter Form auf einem Speichermedium ab.

Datenerfassungssystem

Das Datenerfassungssystem besteht aus den Sensorsystemen, den zugehörigen Datenerfassungen und der Speichereinheit.

Datenauswertung

In der Datenauswertung werden die erfaßten Meßwerte in der im Systemmodell beschriebenen Weise miteinander verknüpft, um die interessierenden physikalischen Größen zu erhalten.

Multi-Sensor-Meßsystem

Ein Multi-Sensor-Meßsystem ist ein Datenerfassungssystem mit mehreren unterschiedlichen Sensorsystemen, die verschiedene physikalische Eigenschaften eines Systems erfassen.

2.2 Klassifizierung

Modelle

Ein zu untersuchendes Objekt kann als physikalisches Filter gedeutet werden, dies wird z.B. in Heunecke (1995) und Welsch (1996) dargestellt. Die äußeren Lasten und Kräfte entsprechen den Eingangssignalen, das Filter dem zu untersuchenden Bauwerk und die Deformationen den Ausgangssignalen.

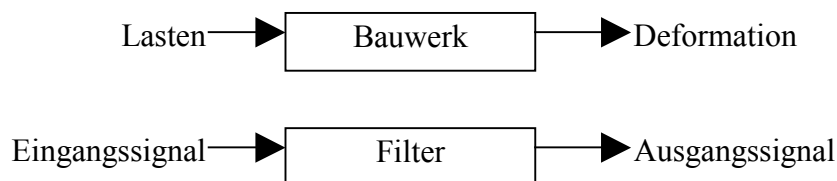


Abbildung 2.2: Bauwerk als dynamisches System

Dynamisches System

Eine Änderung der Lasten (Eingangssignal) löst einen zeitabhängigen Prozeß von Anpassungs- und Ausgleichsvorgängen aus und bewirkt damit eine zeitverzögerte Änderung der Deformation (Ausgangssignal). Es handelt sich dabei um ein System, welches Energie aufnehmen, speichern und wieder abgeben kann. Solche Systeme werden in der Systemtheorie als „dynamische Systeme“ bezeichnet. Sie reagieren immer kausal, d.h. eine Änderung des Eingangssignals kann sich erst zu einem späteren Zeitpunkt auf das Ausgangssignal auswirken.

Statisches System

Systeme, deren Ausgangssignale sich nicht oder nur sehr langsam ändern bzw. die verzögerungsfrei auf Eingangssignaländerungen reagieren, werden als Identitätssysteme bzw. „statische Systeme“ bezeichnet.

Kinematisches System

Werden bei einem System nur die zeitabhängigen Ausgangssignale betrachtet, ohne die Ursachen dafür (die Eingangssignale) zu berücksichtigen, so bezeichnet man ein solches als „kinematisches System“.

Zur Auswertung der an obigen Systemen erfaßten Meßdaten werden die entsprechenden Modelle verwendet. Diese werden in der vorliegenden Arbeit entsprechend dem Vorschlag des 'Ad Hoc Comitee on Classification of Deformation Models and Terminology' (Pfeufer, 1993) verwendet. Eine übersichtliche Darstellungsart nach Heunecke (1994 und 1995) und Kuhlmann und Pelzer (1997) wird in Abbildung 2.3 gezeigt.

		Deformationen sind Funktionen der erzeugenden Kräfte	
		Nein	Ja
Deformationen sind Funktionen der Zeit	Nein	Identitätsmodell	statisches Deformationsmodell
	Ja	kinematisches Deformationsmodell	dynamisches Deformationsmodell
		beschreibende Modelle	kausale Modelle

Abbildung 2.3: Verbreitete Klassifizierung von Deformationsmodellen, nach (Pfeufer, 1993) und Heunecke (1994)

Die traditionelle geodätische Deformationsanalyse beschäftigte sich nur mit kinematischen Systemen und dem Identitätsmodell, d.h. die Deformationen wurden betrachtet, ohne deren Ursachen zu berücksichtigen. Die in Raum und Zeit kontinuierlichen Objekte wurden dabei durch ausgewählte Punkte repräsentiert (Raumdiskretisierung) und die Deformation durch die Verschiebung dieser Punkte zu bestimmten Zeitpunkten erfaßt (Zeitdiskretisierung).

Diese Betrachtungsweise entspricht nicht mehr dem heutigen Verständnis der Geodäsie und der Ingenieurvermessung. Die Ergebnisse einer Deformationsanalyse sollten heutzutage in einem größeren Zusammenhang gesehen werden, in dem auch die Einflußgrößen und die physikalischen Eigenschaften der Systeme betrachtet werden.

Meßsysteme

Im folgenden sollen die in der Bauwerksvermessung eingesetzten Meßinstrumente in 2 Klassen eingeteilt werden: In statische und in kinematische Meßsysteme (nicht zu verwechseln mit den oben erwähnten statischen bzw. kinematischen Systemen)

Als statische Meßsysteme werden in dieser Arbeit solche bezeichnet, deren Meßfrequenzen unter 0,1 Hz liegen, oder bei denen für jede Messung manuelle Einstellungen vorgenommen werden müssen (z.B. die manuelle Zieleinstellung bei Theodoliten).

Als kinematische Meßsysteme werden hier solche bezeichnet, deren Meßfrequenzen größer als 0,1 Hz sind und die vollständig autonom messen können.

Ein anderes Unterscheidungsmerkmal ist, ob das Meßsystem aus Hauptsensoren mit einem einheitlichen Wirkprinzip besteht (Einzelsensor), oder ob Sensoren mit unterschiedlichen Wirkprinzipien zusammengefaßt sind. In Kapitel 5 wird näher auf Multi-Sensor-Meßsysteme eingegangen. Für diese Betrachtungsweise spielen Hilfssensoren keine Rolle.

	statische Meßsysteme	kinematische Meßsysteme
Einzelsensor	Theodolit, Nivellierinstrument, Extensometer, Lot, ...	Wegaufnehmer, Entfernungsmesser, elektronische Kamera, Beschleunigungsmesser, Dehnmeßstreifen, ...
Multi-Sensor	Tachymeter, ...	Inertialnavigationssystem, Kombination aus obigen Sensoren (MSMS), ...

Abbildung 2.4: Klassifizierung der Meßsysteme

Die klassischen geodätischen Meßsysteme sind praktisch alle nur für statische Messungen geeignet. Die meisten Systeme, wie Theodolit, Nivellierinstrument und Extensometer besitzen lediglich einen Hauptsensortyp. Eine Ausnahme hiervon sind Tachymeter, welche aus den Teilkreissystemen zur Richtungsmessung und den Entfernungsmessern zur Streckenmessung bestehen. Sie können also als Multi-Sensor Systeme bezeichnet werden.

Kinematische Meßsysteme wie Wegaufnehmer, Entfernungsmesser, Kameras, Beschleunigungsmesser, Dehnmeßstreifen und Kreisel werden schon lange bei geodätischen Messungen benutzt. Die Kombination dieser Sensoren zu einem einzigen Meßsystem, einem Multi-Sensor-Meßsystem (MSMS) wird nur selten vorgenommen, selbst wenn verschiedene Sensortypen zum Einsatz kommen.

2.3 Kinematische Bauwerksmessungen

Während des Baus müssen alle Bauwerke auf eine Übereinstimmung mit den Bauplänen innerhalb der vorgegebenen Toleranzen überprüft werden. Dazu werden normalerweise die üblichen statischen geodätischen Meßverfahren (z.B. Tachymetrie, Nivellement) eingesetzt, um die Einhaltung der geplanten Geometrie zu kontrollieren.

Große Bauwerke wie Brücken, Dämme, Tunnel, Türme und Hochhäuser müssen auch nach ihrer Fertigstellung ständig überwacht werden. Dies geschieht zum einen durch manuelle Sichtung, wodurch z.B. Korrosion oder Materialfehler wie Risse und grobe Deformationen erkannt werden können; allerdings ist diese Prüfung nur an einsehbaren Stellen möglich. Zum anderen kann, wie schon beim Bau, die Geometrie gemessen und mit der direkt nach dem Bau erfaßten verglichen werden. Dieses Verfahren ist recht aufwendig und liefert nur Änderungen der Geometrie (Penman und Charles, 1971). Die dabei erreichbare Genauigkeit von einigen mm reicht bei vielen Bauwerken nicht aus, um eine Aussage über die meist kleinen Deformationen und damit den Zustand des Bauwerks machen zu können.

Bei vielen Bauwerken werden daher bereits während des Baus Vorrichtungen zur Erfassung von Deformationen eingebaut. Dies ist vor allem bei großen Staudämmen (Huggenberger, 1951) und Brücken (IABSE, 1987) der Fall. Hier kommen meist statische Meßverfahren wie Lote, Extensometer, Neigungsmesser, Dehnungsmeßstreifen und Kraftmesser zum Einsatz. Diese

Sensoren werden im allgemeinen nur epochenweise ausgewertet, d.h. in Abständen von Wochen oder Monaten auf Veränderungen untersucht.

Kinematische Messungen an Bauwerken sind bisher weniger üblich und beschränken sich dann meist auf Beschleunigungsmessungen zur Erfassung von Verkehrslasten (Brücken, Dämme) oder Anemometer zur Bestimmung von Windgeschwindigkeit und -richtung (Brücken). Kinematische Messungen können viele zusätzliche Informationen liefern, welche Aufschluß über den Zustand der Brücke geben. Außerdem können durch solche kinematischen Messungen die im Modell vorhandenen dynamischen Parameter bestimmt und damit das Modell verifiziert werden.

Kinematische Messungen liefern Informationen über den geometrischen Zustand des Objektes zu jedem Zeitpunkt. Materialeigenschaften, Spannungen, Druck- und Temperaturverhältnisse sowie weitere innere Eigenschaften des Objekts spielen keine Rolle. Es wird nur seine Geometrie und deren zeitliche Änderung beschrieben. Bei rein kinematischen Messungen können Temperaturen und sonstige Zusatzinformationen allerdings für die Kalibrierung der Meßkette benötigt werden.

Die inneren Eigenschaften des Objekts wie Material, Struktur, Temperatur, Druckverhältnisse, Spannungen, usw. werden erst bei einer Auswertung der kinematischen Messungen mit einem dynamischen Modell benötigt. Hier können auch nichtgeometrische Objekteigenschaften benötigt werden, die dann zusätzlich zu messen sind. Oft führt die Änderung von inneren Eigenschaften zu einer Deformation des Bauwerks und damit zu einer geänderten Geometrie.

In dieser Arbeit wird der Begriff kinematische Messung als Gegensatz zu statischer Messung betrachtet, wobei die Abgrenzung zwischen beiden etwas fließend ist. Als statisch werden alle Messungen bezeichnet, bei denen sich der Meßwert während der Durchführung der Messung nicht ändert oder diese Änderung nicht die interessierende Komponente ist. Bei der Bauwerksvermessung sind das die Messungen, die mit den klassischen geodätischen Meßverfahren durchgeführt werden können. Bei kinematischen Messungen dagegen ist gerade die Änderung des Meßwertes während der Messung von Interesse. Als groben Richtwert für die Abgrenzung zwischen den beiden Meßverfahren kann folgende Regel dienen: Ist die Periodendauer der Bauwerksbewegung größer als einige Stunden, so ist eine statische Messung zu machen, sind sie kleiner als einige Minuten, so muß eine kinematische Messung durchgeführt werden.

2.3.1 Einsatzgebiete für kinematische Messungen an Bauwerken

Von wenigen Ausnahmen wie z.B. Klappbrücken abgesehen sollten alle großen Bauwerke Idealerweise statisch sein, d.h. eine Änderung der Geometrie ist zur Erfüllung ihrer Funktion nicht erforderlich. Allerdings ist eine gewisse Beweglichkeit oft erwünscht, um angreifenden Störkräften ausweichen zu können. So werden Hochhäuser meist auf Stelzen gestellt, um durch Erdbeben hervorgerufene Beschleunigungen und die dadurch erzeugten inneren Kräfte durch gedämpfte Schwingungen abbauen zu können. Genauso werden Brücken nicht extrem starr ausgelegt, um den angreifenden Wind- und Verkehrslasten nachgeben zu können. Dies liegt daran, daß „weiche“ Konstruktionen bei gleicher Spannung mehr innere elastische Verformungsenergie aufnehmen können als „harte“ Körper, bevor die Bruchgrenze erreicht wird.

Von diesem Gesichtspunkt aus ist ein Bauwerk möglichst „weich“ zu konstruieren, für seine Funktion, die ja statisch sein soll, ist eine „harte“ Konstruktion vorzuziehen. Die Ausführung des Bauwerks beinhaltet also einen Kompromiß: Das Bauwerk muß so „weich“ sein, daß es störende Umwelteinflüsse wie Wind oder Erdbeben unbeschadet übersteht, andererseits soll die Funktion durch diese „Weichheit“ nicht beeinträchtigt werden, z.B. darf sich eine Eisenbahnbrücke nicht so weit durchbiegen, daß ein darüberfahrender Zug entgleisen könnte.

Aus den obigen beiden Absätzen geht hervor, daß jedes Bauwerk eine gewisse Beweglichkeit zulassen muß. Die dabei ausgeführten Bewegungen können mit kinematischen Meßverfahren bestimmt und mit den erlaubten Bewegungen verglichen werden. Durch mehrere Messungen im Abstand von einigen Jahren können Veränderungen der dynamischen Brückenparameter wie die Eigenfrequenzen, die dynamischen Verformungen bei Belastungen oder die Dämpfungsfaktoren erfaßt werden.

Ein anderes Einsatzgebiet ist die Messung von gewollten Bauwerksbewegungen. Dies kann z.B. die Kontrolle der Verschiebung einer im Taktschiebeverfahren gebauten Brücke während des Baus sein oder die Überprüfung der beweglichen Teile von nicht statischen Bauwerken wie Klappbrücken oder Schleusen.

2.3.2 Besonderheiten bei kinematischen Bauwerksmessungen

Bei der Planung und Durchführung von kinematischen Messungen sind an die Sensoren sowie die Datenerfassung und -auswertung einige zusätzliche Anforderungen zu stellen, die bei konventionellen statischen Messungen keine Rolle spielen. Diese zusätzlichen Anforderungen werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

Jeder Messung muß ein genau definierter **Meßzeitpunkt** zugeordnet sein. Reicht bei statischen Messungen meist eine auf einige Sekunden genaue Zeitangabe aus, so muß bei kinematischen Messungen jedem einzelnen Meßwert ein Zeitpunkt zugeordnet sein, der oft auf einige ms genau bestimmt sein muß. Größtenteils reicht eine relative Zeitangabe aus, die sich auf den ersten Meßwert bezieht; es gibt aber auch Anwendungen, bei denen die absolute Zeit wichtig ist. Werden die Meßwerte in konstanten Zeitabständen T erfaßt, so erübrigt sich eine Erfassung der Meßzeitpunkte t , da diese aus der Nummer des Meßwertes n und der Zeit des ersten Meßwertes t_0 bestimmt werden können: $t = n \cdot T + t_0$

Ein wichtiges Kriterium kann auch die erzeugte **Datenmenge** sein. Bei vielen Sensoren und hohen Meßfrequenzen können pro Sekunde durchaus einige Megabytes an Daten anfallen. Ein CCD-Sensor z.B. liefert typisch 18Mbyte/s. Dies kann unter Umständen zu Zeitproblemen bei der Erfassung bzw. Speicherung oder zu Platzproblemen auf dem Speichermedium führen. Dann sind schnelle Meßrechner mit schnellen, großen Festplatten bzw. Bandlaufwerken nötig. Es sollten deshalb keine unnötig hohen Meßfrequenzen verwendet werden (siehe Abtasttheorem Kapitel 3.1).

2.3.3 Vorgehensweise für kinematische Bauwerksmessungen

Wird das in Abbildung 2.2 dargestellte Modell des Bauwerks um die Messung und Auswertung erweitert, so ergibt sich folgendes Bild:

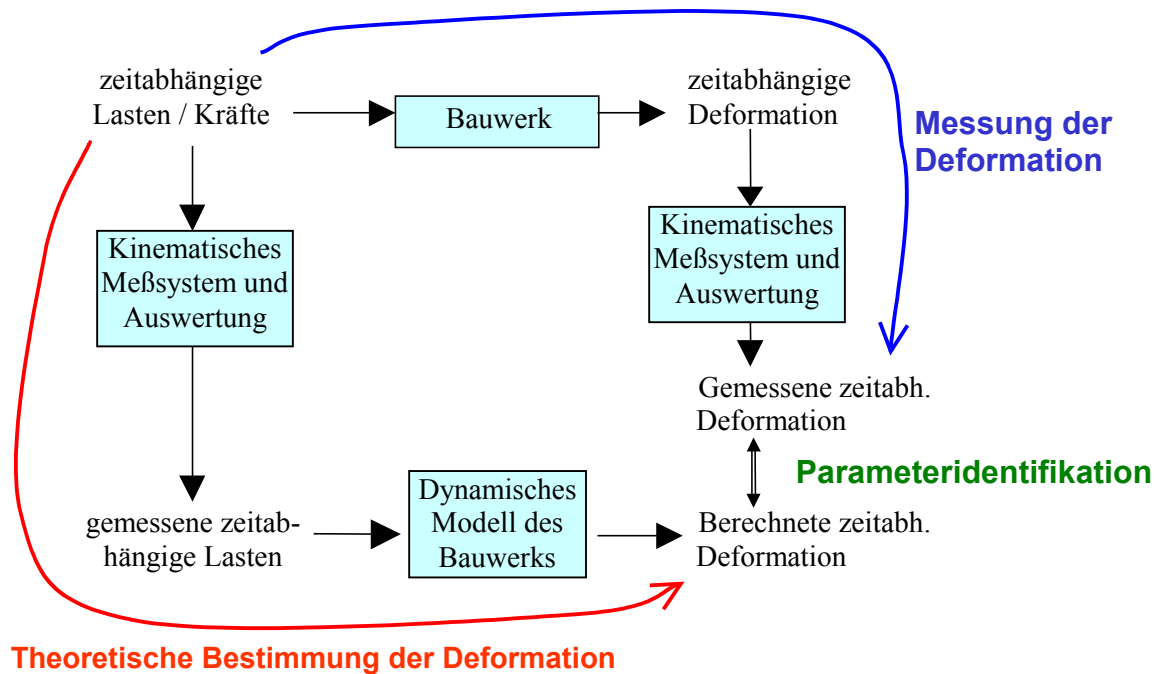


Abbildung 2.5: Vorgehensweise zur Messung und Auswertung von kinematischen Bauwerksdeformationen

Ausgehend von den Lasten bzw. Kräften gibt es zwei Möglichkeiten die Deformation zu bestimmen:

Die zeitabhängigen Lasten/Kräfte werden direkt gemessen und daraus über ein dynamisches Bauwerksmodell die zeitabhängige Deformation berechnet. Da die Lasten oft auch ohne Messung bekannt sind, wird diese Möglichkeit in der vorliegenden Arbeit als theoretische Bestimmung der Deformation bezeichnet. (Beispiel in Kapitel 8)

Die zeitabhängigen Lasten/ Kräfte wirken auf das Bauwerk und verursachen eine zeitabhängige Deformation, welche gemessen wird. Dieser Weg wird hier als Messung der Deformation bezeichnet. (Beispiel in Kapitel 9)

Oft werden beide Wege beschritten und durch den Vergleich der Ergebnisse die Parameter des dynamischen Bauwerksmodells verifiziert oder bestimmt. Heunecke (1995) bezeichnet dies als parametrische Identifikation.

Der ideale Ablauf einer Systemanalyse wird bei Heunecke (1995) und Kuhlmann (1996) dargestellt. Wird dieses Prinzip erweitert und konkret auf die kinematische Bauwerksmessung angewandt, so ergibt sich folgende allgemeine Vorgehensweise:

1. Aufgabenstellung

Dies ist die noch recht allgemeine Beschreibung der Fragen, die durch das Projekt beantwortet werden sollen. Dabei sollte noch keine Rücksicht auf physikalische

Gegebenheiten oder Einschränkungen genommen werden, sondern die Aufgabe so allgemein wie möglich definiert werden. Es werden noch keine Lösungsansätze gemacht.

2. **qualitative Modellbildung**

Das erwartete Verhalten des Bauwerks wird abgeschätzt. Dabei spielen Erfahrungswerte und stark vereinfachte Annahmen über das Bauwerk und seine Dynamik eine große Rolle. Am Ende dieses Schrittes steht die Art der Bauwerksbewegung und deren Größenordnung fest.

3. **Lösungskonzept**

In diesem Schritt wird die Aufgabe dann konkretisiert. Dabei werden alle Vorgaben, Randbedingungen, Einschränkungen usw. berücksichtigt und daraus ein Konzept zur Lösung der oben definierten Aufgabe entwickelt. Dazu gehört u.a. die Festlegung der zu messenden physikalischen Größen und der erforderlichen Genauigkeit. Die Auswahl der konkreten Sensoren wird erst unter Punkt 5 festgelegt.

4. **quantitative Modellbildung**

Aus den Vorgaben über das Objekt und dem Lösungsansatz wird ein mathematisches Modell entwickelt, aus dem die zu erwartende Bewegung des Objektes abgeleitet werden kann. Daraus lassen sich die Werte der zu messenden physikalischen Größen sowie deren zeitliche Entwicklung ableiten.

5. **Meßkonzept**

Aus dem Modell der Bewegung und dem Lösungsansatz kann dann das Meßkonzept entwickelt werden. Dazu gehört die Auswahl der Sensoren, wobei der benötigte Meßbereich, die Auflösung und die notwendige Meßfrequenz aus den simulierten Meßwerten bestimmt werden kann. Für die einzelnen Sensoren müssen Kalibrierverfahren entwickelt und ein Konzept für die Datenerfassung erstellt werden.

6. **Messung**

Dazu gehört neben der eigentlichen Durchführung der Messung die Vorbereitung und Logistik. So müssen Befestigungsvorrichtungen, Adapter und Kabel bereitgestellt, ein detaillierter Zeitplan für die Durchführung der Messung aufgestellt und eventuell die Absprachen mit anderen an der Messung beteiligten Partnern getroffen werden.

7. **Auswertung**

Die Auswertung geschieht bei den hier vorgestellten Messungen Off-Line nach Abschluß aller Messungen. Allerdings sollten die Meßwerte während oder direkt nach der Messung auf Plausibilität geprüft werden. Die eigentliche Auswertung besteht aus einer eventuellen Signalaufbereitung und der anschließenden Verarbeitung gemäß den im Modell und im Lösungskonzept entwickelten Algorithmen. Ein Vergleich mit den simulierten Daten liefert meistens zusätzliche Erkenntnisse.

2.4 Multi-Sensor-Messungen

Im folgenden sollen nur Multisensorsysteme für den Einsatz in der kinematischen Bauwerksvermessung betrachtet werden. Dadurch wird die Auswahl an Einzelsensoren bezüglich Genauigkeit, Meßbereich, Meßfrequenz und Robustheit eingeschränkt.

Der Begriff Multisensorsysteme wurde zuerst in der Robotik geprägt. Dort stellte sich die Aufgabe, die starre Programmierung mobiler Roboter (z.B. in der Produktion) durch Sensoren und eine gewisse Lernfähigkeit zu ersetzen. Dadurch sollten die Roboter in die Lage versetzt werden, unvorhergesehenen Hindernissen auszuweichen und flexibel auf Störungen zu reagieren. Dies war nur durch den Einsatz unterschiedlichster Sensoren möglich, wobei

hauptsächlich Bildverarbeitungssysteme eingesetzt wurden, die durch Ultraschallsensoren, Näherungsschalter, Lichtschranken, Radsensoren, Taster und andere einfache Sensoren unterstützt wurden. Die von den Sensoren gelieferten Daten wurden zentral erfaßt und erweiterten das interne Weltbild des Roboters. Um eine direkte Reaktion auf die Sensorsignale zu ermöglichen, mußte eine Echtzeit-Auswertung durchgeführt werden, die als Output die Steuersignale an die Aktoren (z.B. Motoren, Greifarmsteuerung) lieferte. Einzelheiten dazu können in Raczkowsky (1991), Kegel (1990), Hagg (1992) und Jörg (1994) nachgelesen werden.

Für in der Robotik eingesetzte Multisensorsysteme hat Raczkowsky (1991) folgende Definition angegeben:

Ein Multisensorsystem ist ein Erfassungs- und Verarbeitungssystem, welches mit Sensoren unterschiedlichen physikalischen Wirkprinzips Daten aus der Umwelt aufnimmt.

Die so erfaßten Meßgrößen unterscheiden sich u.a. durch folgende Kriterien: Meßbereich, Auflösung, Medium, Rückwirkung auf den Prozeß, Meßfrequenz u.s.w.

Diese Definition behält auch beim Einsatz in der kinematischen Bauwerksvermessung seine Gültigkeit, allerdings spielt hier die Signalverarbeitung eine untergeordnete Rolle, da diese in den meisten Fällen nach Abschluß der Messungen in einem unabhängigen System durchgeführt werden können. Im weiteren werden nur Multisensor-Meßsysteme betrachtet, wobei die Auswertung der Daten Off-Line nach der Messung erfolgt.

Innerhalb der Geodäsie werden Multi-Sensor-Systeme (meist INS/GPS-Kombinationen) vorwiegend zur Positions- und Lagebestimmung von Flugzeugen während Bildflügen für die photogrammetrische Auswertung benutzt (Bäumker und Fitzen, 1995; Brünger et.al., 1995; Lechner und Lohmann, 1995; Söhne und Heinze, 1995; Vorbrich, 1995).

Nach obiger Definition ist ein Inertialnavigationssystem (INS) ein Multisensorsystem, wobei es für den Einsatz in der kinematischen Bauwerksmessung meistens ungeeignet oder überdimensioniert ist. Sollte die im zweiten Teil untersuchte Brückendeformation mit Inertialnavigationssystemen bestimmt werden, so wären dazu 6 vollständige INS notwendig gewesen, deren Beschaffungskosten den Auftragswert bei weitem überstiegen hätte.

Multisensorsysteme müssen dann eingesetzt werden, wenn nicht alle zu messenden Größen mit einem Sensortyp gemessen werden können. Bei statischen Messungen werden dann problemlos einzelne unabhängige Meßsysteme eingesetzt, von denen jedes einen Teil der gewünschten Informationen liefert. Bei kinematischen Messungen hingegen müssen alle Systeme gleichzeitig zum Einsatz kommen, so daß die Meßwerte einander zugeordnet werden können. Dies ist mit einem zentralen Datenerfassungssystem möglich; aber auch ein System aus unabhängigen Teilsystemen ist denkbar, allerdings muß der Zeitbezug zwischen den einzelnen Teilmessungen genau definiert sein. Auf diese Problematik wird in Kapitel 5 näher eingegangen.

2.4.1 Besonderheiten bei Multi-Sensor-Messungen

Einer der wichtigsten Unterschiede zu Meßsystemen mit Einzelsensoren liegt darin, daß ein eindeutiger zeitlicher Bezug zwischen allen Meßwerten vorhanden sein muß. Dies ist bei statischen Meßwerten unkritisch, meist reicht eine auf einige Sekunden genaue Zeitangabe im Meßprotokoll aus. Bei kinematischen Meßsystemen mit einem Sensortyp werden die Daten i.a. mit einer festen, für alle Sensoren einheitlichen Meßfrequenz gemessen, so daß damit der Bezug automatisch gegeben ist. Andere Systeme, wie z.B. GPS, speichern zu jedem Meßwert die

absolute Zeit ab, so daß auch hier ein Bezug zu anderen GPS-Messungen hergestellt werden kann.

Bei Multi-Sensor-Meßsystemen, die aus einzelnen unabhängigen Teilsystemen bestehen, muß die Zeitzuordnung über eine gemeinsame Synchronisation erfolgen. Die verschiedenen Möglichkeiten der Synchronisation der unterschiedlichen Meßsysteme werden in Kapitel 5.1.1 ausführlich dargestellt.

Die Vorteile von Multi-Sensor-Messungen liegen in der zusätzlich gewonnen Information, die mit einer Sorte Sensoren nie erreicht wird. Zwar können auch unabhängige Teilsysteme dieselben Informationen aufnehmen, allerdings fehlt dann die exakte zeitliche Zuordnung der einzelnen Meßwerte zueinander, welche für eine gemeinsame Auswertung unerlässlich ist.

Die Nachteile liegen im Mehraufwand für die Messungen und die Auswertung. Bei der Messung muß im Unterschied zu unabhängig voneinander messenden Einzelsystemen zumindest die Synchronisation der Teilsysteme gewährleistet sein, d.h. alle Teilsysteme müssen mit mindestens einem Kabel oder einer Telemetriestrecke mit den anderen verbunden sein. Dies kann bei großen Bauwerken mit einigen km zu installierenden Kabeln verbunden sein.

Wie man in den vorigen Kapiteln gesehen hat, ist auch die Auswertung aufwendiger. Allerdings entfällt bei Multisensorsystemen mit zentraler Datenerfassung die Umrechnung auf eine einheitliche Meßfrequenz.

2.5 Meßkette

Die Datenerfassung muß die vom Sensorsystem gelieferten Daten aufnehmen, aufbereiten, reduzieren, vorverarbeiten und letztendlich abspeichern (Best, 1991a). Im folgenden werden die einzelnen Schritte erläutert.

Die vom Sensorsystem gelieferten Daten liegen entweder in digitaler Form an einer Schnittstelle an, oder ein Spannungs- oder Stromwert wird über eine Signalleitung geliefert; dieser enthält die gewünschte Information.

Liefert das Sensorsystem bereits ein digitales Ausgangssignal, so ist dieses über ein passendes Interface mit der Datenerfassung zu verbinden. Die Meßkette ist relativ einfach.

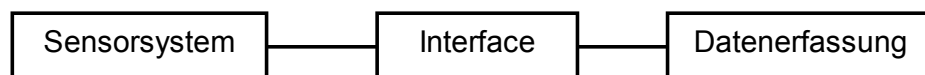


Abbildung 2.6: Einfache Meßkette zur Erfassung von Meßdaten mit digitalen Sensorsystemen

Liefert das Sensorsystem ein analoges Ausgangssignal, so zeigt Abbildung 2.7 den prinzipiellen Aufbau einer Meßkette zur Erfassung und Digitalisierung der Meßdaten.

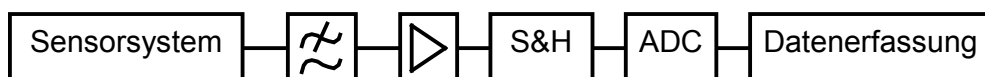


Abbildung 2.7: Einfache Meßkette zur Erfassung von Meßdaten mit analogen Sensorsystemen

Das Sensorsystem wandelt die zu messende physikalische Größe in ein elektrisches Signal um. Eine genauere Erläuterung zu Sensorsystemen ist in Kapitel 2.6 gegeben.

Das Sensorsignal muß anschließend tiefpaßgefiltert werden, um die hohen Frequenzanteile zu unterdrücken. Dadurch wird zum einen das Signal-zu-Rausch-Verhältnis verbessert, indem nicht benötigte Frequenzen herausgefiltert werden, zum anderen begrenzt das Filter die Bandbreite des Signals, um die Einhaltung des Samplingtheorems zu gewährleisten. Die Grenzfrequenz des

Tiefpasses (Kapitel 4.3) muß größer als die höchste zu messende Frequenz und kleiner als die halbe Abtastfrequenz sein (siehe Kapitel 3.1).

Der Verstärker erweitert den Meßbereich auf das gewünschten Intervall und verhindert eine Rückkopplung des A/D-Wandlers auf das Sensorsystem.

Das Sempel&Hold-Glied dient dem Einfrieren des Signals. Es ist für eine korrekte Digitalisierung notwendig, wenn sich das Signal während der Wandelzeit des A/D-Konverters um einen Betrag ändert, der größer als dessen Auflösung ist. Die meisten kommerziellen A/D-Wandler haben bereits integrierte S&H-Glieder.

Im Analog-Digital-Konverter (ADC) wird das anliegende Analogsignal in eine digitale Zahl gewandelt. Der A/D-Konverter teilt den Meßbereich in 2^n Intervalle und gibt die Zahl aus, in deren Intervall das Eingangssignal liegt. Übliche Werte für n sind 4, 8, 12, 14, 16, 20 und 24. Eine Übersicht über die gängigsten A/D-Konverter ist in Kapitel 4.6 enthalten.

Die Datenerfassung dient dem Auslesen des digitalen Wertes aus dem Analog-Digital-Konverter und der darauffolgende Weiterverarbeitung.

Es gibt noch eine zweite Möglichkeit der Digitalisierung von Analogsignalen, bei der man auf den Tiefpaß und das Sempel&Hold-Glied verzichten kann bzw. sogar muß: Den integrierenden A/D-Wandler. Die dann zu benutzende Meßkette ist in Abbildung 2.8 dargestellt.

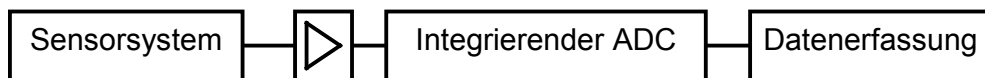


Abbildung 2.8: Einfache Meßkette zur Erfassung von Meßdaten mit analogen Sensorsystemen durch integrierenden ADC.

Ein integrierender ADC (siehe Kapitel 4.6.5) liefert aus dem Ausgangswert eine Zahl, die proportional zu der über das letzte Abtastintervall gemittelten Eingangsspannung ist. Diese Mittelung wirkt ähnlich wie ein Tiefpaß, so daß dieser nicht benötigt wird. Der Vorteil dieses Wandlers ist, daß auch kurze Signalspitzen, die bei einem abtastenden ADC nicht erfaßt werden können, registriert werden. Integrierende ADCs können vor allem dort sinnvoll eingesetzt werden, wo in der Auswertung des Signals sowieso eine Integration durchgeführt werden muß. Dies ist z.B. bei Beschleunigungsmessern in Inertialnavigationssystemen der Fall.

2.6 Sensorsysteme

2.6.1 Definitionen

Nach Schiessle (1992) versteht man unter Sensoren technische Bauteile, die aus einem physikalischen nichtelektrischen Meßsignal ein eindeutiges elektrisches Signal erzeugen. Allerdings sind die Begriffe Sensor, Sensorsystem, Sensorelement, Basissensor, Meßwertaufnehmer, Meßfühler, ... in der Literatur nicht eindeutig definiert und werden auch von den unterschiedlichen Autoren verschieden verwendet. Um Verwechslungen zu vermeiden, werden im folgenden die hier verwendeten Begriffe am Beispiel des in Abbildung 2.9 gezeigten digitalen Sensorsystems erläutert.

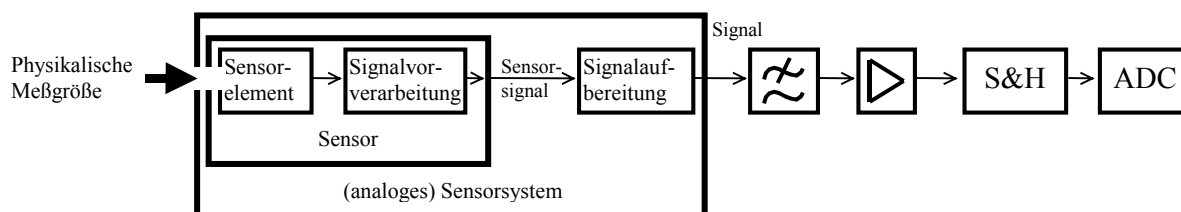


Abbildung 2.9: Funktionsschaubild eines digitalen Sensorsystems

Physikalische Meßgröße

Dies ist die zu messende Größe, z.B. Druck, Weg, Beschleunigung, Temperatur.

Sensorelement

Dies ist der eigentliche Meßfühler, der die physikalische Größe in ein elektrisches Signal wandelt. Dabei kann das Signal noch eine komplexe Struktur haben, z.B. kann die gewünschte Information in der Phasenverschiebung zwischen 2 Signalen enthalten sein.

Signalvorverarbeitung

Sie wandelt die vom Sensorelement gelieferten Signale in eine Spannung (bzw. einen Strom) um, der eine eindeutige Zuordnung zur physikalischen Meßgröße erlaubt.

Sensor

Er besteht aus Sensorelement und Signalvorverarbeitung, d.h.: er wandelt die physikalische Größe in ein elektrisches Signal, das Sensorsignal, um.

Signalaufbereitung

Hier wird das Signal linearisiert, und es werden auch andere bei einer Kalibrierung gewonnenen Korrekturen angebracht, z.B. Bias und Skalenfaktor.

Sensorsystem

Es beinhaltet den Sensor und die Signalaufbereitung, so daß im Ausgangssignal bereits eine vorangegangene Kalibrierung berücksichtigt ist.

Digitales Sensorsystem

Es liefert direkt digitale Ausgangswerte, d.h.: es besteht aus einem (analogen) Sensorsystem mit nachgeschalteten Digitalisierungskomponenten oder das Meßprinzip ist von sich aus schon digital (z.B. Encoder)

Es gibt so viele unterschiedliche Bauarten von Sensorsystemen, daß nicht alle in das obige Schema eingeordnet werden können, aber der prinzipielle Aufbau ist immer ähnlich.

2.6.2 Allgemeine Sensoreigenschaften

Wie oben bereits erwähnt, liefern die meisten Sensoren ein der physikalische Größe näherungsweise proportionales elektrisches Signal. Dies ist bei realen Sensoren nie der Fall, da immer Fehler auftreten, wobei stochastische und systematische Fehler unterschieden werden.

Stochastische Fehler sind Signalanteile, die durch zufällige, nicht reproduzierbare Schwankungen hervorgerufen werden. Diese entstehen direkt am Objekt, im Sensor, in den Verstärkern und bei der Digitalisierung. Die häufigsten Ursachen sind das thermische Rauschen und das in Kapitel 3.2 dargestellte Digitalisierungsrauschen. Stochastische Fehler lassen sich bei statischen Messungen durch Mehrfachmessungen, bei kinematischen durch Bandbreitenbegrenzung oder spezielle Filtertechniken verringern.

Systematische Fehler entstehen durch Unzulänglichkeiten des Sensorsystems, wobei die wichtigsten, nämlich Nichtlinearitäten, Skalenfaktoränderungen und Offsets durch eine Kalibrierung kompensiert werden können. Wird jeweils eine Kalibrierung direkt vor und nach

der Messung durchgeführt, so kann damit oft auch der Einfluß von Temperaturschwankungen und Driften berücksichtigt werden. Schwieriger zu korrigieren sind systematische Fehler, die durch andere physikalische Größen hervorgerufen werden. So reagieren mechanische Kreisel oft auf Beschleunigungen und fast alle Sensoren auf Temperaturänderungen. Die dadurch hervorgerufenen Signalfehler können nur dann korrigiert werden, wenn die zusätzlichen physikalischen Größen mit anderen Sensoren erfaßt werden, so daß die unerwünschten Signalanteile durch detaillierte Sensormodelle berücksichtigt werden können.

Bei einigen Sensoren hängt der Signalwert außer vom momentanen Wert auch von der Vergangenheit der zu messenden Größe ab. Dieser Effekt wird Hysterese genannt und ist sehr schwierig zu kompensieren. Oft werden solche systematischen Fehleranteile nicht korrigiert, sondern nur in der Fehlerrechnung entsprechend berücksichtigt. Eine gute Beschreibung von allgemeinen Sensoreigenschaften ist in Schiessle (1992) enthalten.

2.6.3 Sensoranforderungen

Es gibt viele unterschiedliche Sensortypen, die in vielen Anwendungsfällen eingesetzt werden. Hier sollen nur die allgemeinen Anforderungen an ein Sensorsystem für den Einsatz in der kinematischen Bauwerksvermessung aufgezeigt werden (Schlemmer, 1996; Pelzer, 1987; Schiessle, 1992; Juckenack, 1990; Bonfig, 1993; Best, 1991).

Um mit einem Sensorsystem Bauwerksbewegungen vollständig detektieren zu können, muß es folgende Kriterien erfüllen:

Arbeitsbereich

Vor der Messung muß abgeschätzt werden, in welchem Wertebereich sich der Meßwert bewegen wird. Der Arbeitsbereich des Sensorsystems ist dann auf diesen Wertebereich abzustimmen. Dies geschieht im allgemeinen durch Einstellung der Verstärkung (Meßbereich) und des Offsets (Nullpunkt) an einem Meßverstärker. Dabei sollte nach oben und unten noch genug Spielraum für unvorhergesehene Ereignisse vorgesehen sein, ohne die Auflösung durch einen viel zu großen Meßbereich unnötig zu verschlechtern.

Auflösung und Genauigkeit

Die Auflösung eines Meßsystems ist die Größe, um die sich die physikalische Meßgröße ändern muß, um am Ausgang eine signifikante Signaländerung zu erhalten. Bei digitalen Systemen ist dies die Änderung um ein Digit.

Die Genauigkeit eines Meßsystems ist die Standardabweichung des wahren Fehlers, wobei der wahre Fehler nach Linkwitz (1991) die Differenz von wahren Wert und gemessenem Wert ist.

Nach Pelzer (1987) sollte eine Genauigkeit angestrebt werden, die mindestens um den Faktor 50 kleiner ist als die zu erwartende maximale Deformation.

Genauigkeit und Auflösung dürfen nicht verwechselt werden. Bei den meisten Meßsystemen ist die Auflösung kleiner als die Genauigkeit, es gibt aber auch Systeme, bei denen es umgekehrt ist. Beide Größen müssen den Anforderungen der Meßaufgabe entsprechen.

Bandbreite

Es muß sichergestellt sein, daß das Sensorsystem alle relevanten, in der Bewegung vorkommenden Frequenzen erfassen kann. Ein Sensorsystem hat i.a. nur eine begrenzte Bandbreite, d.h. nur in diesem Frequenzbereich gemessene Bewegungen werden richtig erfaßt, außerhalb dieses Bereichs nimmt die Empfindlichkeit normalerweise stark ab, d.h. der Skalenfaktor wird geringer. Zu groß gewählte Bandbreiten sollten vermieden werden, da dadurch zusätzliche Rauschanteile gemessen werden, ohne eine Verbesserung des Signals zu bewirken. In solchen Fällen ist es sinnvoll, die Bandbreite durch einen in die Meßkette des

Sensorsystems integrierten Filter (z.B. Bandpaß) zu begrenzen, um die Rauschanteile in den nicht benötigten Frequenzbereichen zu unterdrücken.

In Kapitel 4 werden kurz die in den Beispielen verwendeten Sensoren bzw. Sensorsysteme vorgestellt. Dabei wird das Genauigkeitspotential beschrieben, die Vor- und Nachteile erläutert und die wesentlichen Einsatzgebiete aufgezählt.

3 Mathematik zu kinematischen Messungen

3.1 Abtasttheorem (Samplingtheorem)

Nach Nyquist und Shannon gilt folgendes Abtasttheorem:

Bei der Zeitdiskretisierung eines Signals geht keine Information verloren, wenn die Abtastfrequenz f_{abt} mehr als doppelt so groß ist wie die höchste im Signal vorkommende Frequenz f_{max} .

$$2 \cdot f_{max} < f_{abt}$$

Literatur zum Abtasttheorem: Marks (1991), Bellanger (1984), Best (1991)

Im Normalfall wird davon ausgegangen, daß die Messungen in gleichen Zeitabständen vorgenommen werden. Die Begriffe Abtastfrequenz, Abtastrate und Samplingrate bezeichnen dann den Kehrwert der Zeit zwischen zwei Messungen.

Wenn die größte interessierende Frequenz f_i ist, so muß das Signal durch einen Tiefpaß mit der Grenzfrequenz $f_{tief} = f_i$ gefiltert werden, um die unerwünschten hochfrequenten Anteile zu unterdrücken. Dann ist die höchste vorkommende Frequenz f_i und nach dem Abtasttheorem muß mindestens mit der Abtastrate $f_{abt} = 2 f_i$ abgetastet werden.

In Abbildung 3.1 wird die Auswirkung einer Verletzung des Abtasttheorems anhand eines Beispiels veranschaulicht. Das Originalsignal hat eine Frequenz von 0,5 Hz, d.h. die Abtastrate müßte größer als 1 Hz sein. Im Beispiel wurde die Samplingrate aber mit 0,555 Hz bewußt zu niedrig gewählt. Die Originalkurve wird also alle 1,8 s = 1 / 0,555 Hz abgetastet. Die dadurch erhaltenen Werte sind als Kreise markiert. Diese Werte werden aber auch bei einem Signal mit einer Frequenz von 0,055 Hz erhalten. Aus den Meßwerten ist also nicht ersichtlich, welches Signal tatsächlich vorlag (Aliasing-Effekt). Ist hingegen bekannt, daß das Samplingtheorem eingehalten wurde, so kann nur das Signal mit 0,055 Hz (kleiner als $f_{abt}/2 = 0,25$ Hz) vorgelegen haben. Im allgemeinsten Fall kann eine gemessene Frequenz f_m von jedem Signal mit den Frequenzen $f = n \cdot f_{abt} \pm f_m$ ($n \in \mathbb{N}_0$) herrühren. Erst wenn bekannt ist, daß $n = 0$ sein muß, ist eine eindeutige Zuordnung möglich.

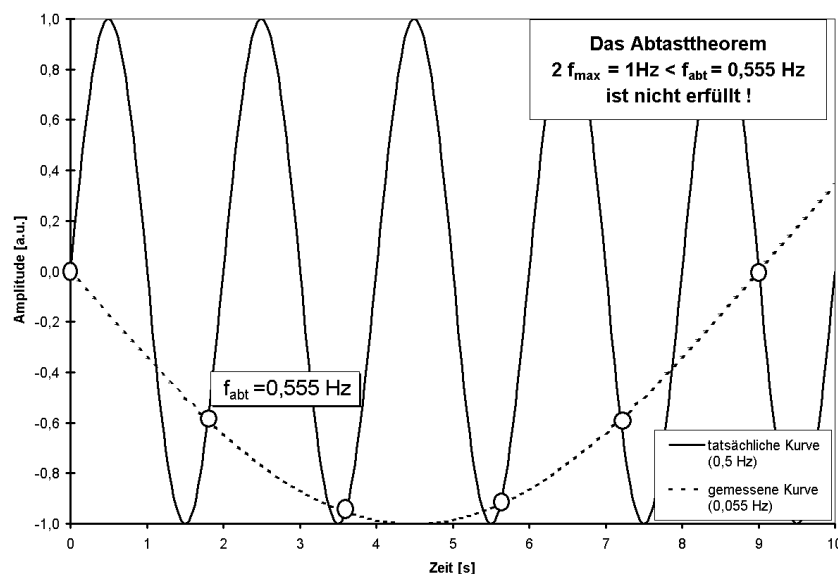


Abbildung 3.1: Verletzung des Abtasttheorems

3.2 Diskretisierung

Die Diskretisierung ist die Umwandlung des zeit- und wertekontinuierlichen Analogsignals durch einen A/D-Wandler in eine Folge von diskreten Zahlen. Man kann sie in eine Zeitdiskretisierung (auch Abtastung genannt) und eine Wertediskretisierung (auch Quantisierung genannt) unterteilen (Achenbach, 1993; Hess, 1989; Lacroix, 1995; Best, 1991).

Zeitdiskretisierung heißt, daß das zeitkontinuierliche Analogsignal nur zu bestimmten, durch die Abtastfrequenz festgelegten Zeitpunkten bestimmt wird. Zwischen diesen Zeitpunkten liegt keine Information über die Meßgröße vor. Wenn das Abtasttheorem eingehalten wurde, geht hierbei keine Information verloren.

Wertediskretisierung heißt, daß der Wert des Analogsignals zu den Abtastzeitpunkten nicht beliebig genau dargestellt werden kann. Bei einem üblichen ADC (Analog zu Digital Konverter) mit n Bit Auflösung wird der Meßbereich in 2^n Intervalle unterteilt. Als digitaler Wert wird vom ADC die Nummer des Intervalls ausgegeben, in dessen Wertebereich sich der Signalwert befindet. Hierbei geht nur dann keine Information verloren, wenn die Intervallgröße des ADC geringer ist als die Genauigkeit des Analogsignals.

Beispiel: Ein 12 Bit ADC unterteilt den Meßbereich von ± 10 Volt in 4096 Intervalle. Ein Intervall hat also eine Breite von 4,88 mV. Ist der Signalwert z.B. 10 mV, so wird der Wert 2 ausgegeben; dies entspricht dem Intervall [9,76 mV .. 14,64 mV[.

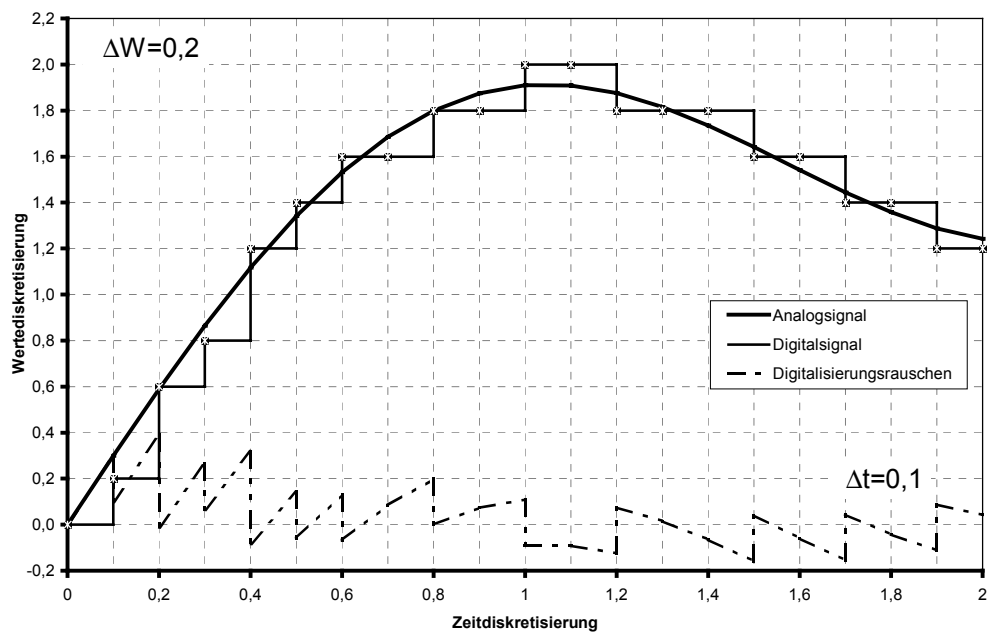


Abbildung 3.2: Zeit- und Wertediskretisierung

In Abbildung 3.2 ist dargestellt, wie die digitalisierten Werte aus dem Analogsignal entstehen. Die beiden oberen Kurven sind das Analogsignal und das digitalisierte Signal. Unten ist deren Differenz, der Digitalisierungsfehler, auch Digitalisierungsrauschen genannt, aufgetragen.

3.3 Beispiel

Am Beispiel einer gedämpften Sinusschwingung sollen die Auswirkungen der einzelnen Glieder der Meßkette auf das Signal veranschaulicht werden. Abbildung 3.3 zeigt das Originalsignal am Ausgang des Sensorsystems.

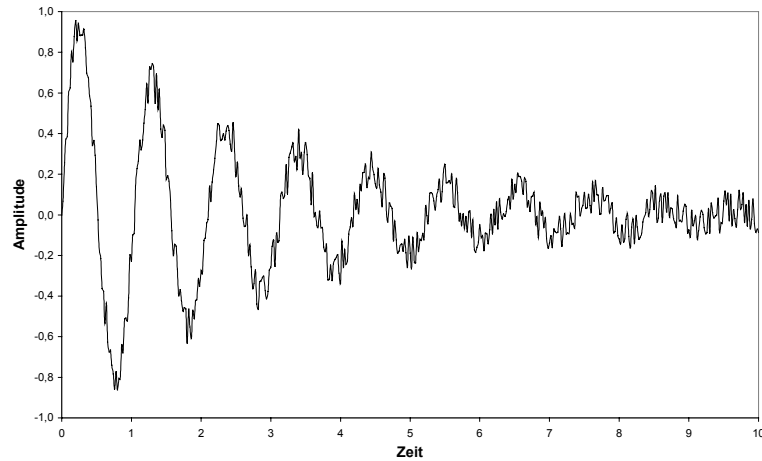


Abbildung 3.3: Beispielsignal am Sensorausgang

Die Frequenz der Schwingung beträgt etwa 1 Hz, d.h. bei einer Filterung können alle Frequenzen über 1 Hz herausgefiltert werden, ohne Informationen über das eigentliche Signal zu verlieren. Der Tiefpaß wurde also mit einer Grenzfrequenz von 2 Hz gewählt.

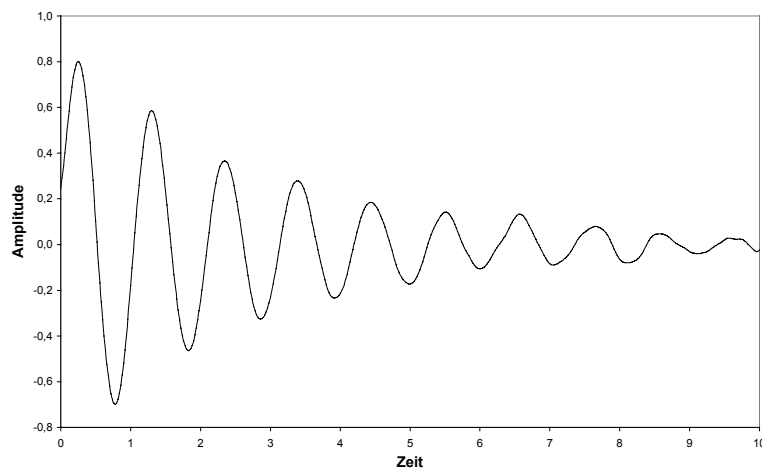


Abbildung 3.4: Tiefpaßgefiltertes Beispielsignal

Im gefilterten Signal (Abbildung 3.4) ist deutlich das verbesserte Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu erkennen. Ein Nachteil ist die bei jeder physikalischen Filterung auftretende Phasenverschiebung, hier daran zu erkennen, daß das Signal nicht bei Null beginnt.

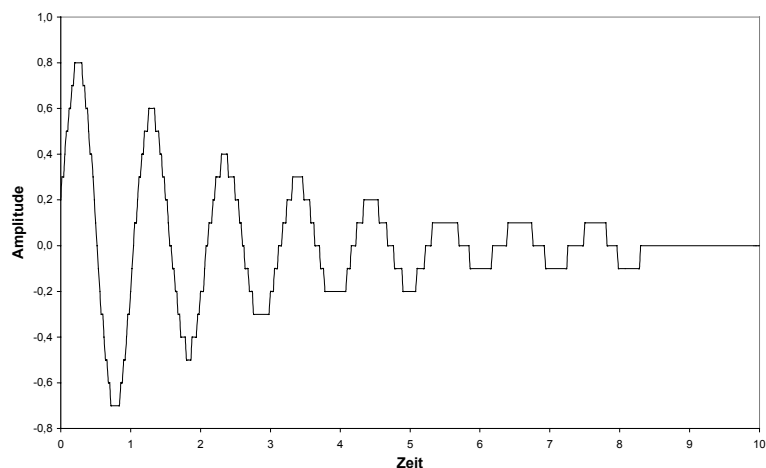


Abbildung 3.5: Zeitdiskretisiertes Beispielsignal

Nach der Zeitdiskretisierung (Abbildung 3.5) ist deutlich der qualitative Unterschied zum Ausgangssignal zu erkennen. Dabei wurde eine Abtastfrequenz von 5 Hz gewählt. Wird dieses Signal jetzt noch wertediskretisiert (mit $\Delta U=0,1$ V), so ergibt sich Abbildung 3.6.

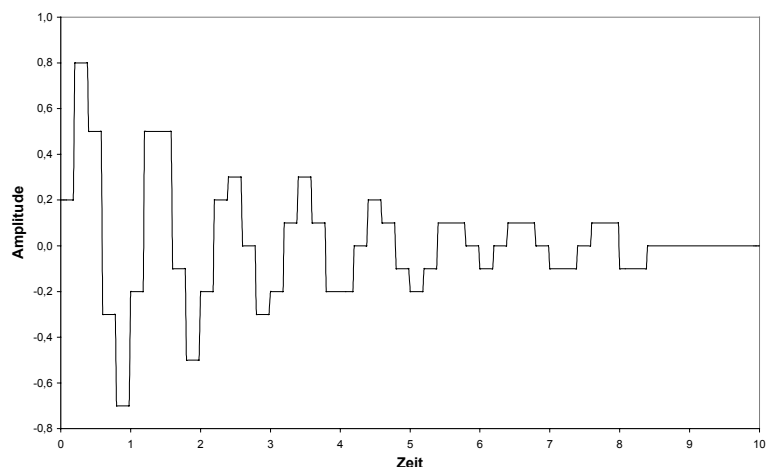


Abbildung 3.6: Zeit- und wertediskretisiertes Beispielsignal

Vergleicht man das in Abbildung 3.6 dargestellte digitale Signal mit dem Ausgangssignal aus Abbildung 3.3, so sieht man deutlich die Auswirkungen einer Digitalisierung auf das Signal. In obigem Beispiel wurden alle wichtigen Vorschriften wie z.B. das Abtasttheorem eingehalten, trotzdem zeigt der Vergleich deutliche Unterschiede vom Ausgangssignal.

3.4 Auswertung

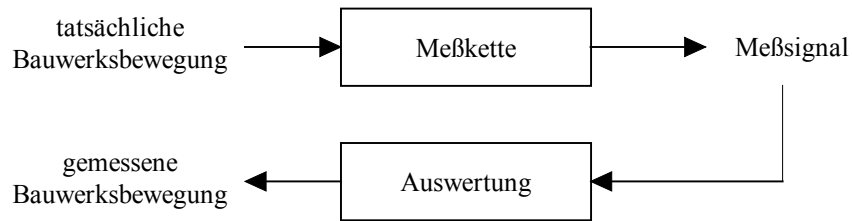


Abbildung 3.7: Auswertung der Meßsignale

Die eigentliche Auswertung soll aus den Eingangssignalen die gewünschte Information über die Bewegung des Bauwerks erzeugen. Aus Abbildung 3.7 erkennt man, daß die Auswertung alle in der Meßkette (siehe Kapitel 2.5) vorgenommenen Signalveränderungen wieder rückgängig machen muß.

In den einfachsten Fällen reicht dafür eine Skalierung, in komplizierten Fällen, wie der Messung mit Inertialsensoren, kann aber eine umfangreiche Berechnung, bestehend aus der Berücksichtigung der Kalibrierparameter, Integrationen, Transformationen u.a., notwendig sein. Da bei jedem Projekt andere Messungen durchgeführt, andere Meßverfahren eingesetzt und andere Fragestellungen beantwortet werden sollen, können darüber keine konkreten Aussagen gemacht werden. Im folgenden werden einige allgemeine Verfahren zur Meßsignalauswertung vorgestellt (Candy, 1986; Best 1991; Kammeyer, 1998).

3.4.1 Signalaufbereitung

Der erste Schritt bei der Auswertung von Messungen ist fast immer die Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses. Während bei statischen geodätischen Messungen zur Erhöhung der Genauigkeit Mehrfachmessungen und überbestimmte Gleichungssysteme im Vordergrund stehen und damit die Methoden der Ausgleichsrechnung einsetzbar sind, müssen bei kinematischen Messungen andere Verfahren eingesetzt werden. Die Durchführung von Mehrfachmessungen ist meistens nicht möglich, da das zu messende Ereignis i.a. ein einmaliger Vorgang ist, der bei einer Wiederholung nicht exakt gleich abläuft.

Bei kinematischen Messungen kann zur Signalverbesserung die zeitliche Korrelation zwischen den Meßwerten ausgenutzt werden. Wenn die Abtastrate deutlich größer als der vom Samplingtheorem geforderte Wert ist, so enthält die Messung redundante Anteile, die zur Signalverbesserung genutzt werden können. Dies geschieht im einfachsten Fall mit einem digitalen Tiefpaß, dessen Grenzfrequenz die vom Samplingtheorem festgelegte Frequenz ist. Durch diese Vorgehensweise können auch durch die Diskretisierung entstandene Rauschanteile unterdrückt werden, was mit einem analogen Tiefpaß nicht möglich ist.

Sind zusätzliche Informationen über den Frequenzgang des Signals bekannt, so kann durch spezielle Filter wie Hochpässe, Bandpässe oder Bandsperren das Signal weiter verbessert werden. Letztere werden vor allem zur Unterdrückung von Einstreuungen durch das Stromnetz (bei 50 Hz) oder durch Bahnstrom (16 2/3 Hz) verwendet.

3.4.2 Anpassung der Abtastrate

In Multi-Sensor-Systemen können die Meßdaten in unterschiedlichen Formaten und mit unterschiedlichen Abtastraten vorliegen. Um sie in einem gemeinsamen Modell auszuwerten, ist es wünschenswert, daß die von den unterschiedlichen Sensoren gemessenen Signale auf ein einheitliches Format und die gleichen Abtastzeitpunkte umgerechnet werden. Bei gemeinsamer Triggerung der Einzelmessungen ist diese Umrechnung nicht nötig.

Nachdem eine einheitliche Abtastrate festgelegt wurde, müssen bei diesem Vorgehen die einzelnen Signale auf diese Abtastrate umgerechnet werden. Dabei ist zu beachten, daß zusätzlich die genauen Abtastzeitpunkte übereinstimmen. Die Umrechnung wird im einfachsten Fall dadurch erreicht, daß durch die vorhandenen Meßwerte eine Interpolationskurve gelegt wird, welche dann mit der festgelegten Frequenz abgetastet wird. Es können verschiedene Interpolationsverfahren eingesetzt werden:

1. Eine lineare Interpolation zwischen benachbarten Meßwerten ist dann sinnvoll, wenn die Meßfrequenz höher als die gemeinsame Frequenz ist.
2. Kubische Splines (Späth, 1978; Späth, 1990; Zeilfelder, 1996; Schrüfer, 1990) sollten nur bei Signalen mit geringem Rauschen eingesetzt werden, da sie bei großen Signalsprüngen, wie sie im Rauschen vorkommen können, zum Überschwingen neigen. Besser ist dann eine
3. Akima-Interpolation. Dies ist die Abwandlung eines Splines, wobei die Bedingung der Stetigkeit der 2. Ableitung durch eine Steigungsformel ersetzt wird, welche die Steigung an einer Stützstelle aus den Werten der 4 benachbarten Werte bestimmt. Dieses Verfahren wurde in den unten vorgestellten Beispielen verwendet (Akima, 1970; Hilberg, 1989).
4. Eine an das spezielle Modell angepaßte Methode kann in Einzelfällen die besten Ergebnisse liefern. Dies ist zum Beispiel dann sinnvoll, wenn im Signal Sprünge oder Signalspitzen auftreten, die bei den anderen Verfahren nicht richtig wiedergegeben werden.

Liegen die Daten in einem einheitlichen Datenformat und einer gemeinsamen Abtastrate vor, so kann die Auswertung gemäß der im Modell aufgestellten Gleichungen erfolgen. Diese muß individuell auf jede Messung abgestimmt sein, so daß hier nicht näher darauf eingegangen werden kann.

3.4.3 FIR Filter und IIR Filter

Die am häufigsten verwendeten digitalen Filter sind das FIR-Filter (Finite Impulse Response; nicht-rekursives Filter) und das IIR-Filter (Infinite Impulse Response; Rekursivfilter). Die umfangreiche Theorie zu beiden kann in der Literatur (Best, 1991+1991a; Profos und Pfeifer, 1992; Bellanger, 1984) nachgelesen werden; hier soll nur ihre Anwendung dargestellt werden.

Das FIR-Filter berechnet das Ausgangssignal o zum Zeitpunkt n aus den letzten $M+1$ Werten des Eingangssignals i nach der Formel:

$$o_n = \sum_{j=0}^M a_j \cdot i_{n-j}$$

Wobei a_i die Filterkoeffizienten sind, welche die Eigenschaften des Filters festlegen. In Abbildung 3.8 ist das Signalflußschema eines FIR-Filters dargestellt. Die mit T bezeichneten Kästchen verzögern das Signal jeweils um einen Takt, die so entstandenen Werte werden mit den in den Kreisen stehenden Filterkoeffizienten multipliziert und anschließend aufsummiert.

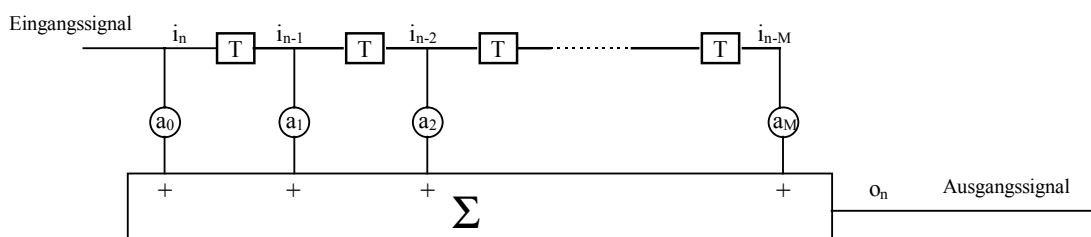


Abbildung 3.8: Signalflußschema des FIR-Filters

Ein am Eingang anliegender Impuls wirkt sich maximal während der nächsten M Takte auf den Ausgang aus, deshalb nennt man diese Filterart Finite Impulse Response Filter (Deutsch: endliche Impulsantwort).

Im Gegensatz dazu hat das IIR-Filter eine unendlich lange Impulsantwort (Infinite Impulse Response). Dies wird dadurch erreicht, daß außer den $M+1$ Eingangswerten noch die letzten N Ausgangswerte berücksichtigt werden. Sein Signalflußschema ist in Abbildung 3.9 dargestellt.

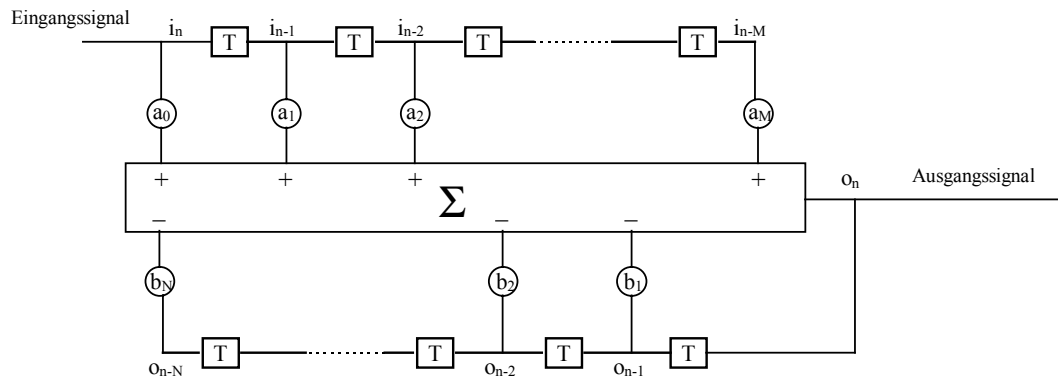


Abbildung 3.9: Signalflußschema des IIR-Filters

Die Werte des Ausgangssignals ergeben sich aus

$$o_n = \sum_{j=0}^M a_j \cdot i_{n-j} - \sum_{j=1}^N b_j \cdot o_{n-j} \quad .$$

Die Realisierung solcher Filter in modernen Rechenanlagen ist einfach, lediglich die Berechnung der Koeffizienten (a_j , b_j) für das gewünschte Filter ist mit etwas Rechenarbeit verbunden. Mit digitalen Filtern lassen sich alle analogen Filter simulieren. Allerdings darf der in der Meßkette notwendige analoge Tiefpaß zur Begrenzung der Bandbreite (siehe Kapitel 2.5) nicht weggelassen und durch eine anschließende digitale Filterung ersetzt werden, da das Samplingtheorem bei der A/D-Wandlung dann trotzdem verletzt ist.

3.4.4 Fouriertransformation

Die Darstellung eines Signals kann im Zeitraum, bei dem jeder Wert die Größe des Signals zu einem Zeitpunkt beschreibt, oder im Frequenzraum (Spektraldarstellung), bei dem jeder Wert den Anteil eines bestimmten Frequenzbereiches im Signal angibt, erfolgen. Oft ist die Frequenzraumdarstellung geeigneter, um die gewünschte Information zu erhalten. Sollen z.B. die Eigenfrequenzen eines Bauwerks bestimmt werden, so können diese direkt aus dem Spektrum des Signals abgelesen werden.

Die Fouriertransformation wandelt ein Zeitsignal in ein Spektrum um. Eine ausführliche Beschreibung der Fouriertransformation würde den Rahmen dieser Arbeit bei weitem sprengen, so daß hier nur kurz auf die Schwierigkeiten und Möglichkeiten eingegangen und im weiteren auf die Literatur verwiesen wird (Bauer, 1981; Best, 1991; Profos und Pfeifer, 1992; Brigham, 1982; Achilles, 1985).

Die eigentliche Fouriertransformation arbeitet mit kontinuierlichen Signalen und Spektren. In der Meßtechnik wird aber immer mit abgetasteten Signalen gearbeitet, so daß dort die diskrete Fouriertransformation DFT angewandt wird. Dies hat einige Konsequenzen, so muß das Signal zuerst von der kontinuierlichen Darstellung in eine abgetastete gebracht werden, dies wird vom ADC erledigt. Außerdem stellt das so erhaltene Signal nur einen zeitlichen Ausschnitt des

ursprünglichen Signals dar, wodurch das GIBBS-Phänomen auftreten kann; dies ist eine Spektralverbreiterung durch nur teilweise im Signal enthaltene Perioden. Dieser Effekt kann durch die Wahl verschiedener Fensterfunktionen abgeschwächt werden. Die DFT geht ferner davon aus, daß sich das Signal nach seinem Ende periodisch fortsetzt, wodurch das ansonsten kontinuierliche Spektrum in diskrete Linien zerfällt.

Ist das Spektrum einer Bauwerksbewegung einmal berechnet, so können daraus leicht die Eigenfrequenzen mit den zugehörigen Dämpfungen bestimmt werden. Jede Eigenfrequenz tritt als ein Peak im Spektrum auf, aus dessen Breite der Dämpfungsfaktor bestimmt werden kann. Diese Information kann nur in ganz einfachen Fällen (eine Eigenfrequenz) direkt aus dem Zeitsignal gewonnen werden.

Neben den Eigenschwingungen treten in den Spektren jeden Bauwerks auch erzwungene Schwingungen auf. Da diese aber nur während äußerer Anregungen auftreten und nach deren Ende relativ schnell abklingen, können durch geeignete Anregung des Bauwerks, z.B. mit einem Kraftstoß, alleine die Eigenschwingungen angeregt werden.

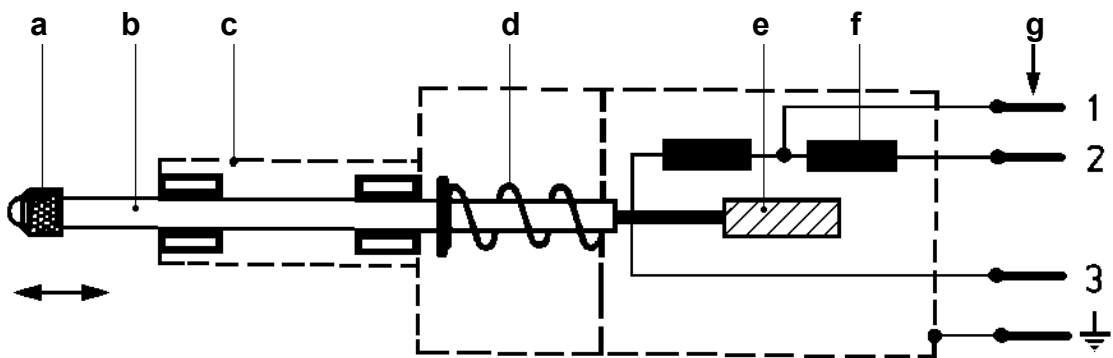
4 Hardware für kinematische Messungen

4.1 Ausgewählte Sensoren

4.1.1 Wegaufnehmer

Wegaufnehmer liefern ein Signal (im allgemeinen eine Spannung), welches direkt proportional zum Auszug des Tastbolzens ist. Es gibt verschiedene Meßmethoden: Resistive Wegaufnehmer, Differentialtransformatoren, induktive Wegaufnehmer, Dehnmeßstreifen. (Schlemmer, 1996; Pelzer, 1987)

Am gebräuchlichsten sind induktive Wegaufnehmer, bei denen der Tastbolzen mit einem Tauchanker verbunden ist, der in zwei im Aufnehmergehäuse angebrachten Spulen bewegt wird. Je nach Auszug des Tastbolzens befindet sich der Tauchanker mehr in der einen oder der anderen Spule, wodurch sich deren Induktivität ändert. In einem nachgeschalteten Meßverstärker kann diese Änderung gemessen und in eine wegproportionale Spannung umgewandelt werden.



a) Tastspitze b) Tastbolzen c) Spannschaft d) Feder e) Tauchanker f) Meßspule g) Stecker

Abbildung 4.1: Mechanisches Prinzipschaltbild eines induktiven Wegaufnehmers

Dadurch, daß der gemessene Weg durch den Vergleich der Induktivitäten der zwei Spulen erfolgt, spielen große Leitungslängen zwischen Sensor und Meßverstärker kaum eine Rolle (Differenzmessung). So haben Kabellängen bis 100 m kaum einen Einfluß auf die Empfindlichkeit, bis 600 m bleibt dieser Einfluß kleiner als 5 % und läßt sich zudem beim Kalibrieren der Meßkette ausgleichen. Es gibt Wegaufnehmer für einen Arbeitsbereich von einigen Millimetern bis zu einem Meter, die Genauigkeit beträgt 0,2 % des Arbeitsbereichs, also bis zu einigen μm . Da der Hauptfehler durch die Nichtlinearität der Kennlinie entsteht, können noch Wege in der Größenordnung von $0,1 \mu\text{m}$ gemessen werden, wenn die Nichtlinearitäten durch eine Kalibrierung bestimmt und bei der Auswertung berücksichtigt werden.

Zur Erzeugung des wegproportionalen Spannungssignals ist für jeden Sensor ein spezieller Meßverstärker notwendig. Ein weiterer Nachteil ist die Notwendigkeit einer festen Referenz, relativ zu der der Abstand gemessen wird, die zwar bei fast allen Meßsystemen notwendig ist (außer bei Inertialsensoren), hier aber durch die maximale Arbeitsspanne von einem Meter sehr nah am bewegten Objekt liegen muß.

Wegaufnehmer gehören zu den anschaulichsten Sensoren, da sie direkt Strecken bzw. Streckenänderungen messen. Des weiteren besitzen sie eine sehr hohe Genauigkeit, sind zuverlässig, robust, einfach einzusetzen und relativ preiswert.

Aufgrund der hohen Genauigkeit und des beschränkten Arbeitsbereiches werden diese Sensoren hauptsächlich im Maschinenbau und der Maschinenüberwachung eingesetzt. Im Vermessungswesen können sie eingesetzt werden, wenn kleine Bewegungen an einem stationären Objekt gemessen werden sollen.

Dehnmeßstreifen können auch zur Wegmessung eingesetzt werden, oft liefern sie aber nur Triggersignale für andere Messungen. Das Funktionsprinzip von Dehnmeßstreifen beruht darauf, daß ein Leiter bei Dehnung seinen Querschnitt und damit seinen Widerstand ändert. Diese Widerstandsänderung kann mit einem Meßverstärker gemessen und in ein zur Dehnung proportionales Signal umgewandelt werden.

4.1.2 Elektronische Kameras (CCD, PSD)

Als Kamera werden hier sowohl CCD (Charge Coupled Device) als auch PSD (Position Sensitive Device) bezeichnet. Beide Systeme basieren auf einem gänzlich anderen Funktionsprinzip: die einzige Gemeinsamkeit ist, daß das Objekt durch ein Objektiv auf den Sensor abgebildet wird (z.B: Mönicke, 1991a; Mönicke und Heck, 1992; Theuwissen, 1996).

Beim **CCD-Sensor** entsteht auf dem Sensor ein Bild, das wie bei einer normalen Videokamera in ein Videosignal umgesetzt wird, welches dann mit einem Videorecorder aufgezeichnet oder direkt verarbeitet werden kann. Für die eigentliche Umrechnung in Geometriedaten muß zum einen die Ausrichtung der Kamera bekannt sein, zum anderen die Position des Objektes innerhalb des Bildes. Um diese Position einfach durch entsprechende Signal- oder Bildverarbeitung bestimmen zu können, wird in den meisten Fällen eine Zielmarke mit einem definierten Muster am Objekt angebracht, wodurch die Erkennung der zu messenden Punkte stark vereinfacht wird.

Ein Vorteil dieses Verfahrens ist die Benutzung von passiven Zielmarkierungen und der Möglichkeit, mehrere Zielpunkte in einem Bild zu identifizieren. Bei handelsüblichen Kameras sind Bildwiederholraten von 25 Hz üblich, so daß die größte zu messende Frequenz 12,5 Hz beträgt. Spezialkameras erlauben Bildwiederholraten bis zu einigen kHz. Reflexe spielen nur eine untergeordnete Rolle, da sie meistens durch die Bildverarbeitung unterdrückt werden können. Die Auflösung auf der Sensorfläche beträgt ca. 10 μm , die Genauigkeit kann, je nach Anwendung und Auswertalgorithmus, einige μm betragen.

Der **PSD-Sensor** benötigt eine aktive Zielmarkierung, z.B. eine LED, die durch das Objektiv als Lichtfleck auf dem Sensor abgebildet wird. Je nachdem wo der Lichtstrahl auf den Sensor trifft, liefert dieser Ausgangssignale, aus denen die Position des Lichtflecks bestimmt werden kann. Auch hier muß die Ausrichtung der Kamera bekannt sein, um die Position des Zielobjektes berechnen zu können. Ein PSD-Sensor kann immer nur die Position eines Zieles bestimmen. Die maximal mögliche Meßfrequenz hängt von der Geschwindigkeit des nachgeschalteten ADC ab, es sind über 100 kHz möglich. Die Genauigkeit liegt bei etwa 1 μm .

Da der PSD-Sensor die Koordinaten des Schwerpunktes aller Lichtflecke auf der Sensoroberfläche liefert, können Reflexionen und Fremdlichteinstrahlungen Störungen verursachen. Diese werden oft über schmalbandige optische Filter minimiert.

Beiden Sensoren ist gemeinsam, daß sie nur Bewegungen quer zur optischen Achse mit einer entsprechenden Genauigkeit detektieren können. Außerdem muß zwischen der auf einem Referenzpunkt aufgestellten Kamera und dem Ziel Sichtverbindung bestehen.

4.1.3 Beschleunigungsmesser

Beschleunigungsmesser gehören zu den Inertialsensoren, d.h. sie messen physikalische Größen relativ zu einem Inertialsystem. Dies hat den Vorteil, daß kein explizites Referenzsystem

vorhanden sein muß, relativ zu dem gemessen wird, dafür muß allerdings die Transformation zwischen einem Inertialsystem und dem Meßkoordinatensystem bekannt sein.

Das Funktionsprinzip von Beschleunigungsmessungen beruht auf dem Prinzip der trägen Masse. Da aber träge und schwere Masse physikalisch nicht unterschieden werden können, reagieren alle Beschleunigungsmesser zusätzlich auf Schwerkkräfte (Gravitation). Im Sensorgehäuse ist eine Masse in einer Richtung (der sensitiven Achse) frei beweglich aufgehängt und wird durch Federn in einer mittleren Position gehalten. Wird das Sensorgehäuse einer Beschleunigung ausgesetzt, so bleibt die Masse aufgrund ihrer Trägheit zurück. Diese Auslenkung wird detektiert und durch einen Regelkreis über eine Spule auf Null geregelt. Der durch die Spule fließende Strom ist direkt proportional zur Beschleunigung des Sensorgehäuses in Richtung der sensitiven Achse (Sundstrand).

Gemessen wird die vektorielle Projektion der tatsächlichen Beschleunigung auf die Richtung der sensitiven Achse. Diese Betrachtungsweise gilt nur für ideale Sensoren und muß in der Realität durch ein Sensormodell ersetzt werden, welches auch die unerwünschten Sensoreigenschaften und die Sensorfehler enthält. Berücksichtigt werden müssen ein zeit- und temperaturabhängiger Offset, ein zeit- und temperaturabhängiger Skalenfaktor, Nichtlinearitäten der Übertragungskennlinie, Abweichungen der sensitiven Achse von der Sollrichtung, Abhängigkeiten von Querschleunigungen u.v.m. . Die meisten dieser Parameter lassen sich nicht durch eine einfache Kalibrierung bestimmen.

Übliche Beschleunigungsmesser können Beschleunigungen bis $\pm 300 \text{ m/s}^2$ mit einer Auflösung von 10^{-5} m/s^2 messen. Sie sind robust, einfach anzuwenden, sehr genau und eignen sich ideal zur Bestimmung der Eigenfrequenzen und Schwingungsmodi von Bauwerken. Aus den gemessenen Beschleunigungen können durch Integration auch die Geschwindigkeit und der zurückgelegte Weg berechnet werden, allerdings ist dazu eine hohe Meßfrequenz und eine aufwendige Auswertung nötig. Das Hauptproblem dieses Verfahrens ist neben den Driften von Offset und Skalenfaktor die Tatsache, daß nicht in einem Inertialsystem gemessen wird. Da die Ausgangsdaten aber relativ zu einem Inertialsystem geliefert werden, muß dies in ein erdfestes System am Ort der Messung transformiert werden. Dazu ist u.a. die exakte Kenntnis des Erdschwerevektors notwendig, der an jeder Position der Erdoberfläche einen anderen Wert annehmen kann.

Beschleunigungsmesser werden auch als Neigungsmesser eingesetzt, d.h. sie werden annähernd horizontal benutzt und messen dann die Projektion des Erdschwerevektors auf die sensitive Achse, woraus die absolute Neigung sehr genau bestimmt werden kann. Mit einem solchen System (z.B. COSAD: Möhlenbrink, 1984 und 1985; Preuss, 1980) können Neigungsänderungen von $2''$ bestimmt werden. Dieses Verfahren kann allerdings nur eingesetzt werden, wenn fast keine Beschleunigungen in Richtung der sensitiven Achse vorhanden sind, also praktisch nur im statischen Fall.

4.1.4 Kreisel

Genau wie die Beschleunigungsmesser gehören Kreisel zu den Inertialsensoren, d.h.: auch bei ihnen muß kein explizites Referenzsystem vorhanden sein.

Das Funktionsprinzip eines Kreisels basiert auf dem Drehimpulserhaltungssatz. Wird auf eine im Gehäuse rotierende Masse (durch eine Drehung) ein Drehmoment ausgeübt, so weicht sie quer zur Drehrichtung aus (Kreiseltheorie) (Magnus, 1971). Mit einem Regelkreis wird die Abweichung auf Null geregelt. Die Regelgröße ist proportional zur Winkelgeschwindigkeit des Sensors relativ zu einem Inertialsystem. Je nach Bauart des Kreisels können Drehungen um bis zu 2 Achsen detektiert werden.

Zusätzlich zu den oben beschriebenen mechanischen Kreisel gibt es auch optische Kreisel, bei denen die rotierende Masse durch einen umlaufenden Lichtstrahl ersetzt ist. Die Drehraten werden in diesem Fall durch den Sagnac-Effekt (Bergmann und Schäfer, 1993; Garus, 1985) gemessen. Man unterscheidet die Faseroptischen Kreisel (FOG), bei denen das Licht in einer Glasfaser umläuft und Laserkreisel, bei denen das Licht im Laserresonator durch Spiegel auf einer Dreiecksbahn geführt wird.

Bei den meisten Kreiseln (mechanische und optische) werden die gemessenen Drehraten bereits von der integrierten Elektronik digitalisiert, so daß die Daten direkt in digitaler Form zur Verfügung stehen. Auch Kreisel messen nur die vektorielle Projektion der tatsächlichen Drehrate auf die Richtung der sensitiven Achse. Um alle Sensoreigenschaften berücksichtigen zu können, muß ein Sensormodell benutzt werden, welches die Eigenschaften des Sensors wie zeit- und temperaturabhängiger Offset, zeit- und temperaturabhängiger Skalenfaktor, Nichtlinearitäten der Übertragungskennlinie, Abweichungen der sensitiven Achse von der Sollrichtung, Abhängigkeiten von Beschleunigungen u.v.m. enthält. Die meisten dieser Parameter lassen sich nicht durch eine einfache Kalibrierung bestimmen. (Niederstrasser, 1986)

Typische mechanische Kreisel können Drehraten bis zu einigen 100 °/s mit einer Genauigkeit von 0,03 °/h messen (LITEF). Bei optischen Kreiseln unterscheidet man Faserkreisel (FOG) mit Genauigkeiten von ca. 3 °/h und Laserkreisel (RLG) mit Genauigkeiten von bis zu 0,003 °/h.

Mechanische Kreisel sind klein und genau, aber nicht sehr robust. Dagegen können die sehr kompakten und robusten FOGs überall eingesetzt werden, wobei ihre Genauigkeit um 2 Größenordnungen schlechter ist. Laserkreisel sind die genauesten, allerdings sind sie etwas größer und teurer. Des weiteren ist bei fast allen Laserkreiseln ein mechanisches Dithering erforderlich, um den Lock-In-Effekt zu umgehen. Diese dadurch erzeugten Vibrationen können andere Messungen negativ beeinflussen.

4.1.5 Inertialnavigationssysteme

Ein Inertialnavigationssystem (INS) ist an sich schon ein Multisensorsystem, denn es besteht aus 3 Beschleunigungsmessern und 3 Kreiseln (oder 2 Kreiseln mit je 2 sensitiven Achsen), die jeweils orthogonal montiert sind. Dadurch kann die vektorielle Beschleunigung und die vektorielle Drehung relativ zu einem Inertialsystem bestimmt werden. Durch geeignete Auswertung der Signale (Transformation in das Navigationskoordinatensystem und doppelte Integration) kann die Position und die Orientierung des INS bestimmt werden.

Die von einem INS gemessene Position ist für kurzzeitige (einige Minuten) und relative Bewegungen (einige Meter) sehr gut (Genauigkeit einige μm), bei längeren Meßperioden verschlechtert sich durch die unvermeidlichen Driften der Sensoren die Genauigkeit rapide. Für Messungen mit Inertialnavigationssystemen spielt die Kalibrierung eine besonders wichtige Rolle, da sich die dabei bestimmten Driftparameter im Laufe der Zeit ändern. Eine Kalibrieremethode wird in Kapitel 6.2 vorgestellt.

4.2 Sensorauswahl

Ist das Meßproblem analysiert und ein Modell erstellt worden, so muß festgelegt werden, welche Sensoren an welchen Positionen des Bauwerks zu welchen Zeitpunkten welche physikalischen Größen mit welcher Genauigkeit messen müssen. Meistens gibt es nicht nur eine, sondern viele, zum Teil gleichwertige Ansatzmöglichkeiten.

Eine allgemeingültige Vorgehensweise, die immer zum optimalen Meßkonzept führt, läßt sich leider nicht angeben. Deshalb werden im folgenden nur einige Kriterien für die Sensorauswahl stichpunktartig aufgezählt (Pelzer, 1987):

- welche physikalischen Meßgrößen müssen erfaßt werden?
- an welchen Bauwerkspositionen?
- mit welcher Genauigkeit?
- mit welcher Meßfrequenz?
- ist der Einsatz überhaupt möglich? (Referenzpunkt, Sichtverbindung, Abschattung, Zugänglichkeit, Vibrationen, ...)
- Aufwand der Installation?
- Aufwand der Auswertung?
- wie hoch sind die Kosten?

4.3 Tiefpaß

Der Tiefpaß in Abbildung 2.7 der Meßkette dient dazu, die hohen Frequenzanteile herauszufiltern. Die Durchlaßcharakteristik eines Tiefpasses ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

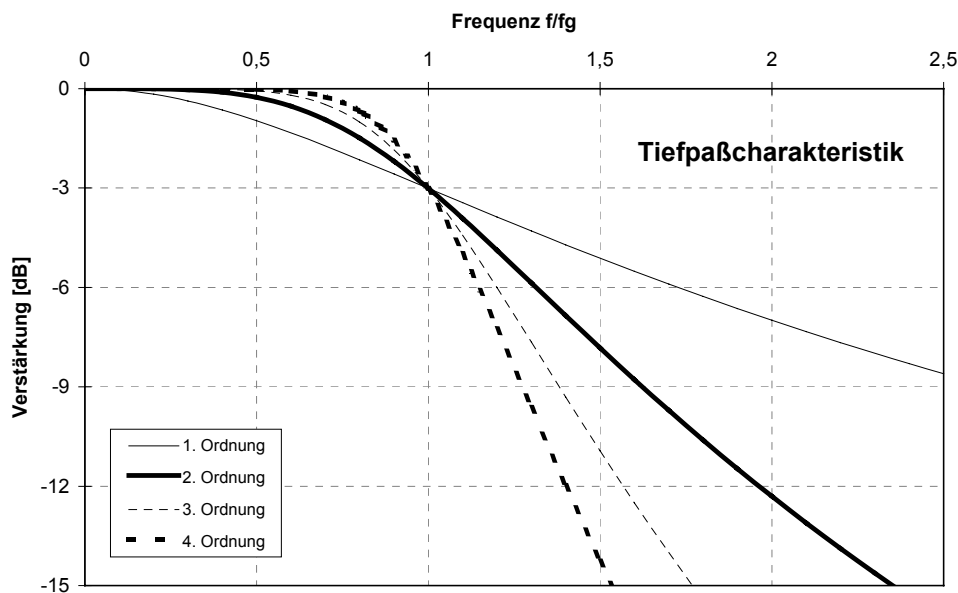


Abbildung 4.2: Durchlaßcharakteristik eines Tiefpasses

Ein Tiefpaß läßt Signale mit einer Frequenz unterhalb der Grenzfrequenz fast ungehindert durch. Bei der Grenzfrequenz f_g werden die Signale um 3 dB gedämpft. Man unterscheidet Tiefpässe nach der Ordnung; je höher die Ordnung, desto stärker wird das Signal oberhalb der Grenzfrequenz gedämpft, und zwar mit ca. 20 dB pro Dekade und Ordnung.

Ein Tiefpaß ist in allen Meßwerterfassungssystemen notwendig, zum einen, um sicherzustellen, daß das Samplingtheorem eingehalten wird, zum anderen, um nicht benötigte Frequenzbereiche, die nur Rauschen enthalten, herauszufiltern.

4.4 Sampel & Hold-Glied

Bei den meisten A/D-Wandlern darf sich das Eingangssignal während der Wandlung nicht ändern. Dies kann mit einem Sample & Hold-Glied (S&H) erreicht werden, welches das Signal auf ein Triggersignal hin einfriert. (Best, 1991a)

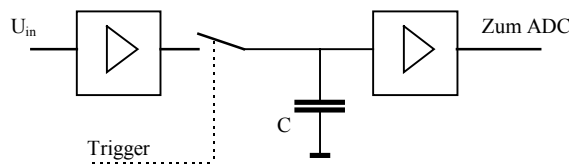


Abbildung 4.3: Funktionsweise eines S&H-Gliedes

Bei geschlossenem Schalter wird der Kondensator C vom ersten Verstärker so aufgeladen, daß er immer die gerade im Signal enthaltene Spannung enthält. Wird zum Zeitpunkt t_0 der Schalter durch ein Triggersignal geöffnet, so besteht keine Verbindung zum Eingangssignal mehr und der Kondensator behält die Spannung des Eingangssignals zum Zeitpunkt t_0 bei. Durch den zweiten Verstärker wird diese Spannung so abgefragt, daß der Kondensator sich praktisch nicht entlädt. Das heißt, die Schaltung liefert nach dem Zeitpunkt t_0 ein konstantes Ausgangssignal, welches der ADC problemlos digitalisieren kann.

4.5 Multiplexer

Ein Multiplexer ist ein elektronischer Mehrfach-Umschalter, der es ermöglicht, mehrere analoge Eingangssignale aus verschiedenen Quellen mit einem A/D-Wandler zeitlich nacheinander zu diskretisieren. Sein Einsatz ist besonders in Multi-Sensor-Meßsystemen sinnvoll, da damit nacheinander alle Sensoren mit nur einem ADC abgefragt werden können. Der Nachteil ist aber, daß die einzelnen Sensoren zu unterschiedlichen Zeitpunkten abgefragt werden. Dies ist in vielen Fällen unerheblich, sollen aber mehrere Werte zu einer vektoriellen Meßgröße zusammengefaßt werden, wie z.B. die Beschleunigungen eines Inertialnavigationssystems, so müssen die Werte exakt gleichzeitig erfaßt werden.

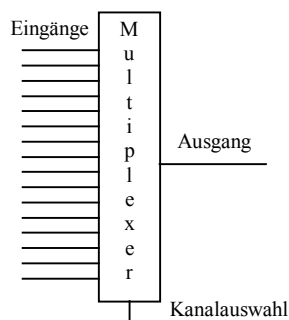


Abbildung 4.4: Multiplexer

4.6 A/D-Wandler

Die oben beschriebene Diskretisierung wird in einem A/D-Wandler (ADC) vorgenommen. Es gibt viele verschiedene Arten der Wandlung, die alle ihre Vor- und Nachteile haben. Das Entscheidende dabei ist aber, daß bei manchen ADCs die Meßkette modifiziert werden muß. Aus diesem Grund werden hier die gängigsten Verfahren vorgestellt. Eine ausführlichere Behandlung kann in Best (1991a) sowie in Bauer (1981), Profos und Pfeifer (1992), Hinüber und Janocha (1994) und iMAR (1994) nachgelesen werden.

4.6.1 Direkte Wandler

Die einfachsten Wandler sind die, die direkt die physikalische Größe in einen digitalen Wert wandeln. Als Beispiel sei hier der Winkelencoder oder der Lineargeber genannt, wobei inkrementelle und absolute Verfahren unterschieden werden.

Inkrementelle Wandler liefern für jede Änderung der Eingangsgröße um Δx einen Impuls am Ausgang, der in einem Zähler aufsummiert werden kann. Die Impulse können z.B. durch eine Zahnschiene und eine Lichtschranke (LS) erzeugt werden. Wird noch eine 2. Lichtschranke um $\frac{1}{4} \Delta x$ versetzt verwendet, so kann auch die Bewegungsrichtung berücksichtigt werden. Solche Systeme liefern immer Werte, die sich auf die Ausgangsposition beziehen; ist diese bekannt, so kann der absolute Meßwert berechnet werden. Diese Verfahren werden z.B. bei den in Theodoliten eingebauten Teilkreisen eingesetzt (Joeckel, 1995).

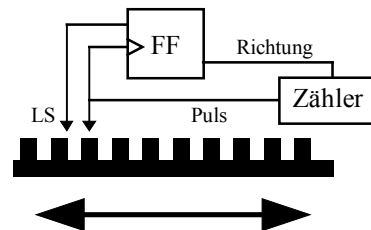


Abbildung 4.5: Prinzip eines inkrementellen Wandlers

Absolute Wandler verwenden meistens ein Schwarzweißmuster, welches mit mehreren Lichtschranken abgetastet wird. Die von den Lichtschranken gelieferten Signale ergeben sofort den binären Wert der Meßgröße. Sind die Lichtschranken nicht exakt ausgerichtet (siehe Abbildung 4.6a), so können grobe Fehler auftreten (hier 12 statt 8). Um dies zu vermeiden, wird normalerweise der Gray-Code verwendet, bei dem sich 2 aufeinanderfolgende Zahlen genau um ein Bit unterscheiden. Dadurch ist der maximale Fehler durch dejustierte Lichtschranken ein digit. Diese Verfahren werden z.B. bei den in Theodoliten eingebauten codierten Teilkreisen eingesetzt (Joeckel, 1995).

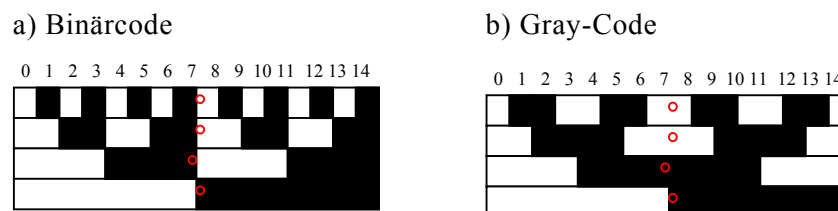


Abbildung 4.6: Binäre und Gray-Codierung für absolute direkte Wandler

Der Vorteil dieser Wandler liegt im einfachen mechanischen Aufbau und damit dem günstigen Preis. Die Auflösung kann bei inkrementellen Wandlern sehr hoch sein (Teilkreise), allerdings wird dann die Mechanik wieder aufwendiger. Solche Wandler gibt es praktisch nur als Weg- und Winkelencoder.

4.6.2 Spannungs-Frequenz-Wandler

Bei diesem Verfahren wird die Eingangsspannung durch einen VCO (Voltage Controlled Oscillator) in eine dazu proportionale Frequenz umgewandelt, die dann durch einen Zähler in einen digitalen Wert gewandelt wird. In Abbildung 4.7 ist das Prinzip eines solchen Wandlers dargestellt. Daraus erkennt man sofort, daß es sich hierbei um ein integrierendes Verfahren handelt.

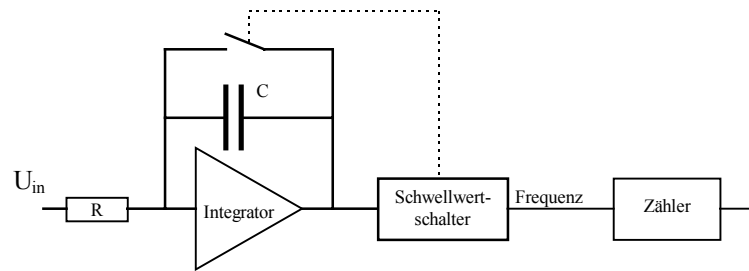


Abbildung 4.7: Funktionsprinzip eines Spannungs-Frequenz-Wandlers

Die Vorteile dieses Verfahrens liegen im einfachen Aufbau, dem geringen Preis, der hohen Auflösung und Genauigkeit und in der Möglichkeit, den VCO und den Zähler durch eine lange Leitung praktisch ohne Störeinflüsse verbinden zu können. Nachteile sind die langsame Wandelgeschwindigkeit und der begrenzte Wertebereich, der nur positive Eingangsspannungen zuläßt.

4.6.3 Single-Slope-Wandler

Die Eingangsspannung wird bei diesem Verfahren in eine dazu proportionale Zeit umgewandelt, die dann mit einem Oszillator und Zähler bestimmt wird. Das von einem Sägezahn-generator erzeugte Signal wird mit der Eingangsspannung verglichen. Wenn die Sägezahnspannung zwischen 0 V und U_{ein} liegt, wird ein angeschlossener Zähler hochgezählt. Dies ist kein integrierender Wandler, denn es wird immer mit der variablen Referenzspannung verglichen.

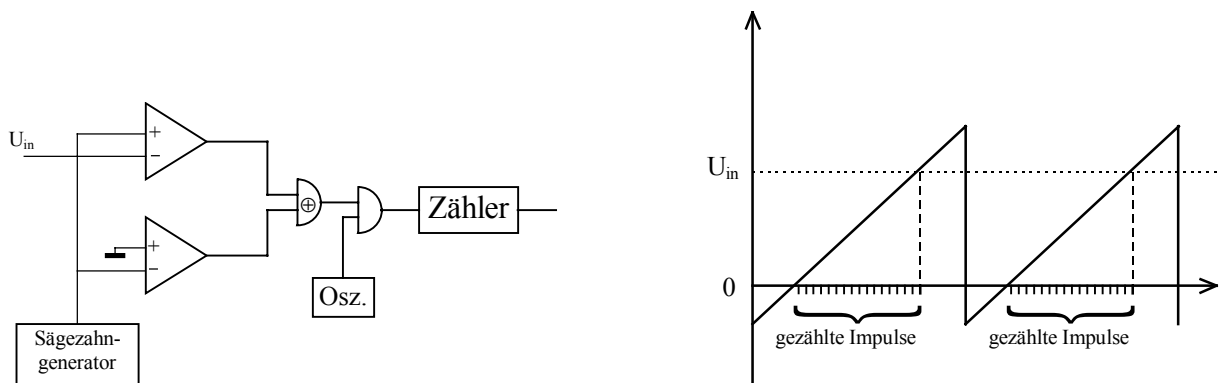


Abbildung 4.8: Funktionsweise eines Single-Slope A/D-Wandlers

Die Linearität, Stabilität und Eingangsempfindlichkeit hängt direkt mit der Güte des Sägezahn-generators zusammen. Probleme bereitet hier vor allem die Drift in der Steigung des Sägezahns, so daß daraus eine Drift in der Empfindlichkeit des Wandlers resultiert.

4.6.4 Dual-Slope

Dieser Nachteil kann durch das Dual-Slope-Verfahren vermieden werden. Hierbei wird das Eingangssignal während der konstanten Zeit T aufintegriert. Anschließend wird eine negative Referenzspannung integriert, bis das Ausgangssignal wieder Null ist. Die Zeit τ für dieses „entladen“ ist proportional zum Integral über das Eingangssignal. Es gilt

$$0 = \int_0^T U_{\text{in}} dt - \int_0^{\tau} U_{\text{ref}} dt, \quad \text{woraus folgt, daß} \quad \tau = \frac{\int_0^T U_{\text{in}} dt}{U_{\text{ref}}},$$

d.h., daß τ proportional zur mittleren Eingangsspannung im Zeitintervall $[0, T]$ ist. Diese Zeit wird wieder mit einem Oszillator und nachgeschaltetem Zähler bestimmt.

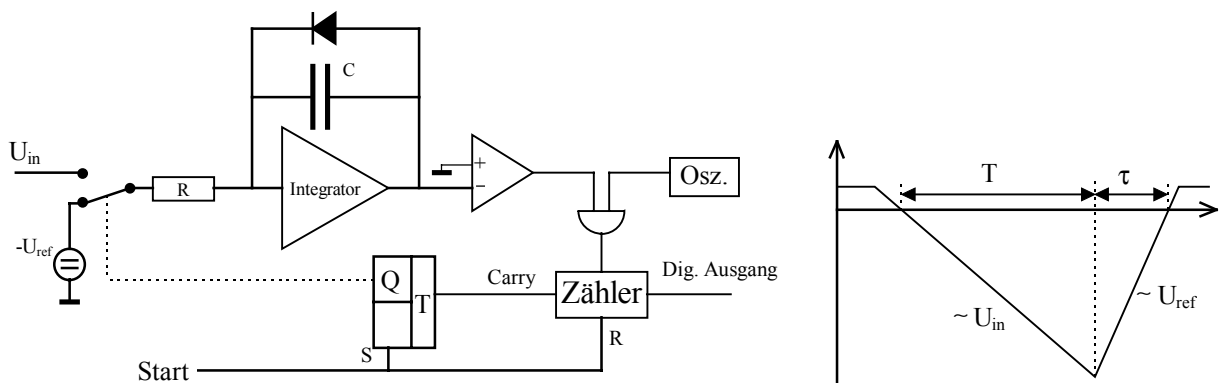


Abbildung 4.9: Funktionsweise eines Dual-Slope A/D-Wandlers

Aus Abbildung 4.9 erkennt man, daß dies ein integrierendes Verfahren ist, allerdings wird das Eingangssignal nur während des Zeitintervalls T aufintegriert, davor und danach wird es nicht verwendet. Selbst wenn sofort danach wieder eine Wandlung gestartet wird, bleibt das Zeitintervall, während dem die Referenzspannung integriert wird, unberücksichtigt. Ein echt integrierendes Verfahren ist im nächsten Kapitel beschrieben.

Diese Methode ist sehr genau (3 bis $5 \frac{1}{2}$ Dezimalstellen) und besitzt durch die Integration eine hohe Linearität. Die Stabilität hängt direkt mit der Güte der Referenzspannungsquelle zusammen. Offsets werden oft noch in einem 3. Zyklus korrigiert. Die Wandelzeit hängt von der Auflösung ab, liegt aber im allgemeinen im Bereich von 1 bis 50 ms. Auf diesem Verfahren basieren die meisten handelsüblichen Standard-A/D-Wandler.

4.6.5 Echt integrierende Wandler

Der Unterschied zwischen abtastenden und integrierenden ADCs kann am besten anhand von Abbildung 4.10 erläutert werden.

In Teilbild a) ist das von einem abtastenden ADC erzeugte Signal dargestellt. Zu jedem markierten Zeitpunkt wird der momentane Signalwert bestimmt und ausgegeben. Dieser Wert bleibt bis zum nächsten Meßzeitpunkt unverändert. Wird gerade während eines Störsignals gemessen, so ist der gemessene Wert grob falsch (siehe positive Spitze). Sind im Meßsignal allerdings solche Spitzen vorhanden, die gemessen werden sollen, so kann es sein, daß sie bei diesem Verfahren überhaupt nicht erfaßt werden (siehe negative Spitze). Wird das Abtasttheorem eingehalten, sollte dieser Fall allerdings nie auftreten.

Teilbild b) zeigt dasselbe Signal, das diesmal allerdings von einem integrierenden ADC gemessen wird. Zu jedem markierten Zeitpunkt wird der Mittelwert des Eingangssignals über das letzte Meßintervall bestimmt. Dies ist der Meßwert bis zum nächsten Meßzeitpunkt. Bei diesem Verfahren ist die Fläche unter der Kurve, also das Integral, exakt im Meßsignal abgebildet. Die beiden Spitzen tauchen stark abgeschwächt im Ausgangssignal auf. Dies veranschaulicht auch die Tiefpaßcharakteristik der Integration und macht deutlich, weshalb in diesem Fall der Tiefpaß und das S&H-Glied in der Meßkette entfallen können (und müssen). Deutlich ist auch die Phasenverschiebung um einen Meßzyklus zu erkennen.

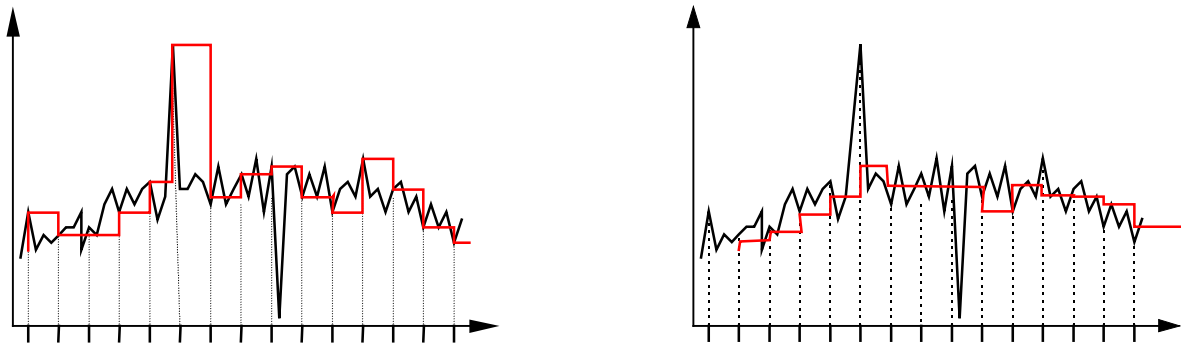


Abbildung 4.10: a) Signal eines abtastenden ADC

b) Signal eines integrierenden ADC

Integrierende Wandler sollten vor allem dort verwendet werden, wo in der anschließenden Auswertung integriert wird. Dies ist zum Beispiel bei Inertialsensoren der Fall, so daß das von einem Beschleunigungsmesser gelieferte Signal dann schon Geschwindigkeitsinkremente sind.

Das oben vorgestellte Dual-Slope-Verfahren arbeitet auch integrierend, allerdings bleiben dabei einige Zeitintervalle unberücksichtigt. Nachfolgend wird ein „echt kontinuierlich integrierendes“ Verfahren vorgestellt, bei welchem das Ausgangssignal tatsächlich das Integral über das Eingangssignal im letzten Meßintervall liefert. Eine detaillierte Beschreibung kann in Hinüber und Janocha (1994) und iMAR (1994) nachgelesen werden.

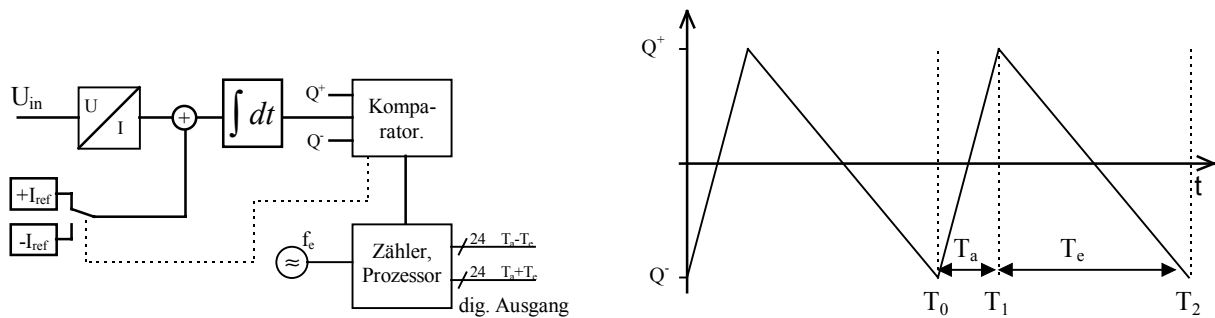


Abbildung 4.11: Funktionsweise des echt integrierenden ADCs

Die Eingangsspannung wird in einen proportionalen Strom umgewandelt, zu dem dann der Referenzstrom $+I_{ref}$ addiert wird. Dieser Strom $I+I_{ref}$ wird in einem Integrator aufintegriert, bis die Ladung Q^+ erreicht ist. Daraufhin wird die Polarität des Referenzstromes umgepolt, so daß nun der Strom $I-I_{ref}$ integriert wird. Ist die Ladung Q^- erreicht, wird die Polarität wieder gewechselt. Gleichzeitig werden die Integrationszeiten T_a und T_e wie üblich mit einem Zähler gemessen und die beiden Werte T_a-T_e und $T_a + T_e$ am digitalen Ausgang zur Verfügung gestellt. Für den Lade- und Entladevorgang gilt

$$\text{Laden: } \Delta Q := Q^+ - Q^- = \int_{T_0}^{T_1} (I + I_{ref}) dt = \int_{T_0}^{T_1} I dt + I_{ref} \cdot T_a$$

$$\text{Entladen: } -\Delta Q := Q^- - Q^+ = \int_{T_1}^{T_2} (I - I_{ref}) dt = \int_{T_1}^{T_2} I dt - I_{ref} \cdot T_e$$

Durch Addition dieser Gleichungen ergibt sich

$$\int_{T_0}^{T_2} I dt = -I_{ref} \cdot (T_a - T_e),$$

und damit für dem Mittelwert \bar{I} der Eingangsgröße über das letzte Abtastintervall

$$\bar{I} = \frac{\int_{T_0}^{T_2} I dt}{T_a + T_e} = -I_{ref} \frac{T_a - T_e}{T_a + T_e}.$$

Nach dieser Formel kann durch einfache Division der am digitalen Ausgang angebotenen Werte ein Signal erhalten werden, dessen Größe immer proportional zum Mittelwert des Eingangssignals im letzten Meßintervall ist. Bei diesem Verfahren ist es nicht erforderlich, daß die Meßzeitpunkte in konstanten Zeitabständen erfolgen, allerdings ist dies in Hinblick auf die anschließende Auswertung wünschenswert.

Es lassen sich damit Abtastraten von bis zu 4 kHz und Auflösungen bis 24 Bit bei einem Linearitätsfehler von nur 1 ppm erreichen. Ein weiterer Vorteil ist die echt kontinuierliche Integration des Eingangssignals, weshalb auf den Tiefpaß und das S&H-Glied in der Meßkette verzichtet werden kann. Nach diesem Verfahren arbeitende A/D-Wandler sind ideal für den Einsatz mit Inertialsensoren geeignet, da dadurch der bei der ersten Integration durch die Digitalisierung gemachte Fehler praktisch vollständig verschwindet.

4.6.6 Parallele Wandler

Aus der Referenzspannung werden 2^n Teilspannungen erzeugt, mit denen das Eingangssignal verglichen wird. Die Anzahl der Leitungen, bei denen die Eingangsspannung größer ist als die jeweilige Referenzspannung, gibt direkt den digitalen Wert der Eingangsspannung wieder. Diese Anzahl wird vom Decoder bestimmt und an einem digitalen Ausgang zur Verfügung gestellt.

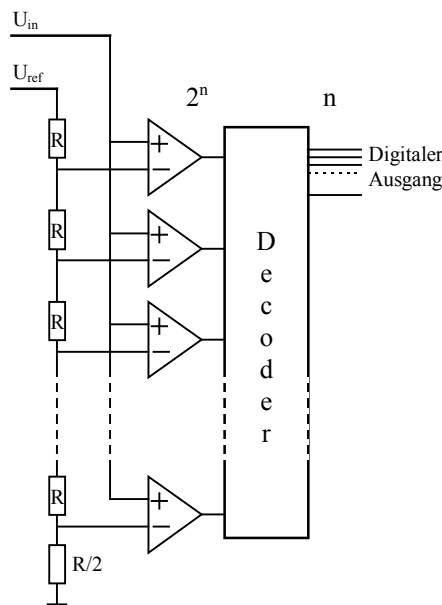


Abbildung 4.12: Funktionsweise eines parallelen A/D-Wandlers

Dies ist der schnellste A/D-Wandler: bei 8 Bit Auflösung sind Taktraten von bis zu 100 MHz möglich (Wandelzeiten bis 10 ns). Höhere Auflösungen als 8 Bit werden kaum hergestellt, da der interne Schaltungsaufwand erheblich ist.

4.6.7 D/A-Wandler mit Komparator

Diese Wandler bestehen aus einem D/A-Wandler (Digital zu Analog Konverter), der in einer Regelschleife immer so angesteuert wird, daß seine Ausgangsspannung möglichst mit der Eingangsspannung übereinstimmt. In der Realität hinkt der Ausgangswert der Eingangsspannung immer etwas hinterher.

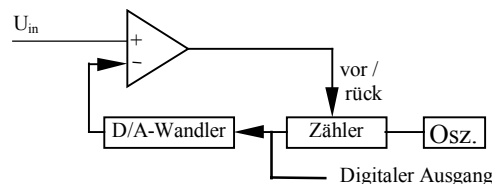


Abbildung 4.13: A/D-Wandler aus D/A-Wandler mit Nachlaufverfahren

In Abbildung 4.13 ist das Prinzip eines Nachlaufreglers gezeigt. Er ist einfach aufzubauen und damit billig, allerdings ist er langsam. Die maximale Signalanstiegsgeschwindigkeit ist ein digit pro Taktzyklus, kann aber durch eine spezielle Auslegung des Regelkreises verbessert werden.

4.7 Datenerfassung und Speicherung

Da die in der kinematischen Meßtechnik vorkommenden Frequenzen (einige mHz bis einige kHz) in der Regel eine manuelle Werteerfassung nicht mehr zulassen und bei den meisten Aufgabenstellungen sowieso eine Verarbeitung der Meßdaten mit Computern erfolgt, werden nur Meßsysteme betrachtet, die ihre Meßwerte in digitaler Form bereitstellen. Dies können entweder direkte Digitalwandler – z.B. Winkelencoder – sein, die die physikalische Meßgröße direkt in einen digitalen Wert wandeln, oder es sind Sensorsysteme, die zuerst ein analoges elektrisches Signal erzeugen, welches dann in einem ADC diskretisiert wird. Die meisten Sensorsysteme arbeiten nach letzterem Prinzip, wobei die Diskretisierung oft schon im Sensorgehäuse vorgenommen wird.

Die Meßfrequenz, auch Samplingrate genannt, ist die Anzahl der pro Sekunde durchgeführten Messungen. Sie wird hauptsächlich durch das in Kapitel 3.1 beschriebene Abtasttheorem festgelegt. Zur Festlegung der Meßfrequenz muß die Dynamik des Objektes in etwa bekannt sein, um die vorkommenden und interessierenden Frequenzen abschätzen zu können. Ist dies nicht möglich, muß eine Testmessung mit möglichst hoher Meßfrequenz vorgenommen werden, aus der dann die interessierenden Frequenzbereiche bestimmt werden.

Sollen aus dem Meßsignal nicht Frequenzen bestimmt werden, sondern Zeitpunkte, zu denen bestimmte Ereignisse auftreten, so muß die Meßfrequenz mindestens zu $f_{abt} = 1/t_g$ gewählt werden, wobei t_g die geforderte Zeitauflösung ist.

Bei den meisten Messungen ist es sinnvoll, die Original-Meßdaten zu speichern und nicht bereits vorverarbeitete Werte. Aus den Originaldaten können die daraus abgeleiteten Werte jederzeit wieder berechnet werden.

Als Speichermedium können Festplatten, Magnetbänder, Flash-Ram, CD-Rom, ... eingesetzt werden. Die wesentlichen Kriterien für die Auswahl sind die Zugriffszeiten, die Speicherkapazität und die Verfügbarkeit.

5 Aufbau eines Multi-Sensor-Meßsystems

Der aktuelle Stand der Technik in der Sensor- und Meßtechnik ist z.B. in Bauer (1981), Bellanger (1984), Juckenack (1990), Best (1991), Profos und Pfeifer (1992), Schiessle (1992), Niebuhr (1996) und Schlemmer (1996) dargestellt.

Artikel zu Multi-Sensor-Anwendungen (auch aus dem Bereich der Robotik) sind in Mesch (1986), Raczkowski (1991), Hall (1992), Hagg (1993), Plapper (1993), Zunker (1993) und Jörg (1994) enthalten.

Im Folgenden werden die bei Multi-Sensor-Meßsystemen zu beachtenden Besonderheiten beschrieben.

5.1 Konzeption des Meßsystems

Es gibt prinzipiell zwei mögliche Konzeptionen für ein Multi-Sensor-Meßsystem: die dezentrale und die zentrale Datenerfassung. Bei Birkle (1986) werden diese als off-line-Meßnetze und on-line-Meßnetze bezeichnet. Es wird aber nur auf letztere näher eingegangen, außerdem werden nur relativ große Abtastraten (10 Minuten bis 24 Stunden) betrachtet. Dabei ist die Synchronisation der Einzelsensoren unkritisch, da es sich im Prinzip um statische Messungen handelt.

Bei der dezentralen Datenerfassung hat jeder Sensortyp sein eigenes unabhängiges Meßsystem, welches die Daten erfaßt, evtl. aufbereitet und anschließend für die spätere Auswertung aufzeichnet. Um bei dieser die von den unterschiedlichen Sensoren erfaßten Daten in einem übergreifenden Modell gemeinsam auswerten zu können, muß ein Zeitbezug zwischen den unterschiedlichen Teilmessungen vorhanden sein, der schon während der Messung mit den Daten abgespeichert wird. Zu diesem Zweck müssen die Sensormeßsysteme in der Lage sein, zusätzlich Zeitinformationen zu verarbeiten oder ein Zeitsignal abzugeben. Die Verknüpfung der einzelnen Teilmeßsysteme geschieht also über die Zeitsignale.

Die zweite Möglichkeit der zentralen Datenerfassung für alle Sensortypen stellt sehr hohe Anforderungen an ein solches System, da sehr unterschiedliche Sensoren mit verschiedenen Abtastraten, Genauigkeiten und Hardwareanforderungen integriert werden müssen. Des weiteren müssen die Daten von den verteilten Sensoren über lange Kabel oder eine Telemetriestrecke zur zentralen Datenerfassung geleitet werden, was zusätzliche Fehlerquellen beinhaltet. Das eigentliche Datenerfassungssystem muß ein modular aufgebauter Meßrechner mit einem echtzeitfähigen Betriebssystem sein, damit auch asynchron anfallende Meßwerte zum richtigen Zeitpunkt erfaßt werden können. Eine Zeitsynchronisation zwischen den verschiedenen Sensordaten ist auch hier wieder nötig, kann aber einfach über die Meßsoftware implementiert werden.

Nur mit dem zweiten System ist eine Online-Auswertung möglich, die mit dem ersten nicht realisierbar ist. Allerdings ist bei vielen Problemen eine Offline-Auswertung ausreichend, so daß bereits vorhandene Meßsysteme innerhalb eines übergeordneten dezentralen Datenerfassungssystems verwendet werden können. Im allgemeinen Fall wird eine Kombination der beiden Meßverfahren eingesetzt, um die vorhandene Hardware optimal ausnutzen zu können.

Bei beiden Meßsystemen muß bei der Auswertung berücksichtigt werden, daß der dem jeweiligen Meßwert zugeordnete Zeitpunkt nicht unbedingt identisch mit der zu messenden Größe zu diesem Zeitpunkt ist. Jedes Sensorsystem hat eine spezifische Verzögerungszeit, nach der der Meßwert am Ausgang zur Verfügung steht. Bei der Auswertung kann es notwendig sein, diese Verzögerungszeit für jedes Sensorsystem unabhängig zu berücksichtigen.

5.1.1 Dezentrales Datenerfassungssystem (DDES)

In Abbildung 5.1 bis Abbildung 5.3 sind verschiedene Funktionsschaubilder für dezentrale Datenerfassungssysteme dargestellt. Die zu messenden Größen werden jeweils von einem eignen Sensorsystem erfaßt, welches die Daten an eine für dieses System spezifische Datenerfassung weitergibt. In den meisten Fällen wird für jedes Sensorsystem eine eigene Speichermöglichkeit verwendet. Im Prinzip handelt es sich bei einem solchen System um eine Ansammlung von unabhängigen eigenständigen Meßsystemen. Die Kombination solcher Systeme zu einem dezentralen Datenerfassungssystem ist realisierbar, wenn eine Zuordnung der einzelnen Daten zueinander möglich ist.

Synchronisation über Triggerung

Die einfachste Möglichkeit dafür ist, alle Teilsysteme gleichzeitig zu starten und jedes Teilsystem selbst für einen Zeitbezug relativ zu diesem Startzeitpunkt sorgen zu lassen. Dies ist bei Meßsystemen mit konstanter Meßfrequenz einfach über die Nummer des Meßwertes möglich, bei Systemen, welche die Meßwerte in unregelmäßigen Zeitabständen liefern, muß zu jedem Meßwert der (relative) Zeitpunkt der Messung gespeichert werden. Die eindeutige Zuordnung der Daten ist aber nur dann möglich, wenn im ersten Fall die Meßfrequenz sehr genau bekannt und stabil und im zweiten Fall die interne Uhr sehr genau ist. Außerdem müssen die Teilsysteme die Möglichkeit zur externen Triggerung bieten, damit sichergestellt werden kann, daß alle Systeme gleichzeitig gestartet werden. Dafür müssen die Systeme durch eine Triggerleitung verbunden sein.

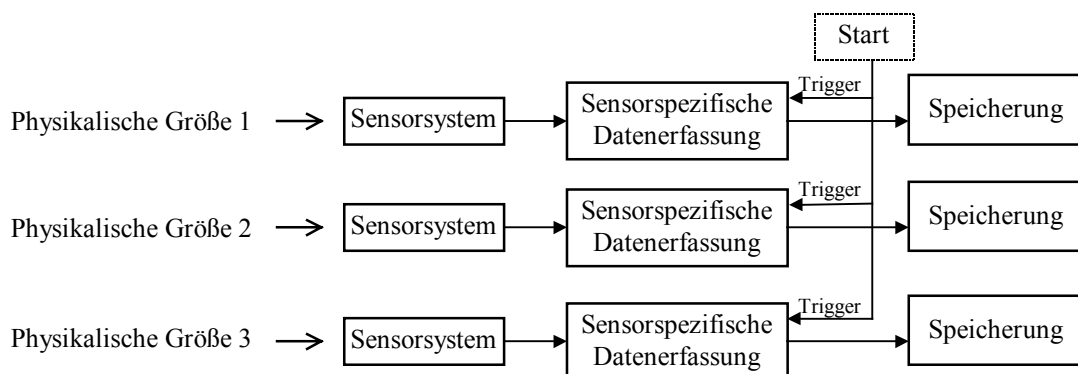


Abbildung 5.1: Funktionsschaubild eines dezentralen Datenerfassungssystems mit Synchronisation über ein gemeinsames Triggersignal

Die Triggerung kann auch dazu verwendet werden, die einzelnen Messungen auszulösen. In diesem Fall ist das Triggersignal nicht ein Startimpuls für ein autonomes Meßsystem, sondern ein von einem Frequenzgenerator geliefertes Signal, welches die Zeitpunkte der Einzelmessungen festlegt. Die einzelnen Meßsysteme müssen in der Lage sein, auf ein Triggersignal hin eine Einzelmessung auszulösen.

Synchronisation über gemeinsames Zeitsignal

Eine andere Möglichkeit ist, allen Teilsystemen ein globales Zeitsignal zur Verfügung zu stellen. Diese müssen in der Lage sein, ein solches Zeitsignal zu erfassen und mit den Daten abzuspeichern. Ist das Zeitsignal eindeutig, so können die Daten der Teilsysteme einander zugeordnet werden, ohne daß sie gleichzeitig gestartet werden müssen. Bei dieser Möglichkeit müssen die Systeme durch eine Zeitsignalleitung verbunden werden.

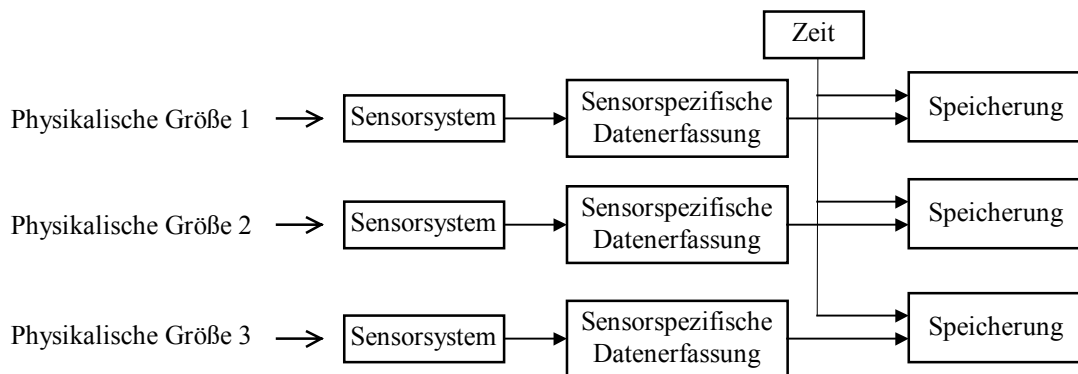


Abbildung 5.2: Funktionsschaubild eines dezentralen Datenerfassungssystems mit Synchronisation über ein gemeinsames Zeitsignal

Synchronisation über Korrelation der Daten

Die einzige Methode, bei der die Teilsysteme nicht durch eine Kabelverbindung verbunden werden müssen, ist die Zuordnung über die Korrelation der Daten selbst. Dieses Verfahren funktioniert nur gut, wenn die Daten charakteristische Merkmale aufweisen, wie z.B. einzelne Extremwerte. Verschiedene Meßgrößen wie Beschleunigungen und Geschwindigkeiten können erst korreliert werden, wenn sie auf eine gemeinsame Größe umgerechnet wurden. Bei stark verrauschten Meßwerten ist diese Methode nicht zu empfehlen.

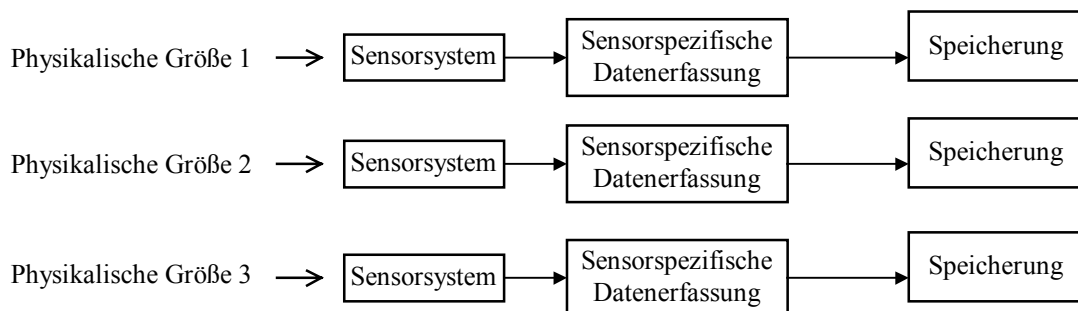


Abbildung 5.3: Funktionsschaubild eines dezentralen Datenerfassungssystems mit Synchronisation über die Korrelation der Daten

Vor- und Nachteile

Der Vorteil eines DDES liegt in der Möglichkeit, bereits vorhandene Meßsysteme einsetzen zu können. Außerdem können die Meßdaten bei ausgedehnten Meßobjekten direkt am Meßort erfaßt und gespeichert werden; lange störepfindliche Signalkabelverbindungen entfallen. Lange Trigger- oder Zeitsynchronsignale sind dagegen unproblematisch, da es sich dabei meistens um digitale Signale mit niedrigen Übertragungsraten handelt.

Die Nachteile des verteilten Aufbaus liegen in der schlechteren Wartbarkeit, der aufwendigeren Zeitsynchronisation und der Möglichkeit, die einzelnen Meßsysteme nur direkt an der Meßstelle parametrieren zu können (z.B. Abtastrate, Meßbereich, ...).

5.1.2 Zentrales Datenerfassungssystem (ZDES)

In Abbildung 5.4 ist das Funktionsschaubild eines zentralen Datenerfassungssystems dargestellt. Die zu messenden Größen werden jeweils von einem eignen Sensorsystem erfaßt, welches die Daten an eine zentrale Datenerfassung weitergibt. Diese kann auch schon eine Datenvorverarbeitung oder Datenreduktion vornehmen, im Extremfall sogar gleich das

gewünschte Ergebnis liefern. Meistens werden die Daten aber mehr oder weniger in Rohform abgespeichert und erst später ausgewertet.

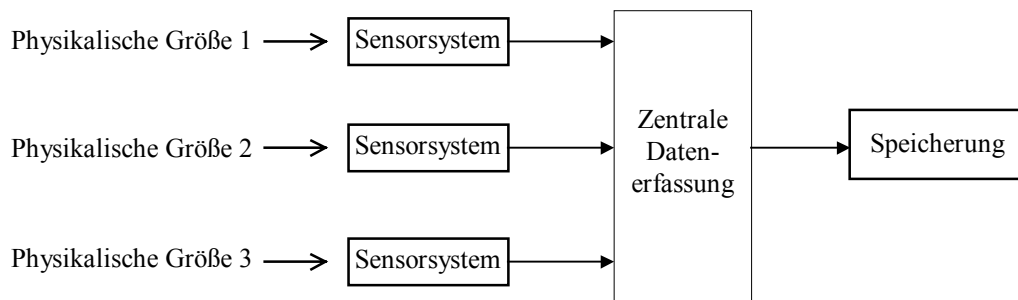


Abbildung 5.4: Funktionsschaubild eines zentralen Datenerfassungssystems

Der Vorteil dieses Systems liegt im einheitlichen Datenformat, im direkten Zeitbezug zwischen den einzelnen Meßwerten und der Möglichkeit die einzelnen Meßsysteme während der Messung von zentraler Stelle parametrieren zu können. Der Nachteil ist, daß bei ausgedehnten Bauwerken unter Umständen die Meßsignale über lange Kabel oder Telemetriestrecken zur Zentralen Datenerfassung geleitet werden müssen. Dies erhöht den Verkabelungsaufwand vor der Messung, außerdem erhöht sich die Störanfälligkeit und darüber hinaus verschlechtert sich das Signal zu Rausch Verhältnis, insbesondere bei Sensorsystemen mit analogen Ausgängen.

Um sehr viele unterschiedliche Sensorsysteme benutzen zu können, sollte ein zentrales Datenerfassungssystem über die entsprechenden Schnittstellen verfügen. Die wichtigsten sind:

- Analogeingänge
- Digitaleingänge
- Parallele Schnittstellen (Centronics, ...)
- Serielle Schnittstellen (RS232, RS485, TTY, ...)
- Busse (HP-IB, Profibus, CAN-Bus, ...)
- Netzwerkschnittstellen (z.B. Ethernet, auch zur Datenübertragung)

Die auf dem Meßrechner installierte Software muß in der Lage sein, alle auf diesen Schnittstellen ankommenden Daten ohne merkbare Verzögerung einzulesen und zusammen mit dem Zeitpunkt des Eintreffens weiterzuverarbeiten. Dies ist nur bei kleineren Meßsystemen durch Interrupt-Verarbeitung möglich (wie im PC), bei Systemen mit vielen angeschlossenen Sensorsystemen ist ein echtzeitfähiges Betriebssystem und eine entsprechende parallele Datenerfassung unumgänglich.

Im allgemeinen Fall wird eine Kombination der beiden Meßverfahren eingesetzt, oder anders betrachtet: Es wird ein dezentrales Meßsystem eingesetzt, dessen Komponenten zum Teil aus zentralen Datenerfassungssystemen bestehen. So kann bereits vorhandene Hardware optimal ausgenutzt werden.

5.2 Einsetzbare Sensorsysteme

Es gibt einige Mindestanforderungen, die ein Sensorsystem erfüllen muß, damit es in einem kinematischen Multisensorsystem eingesetzt werden kann. Zum einen muß die Messung vollständig automatisch ablaufen, d.h. es dürfen keine manuellen Teilvorgänge, wie z.B. die Zieleinstellung bei einem Tachymeter, notwendig sein, zum anderen muß der Meßwert in elektronischer Form entweder analog oder digital zur Verfügung gestellt werden. Systeme, welche die Meßwerte nur anzeigen, sind ungeeignet.

Für jedes angeschlossene Meßsystem ist ein Triggereingang zur Auslösung einer Messung bzw. zum Start der Meßreihe oder ein Eingangskanal für ein Synchronsignal notwendig. Dies muß beim DDES zusammen mit den Meßwerten abgespeichert oder an einer Schnittstelle zur Verfügung gestellt werden.

Bei in zentralen Datenerfassungssystemen eingesetzten Meßsystemen werden die Daten meistens über eine digitale Schnittstelle bereitgestellt. Diese dient dann auch der Parametrierung der Meßsysteme und zur Triggerung der Messungen.

5.3 Synchronisation

Eine Messung mit einem Multi-Sensor-System macht nur dann Sinn, wenn anschließend auch eine Multi-Sensor-Auswertung durchgeführt wird. Um die Sensoren in einem gemeinsamen Modell auswerten zu können, müssen sie synchronisiert werden, d.h. es muß eine Beziehung zwischen den unterschiedlichen Signalen bestehen. Im Normalfall wird diese Beziehung über die Zeit hergestellt, d.h. zu jedem Meßwert eines jeden Sensors muß der Meßzeitpunkt eindeutig ermittelt werden können.

Liefert ein Sensor seine Daten mit einer festen Frequenz, so muß nur diese Frequenz und der Startzeitpunkt bekannt sein, um den Meßzeitpunkt für jeden Meßwert bestimmen zu können. Liefert der Sensor seine Daten in unregelmäßigen Abständen, so muß zu jedem Meßwert eine Zeitkennung abgespeichert werden, aus der der Meßzeitpunkt hervorgeht.

Die „Zeit“ muß nicht die absolute Uhrzeit sein, es muß lediglich sichergestellt sein, daß alle Sensoren die gleiche „Zeit“ benutzen.

Beispiel:

Bei dem in Kapitel 7.2 beschriebenen Datenerfassungssystem wurden die Meßwerte der Beschleunigungsmesser und Wegaufnehmer mit einer Frequenz von 100 Hz aufgenommen. Die Nummer dieser Meßwerte definierte gleichzeitig die zentrale Zeit, die bei den asynchron arbeitenden Sensoren als Zeitwert abgespeichert wurde. Der Meßzeitpunkt von allen Messungen wurde also auf 10 ms genau bestimmt.

6 Kalibriermethoden

6.1 Grundlagen

Durch eine Kalibrierung können die systematischen Fehler einer Meßkette minimiert werden (Heister, 1987; Geiger, 1982). Dies geschieht durch die Bestimmung der Übertragungsfunktion dieser Meßkette, welche i.a. eine Funktion von vielen verschiedenen Größen ist.

$$W_m = f_1(W_p, T, LF, p, \dots)$$

Die gemessene Größe W_m ergibt sich durch die Übertragungsfunktion f_1 aus der physikalischen Größe W_p , der Temperatur T , der Luftfeuchtigkeit LF , dem Luftdruck p und einigen anderen Parametern. Die Bestimmung dieser Übertragungsfunktion ist meistens sehr aufwendig und, wenn überhaupt, dann nur im Labor durchführbar. Die erreichbare Genauigkeitssteigerung rechtfertigt erfahrungsgemäß den Aufwand nicht. In der Regel ist die Übertragungsfunktion annähernd linear, wie in Abbildung 6.1 dargestellt, so daß sie durch die lineare Funktion $W_m = o + sf \cdot f(W_p)$ angenähert werden kann, wobei der Offset o und der Skalenfaktor sf selbst wieder von anderen Größen wie Temperatur und Druck abhängen können. Die Funktion $f(W_p)$ wird durch eine Laborkalibrierung bestimmt (s.u.). Damit ist normalerweise die für kinetische Bauwerksvermessungen notwendige Genauigkeit von einigen Prozent erreichbar.

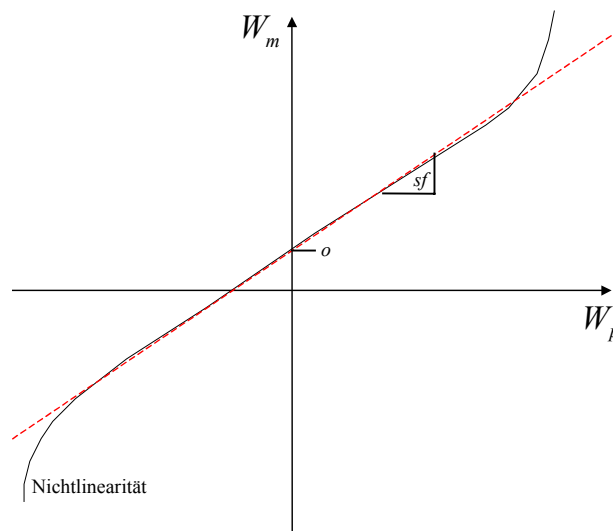


Abbildung 6.1: Typische Übertragungskennlinie einer Meßkette bei einer Temperatur, einem Druck,

...

Man unterscheidet Labor- und Feldkalibrierungen. Bei Laborkalibrierungen können aufwendigere Verfahren eingesetzt werden, womit Nichtlinearitäten bestimmt werden können. Bei den Feldkalibrierungen werden dann nur noch der aktuelle Offset und der Skalenfaktor bestimmt, so daß die verwendete Übertragungsfunktion folgendermaßen aussieht:

$$W_m = o + sf \cdot f(W_p)$$

Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, daß die Übertragungsfunktion durch die im Labor bestimmte Funktion f linearisiert wird, die so bestimmte Kurve aber noch durch die am Meßort unter Meßbedingungen bestimmten Parameter Offset und Skalenfaktor korrigiert werden. Dieses Verfahren reicht für die meisten Genauigkeitsanforderungen (im Prozentbereich) in der Bauwerksvermessung aus.

6.2 Die 24-Lagen-Kalibrierung

6.2.1 Problembeschreibung

Britting (1971) gibt einen Überblick über die verschiedenen Typen von Inertialnavigationssystemen:

Dies sind zum einen die **Plattformsysteme**, bei welchen eine kardanisch aufgehängte Plattform über drei orthogonal montierte Kreisel und entsprechende Nachführmotoren in einer festen Orientierung relativ zu einem Inertialsystem gehalten wird. Auf der Plattform sind 3 orthogonal ausgerichtete Beschleunigungsmesser angebracht. Diese liefern zusammen mit den Kreiseln die Informationen, aus welchen mit einem entsprechenden Auswertalgorithmus die Position und Orientierung des Systems (relativ zur Ausgangsposition und Orientierung) berechnet werden kann. In Flugzeugen werden Plattformsystemen schon seit langem eingesetzt.

Seit einigen Jahren wird versucht die mechanisch aufwendige kreiSELstabilisierte Plattform durch körperfeste Sensoren zu ersetzen. In diesen sogenannten **Strapdown-Systemen** sind sowohl die 3 Kreisel als auch die 3 Beschleunigungsmesser fest mit dem Gehäuse verbunden. Die Trennung von Orientierung und Lage wird rein rechnerisch aus den gemessenen Beschleunigungen und Drehraten bestimmt. Eine Beschreibung von zwei solchen Systemen ist z.B. in Keller (1991) und Knöferle und Petzoldt (1991) enthalten.

Zunehmend werden Inertialnavigationssysteme auch im Vermessungswesen eingesetzt (Farkas-Jandel, 1986). Da hierbei die in Flugzeugen eingesetzten Plattformsysteme zu schwer und teuer sind, werden fast ausschließlich Strapdown-Systeme verwendet. Diese stellen höhere Anforderungen an die verwendeten Sensoren, die Fehlermodelle und die Auswertalgorithmen. Einen Überblick über die verwendeten Sensortypen kann in Schröder (1992) nachgeschlagen werden.

Die bei solchen Systemen auftretenden Sensor- und Systemfehler sind in der Literatur ausführlich behandelt und es werden entsprechende Modelle mit Parametern erstellt. Dies soll hier nicht wiederholt werden. (Britting, 1971; Baumann, 1976; Stieler, 1984 und 1992, Schwarz, 1986, Huddle, 1988; Schröder, 1992)

Kalibrierung

Für die Bestimmung dieser Parameter sind Kalibrierungen notwendig. Es wird zwischen Laborkalibrierungen und Feldkalibrierungen unterschieden. Durch die Kalibrierungen bestimmt man die Transformation vom Sensorkoordinatensystem ins Bodykoordinatensystem (T^{S1B} , T^{S2B})

Durch **Laborkalibrierungen** werden dabei solche Parameter bestimmt, welche sich über längere Zeiträume und insbesondere nach dem Einschalten und in der Aufwärmphase nicht ändern. Hier können aufwendige und langdauernde Verfahren mit teuren Spezialgeräten angewandt werden. Oft wird dies nur vom Hersteller durchgeführt.

Es gibt aber auch veränderliche Parameter, welche sich nach jedem einschalten ändern, und die sich auch bei längeren Messungen verändern können. Solche Parameter müssen in einem **Feldkalibrierverfahren** direkt vor (und am besten auch nach) der Messung bestimmt werden.

Alignment

Die Bestimmung der Anfangsausrichtung als Teil der Transformation vom Bodykoordinatensystem ins Navigationskoordinatensystem wird als Alignment bezeichnet.

Bei allen Inertialnavigationssystemen besteht das Problem, daß sie Ihre Informationen nur relativ zur Ausgangsposition und -orientierung angeben. Um die Positionen in einem erdgebundenen Koordinatensystem (dem sogenannten Navigationskoordinatensystem) angeben

zu können, muß die Anfangsposition und die Anfangsorientierung in diesem System bekannt sein.

Die Anfangsposition muß über ein anderes Verfahren (z.B. GPS) bestimmt und dem System bekanntgegeben werden. Die Anfangsorientierung ist dagegen extern nicht so leicht mit entsprechender Genauigkeit zu bestimmen. Deshalb führen die meisten Inertialnavigationssysteme nach dem Einschalten eine automatische Bestimmung der Orientierung durch; dies wird als **Alignment** bezeichnet. Dabei werden die Sensordaten bei einem relativ zum Navigationskoordinatensystem ruhenden INS über einige Minuten gemittelt um die Genauigkeit zu erhöhen. Die so erhaltenen Drehraten sollten die Erddrehrate repräsentieren, die Beschleunigungen die Erdbeschleunigung. Da die Richtungen dieser beiden Vektoren im Navigationskoordinatensystem bekannt sind, kann daraus die Orientierung des Systems bestimmt werden. (Britting, 1971; Baumann, 1976; Stieler, 1984 und 1992, Huddle, 1988)

Andere Verfahren

Dieses Alignment funktioniert bei idealen Systemen ohne Sensorfehlern sehr gut, bei realen Systemen sind die Sensorfehler aber oft größer als die Erddrehrate. Da mit diesem Verfahren eine Trennung von Drehrate und Sensorfehler nicht vorgenommen werden kann, müssen andere Verfahren eingesetzt werden.

Die meisten in der Literatur angegebenen Verfahren basieren auf der Messung mit einem Drehtisch. Dadurch wird die zu messende Drehrate so weit erhöht, daß sie weit über den störenden Sensorfehlern liegt. Zum anderen werden mehrachsige Drehtische eingesetzt, wodurch die gemessenen Drehraten und Beschleunigungen von den Sensorfehlern separiert werden können. (Lorenzini, Chamberlein, Wetzig, 1984). Durch den Einsatz von Drehtischen haben diese Verfahren aber den Nachteil, daß sie nur im Labor durchgeführt werden können.

Huddle (1988) erwähnt ein Verfahren, bei welchem ein Plattformsystem als Strapdown-System verwendet wird. Während des Alignments wird die Plattform in mehrere verschiedene Lagen gebracht und in jeder dieser Lagen der Beschleunigungsmesser bzw. die Erddrehrate gemessen. Aus den verschiedenen Messungen können die Sensorfehler wieder von den Drehraten bzw. Beschleunigungen getrennt und damit die Orientierung bestimmt werden. Während der anschließenden Messung wird die Plattform nicht bewegt und das System als Strapdown-System verwendet. Bei diesem Verfahren hat man die Nachteile eines Plattformsystems (schwer, groß, teuer) und eines Strapdown-Systems (geringere Genauigkeit) vereint.

Ein am IAGB entwickeltes Feldkalibrierverfahren wird in Kapitel 6.2 behandelt.

6.2.2 Definitionen

Begriffe

Feldkalibrierung

Eine Feldkalibrierung ist ein mobiles Kalibrierverfahren, welches am Ort der Messung direkt vor bzw. nach der eigentlichen Messung durchgeführt werden kann.

Laborkalibrierung

Eine Laborkalibrierung ist ein im Labor durchgeführtes Kalibrierverfahren. Hier können im Gegensatz zur Feldkalibrierung aufwendigere und langwierigere Prozeduren durchgeführt werden, z.B. solche, welche spezielle Einrichtungen wie Präzisionsdrehtische o.ä. benötigen.

ZUPT (Zero Velocity Update Point)

Zustand eines Inertialmeßsystems, in welchem die Geschwindigkeit gegenüber dem Navigationskoordinatensystem (hier Anschlagtischkoordinatensystem) Null ist.

Lage

Lage bezeichnet die Orientierung eines Sensors oder eines Sensorsystems im Raum.

Wiederholgenauigkeit (Wiederholbarkeit)

Die Wiederholgenauigkeit wird hier definiert als die Standardabweichung von N aufeinander folgenden Bestimmungen der Parameter.

IMU (Inertial Measurement Unit)

Die IMU ist die mechanische Einheit, welche die benötigten Inertialsensoren enthält.

verwendete Koordinatensysteme:

Es werden die in der Inertialvermessung üblichen Koordinatensysteme (Britting, 1971; Keller, 1991) Sensorkoordinatensystem und Bodykoordinatensystem verwendet. Das Anschlagtischkoordinatensystem ist ein um die z-Achse verdrehtes Tangentialsystem.

S1 Sensorkoordinatensystem Beschleunigungsmesser

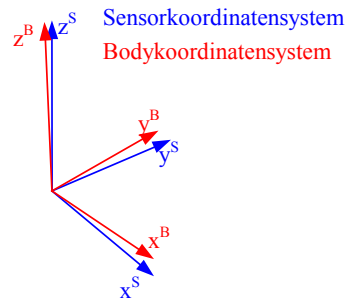
S1 ist kein rechtwinkliges Koordinatensystem. Die Achsen \vec{e}_b^{S1} zeigen in die Richtungen der sensitiven Achsen der Beschleunigungssensoren b . Der Ursprung liegt im Zentrum des Sensorblocks.

S2 Sensorkoordinatensystem Kreisel

S2 ist kein rechtwinkliges Koordinatensystem. Die Achsen \vec{e}_k^{S2} zeigen in die Richtungen der sensitiven Achsen der Kreisel k . Der Ursprung liegt im Zentrum des Sensorblocks.

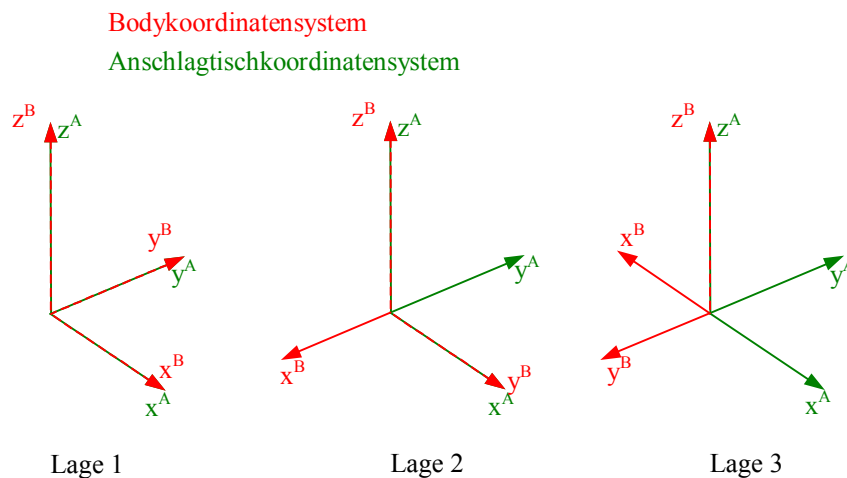
B Bodykoordinatensystem.

B ist ein rechtwinkliges Koordinatensystem, welches fest mit dem IMU (Inertial Measurement Unit) verbunden ist. Der Ursprung liegt im Zentrum des Sensorblocks, die Achsen sind annähernd parallel zu den Gehäusekanten ausgerichtet und entsprechen grob denen in S1 und S2 festgelegten.



A Anschlagtischkoordinatensystem.

A ist ein rechtwinkliges Koordinatensystem, welches fest mit dem Anschlagtisch verbunden ist. In Lage 1 ist es identisch mit B. Das Anschlagtischkoordinatensystem muß zumindest grob so ausgerichtet sein, daß die \vec{e}_z -Achse nach oben zeigt (horizontalisiert). Damit hat die Schwerekomponente g_z^A immer einen Wert in der Nähe von $-9,8 \text{ m/s}^2$.



Transformationen:

Eine allgemeine Beschreibung von Transformationen und Einzelheiten zu den speziellen Transformationen sind in Britting (1971) dargestellt.

\mathbf{T}^{S1B} transformiert den Beschleunigungsvektor \vec{a}^{S1} vom Sensorkoordinatensystem S1 in den Vektor \vec{a}^B im Bodykoordinatensystem B.

\mathbf{T}^{S1B} ist eine 3×3 -Matrix. Die Komponenten der Matrix werden durch eine 24-Lagen-Kalibrierung bestimmt.

\mathbf{T}^{S2B} transformiert den Drehratenvektor \vec{k}^{S2} vom Sensorkoordinatensystem S2 in den Vektor \vec{k}^B im Bodykoordinatensystem B.

\mathbf{T}^{S2B} ist eine 3×3 -Matrix. Die Komponenten der Matrix werden durch eine 24-Lagen-Kalibrierung bestimmt.

${}^L\mathbf{T}^{BA}$ transformiert einen beliebigen Vektor (z.B. Beschleunigung oder Drehrate) vom Bodykoordinatensystem in das Anschlagtischkoordinatensystem. Da die Orientierung der Koordinatensysteme relativ zueinander von der Lage abhängt, in der die IMU auf dem Anschlagtisch aufgesetzt ist, gibt es für jede Lage eine solche 3×3 -Matrix. Der vordere Index L gibt die Lage der IMU an.

Die 24 3x3-Matrizen ${}^L T^{BA}$ wurden wie in Kapitel 6.2.6 beschrieben mit einem Koordinatenmeßgerät bestimmt.

Bezeichnungskonventionen

Für die Berechnungen werden folgenden Bezeichnungskonventionen für Variablen eingeführt:

- Der Index rechts unten gibt die Koordinatenachse x, y, oder z an. Als allgemeiner Platzhalter wird i verwendet. Statt diesem Index kann auch die Vektorschreibweise verwendet werden:

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix}$$

- Der Index rechts oben gibt das Koordinatensystem an: S1, S2, B oder A
- Der Index links oben gibt die Lage an 1..24, als allgemeiner Platzhalter wird L verwendet.
- Der Index links unten bezeichnet den Sensor s, für die Beschleunigungssensoren b (oder bx, by, bz) und für die Kreisel k (oder kx, ky, kz).

Beispiel:

$${}_{by}^5 a_x^{S1}$$

x-Komponente der Beschleunigung des Beschleunigungsmessers By in der Lage 5 im Sensorkoordinatensystem der Beschleunigungsmesser.

Bezeichnungen:

A	abstrakte 24x10 Matrix A (enthält alle Transformationen ${}^L T^{BA}$)
${}_b a$	Kalibrierte Daten des Beschleunigungsmessers b
${}_b ar^{S1}$	Temperaturkorrigierte Rohdaten des Beschleunigungsmessers b
${}_b b0, {}_b b1, {}_b b2, {}_b b3, {}_b b4$	Parameter des Temperaturmodells des Beschleunigungsmessers b (Offset)
${}_k b0, {}_k b1, {}_k b2$	Parameter des Temperaturmodells des Kreisels k (Offset)
${}_b c0, {}_b c1, {}_b c2, {}_b c3, {}_b c4$	Parameter des Temperaturmodells des Beschleunigungsmessers b (Skalenfaktor)
${}_k c0, {}_k c1$	Parameter des Temperaturmodells des Kreisels k (Skalenfaktor)
\vec{d}	synthetischer Drehratenvektor
${}_s \vec{e}$	abstrakter 10x1 Hilfsvektor (ohne physikalische Bedeutung)
${}_k f$	Parameter der die Beschleunigungsabhängigkeit der Kreiselsignale beschreibt
${}_s F$	Korrektur des Sensors s (Skalenfaktor)
\vec{g}	Erdschwerevektor
g	Erdbeschleunigung (im IAGB-Labor $g = 9.8083333 \text{ ms}^{-2}$)
${}_s h_m$	Hilfsgröße für Sensor s (ohne physikalische Bedeutung), m ist ein Zählindex
${}_b I$	Strom des Beschleunigungsmessers b

\vec{k}_e	Erddrehratenvektor
k_e	Erddrehrate ($k_e = 15.04106786$ Grad/h)
${}_k k$	Kalibrierte Daten des Kreisels k
${}_k kR^{S2}$	Temperaturkorrigierte Rohdaten des Kreisels k
${}_k kS^{S2}$	Rohdaten des Kreisels k
${}_s \vec{n}$	Richtung der sensitive Achse des Sensors s
${}_s o$	Korrektur des Sensors s (Offset)
${}_s o0$	Temperaturkorrektur des Sensors s (Offset)
${}_s o1$	Korrektur des Sensors s (Offset)
P_k	Projektion von \vec{k} auf die Ebene senkrecht zu \vec{g}
${}_k P_R$	Projektion von \vec{R} auf die Ebene senkrecht zu \vec{g}
\vec{R}	synthetischer Drehratenvektor (skaliert)
${}_s \vec{S}$	1x24 Meßvektor (enthält die 24 ZUPT Mittelwerte des Sensors s)
${}_s sf0$	Temperaturkorrektur des Sensors s (Skalenfaktor)
${}_s sf1$	Korrektur des Sensors s (Skalenfaktor)
${}_k T$	Sensortemperatur Kreisel k
${}_b T$	Sensortemperatur Beschleunigungsmesser b – 20°C
${}_b Tr$	Sensortemperatur Beschleunigungsmesser b
α	Hilfswinkel $\alpha = \beta - 90^\circ$
β	Winkel zwischen der Erddrehrate und Erdschwerevektor

6.2.3 Lösungsansatz

Hier soll ein am IAGB entwickeltes Feldkalibrierverfahren, die 24-Lagen-Kalibrierung, vorgestellt werden. Es wurde in der Praxis an dem in Knöferle und Petzoldt (1991) beschriebenen Inertialnavigationssystem getestet.

Dieses Verfahren soll dazu dienen, mit möglichst einfachen Mitteln die veränderlichen Parameter der Sensormodelle direkt vor jeder Messung zu bestimmen.

Dies sind folgende Parameter:

- Offsets der 3 Beschleunigungsmesser (Bias)
- Skalenfaktoren der 3 Beschleunigungsmesser
- Offsets der 3 Kreisel (Bias)
- Skalenfaktoren der 3 Kreisel

Zusätzlich liefert das Verfahren noch folgende Parameter:

- Fehlausrichtungswinkel der 3 Beschleunigungsmesser
- Fehlausrichtungswinkel der 3 Kreisel
- Richtung der Erddrehrate im Anschlagtischkoordinatensystem
- Richtung der Erdbeschleunigung im Anschlagtischkoordinatensystem
- Beschleunigungseinfluß auf die Kreiselmessungen

Das Verfahren basiert auf der Messung der Erddrehrate \vec{k}_e und der Erdbeschleunigung \vec{g} in mehreren Lagen. Jede der 6 Flächen der IMU (Inertial Measurement Unit) kann auf dem Anschlagtisch noch in Schritten von 90 Grad gedreht werden. Es ergeben sich insgesamt 24 verschiedene Lagen.

Da die Parameter für alle Sensoren unabhängig bestimmt werden, soll im folgenden nur noch ein Sensor betrachtet werden, da das Vorgehen für die anderen 5 Sensoren analog ist.

In jeder Lage wird ein ca. 1 Minute langer ZUPT gemessen. Ein ZUPT (Zero Velocity UPdate) bezeichnet den Zustand, in dem die IMU im Navigationskoordinatensystem (hier dem Anschlagtischkoordinatensystem) die Geschwindigkeit 0 besitzt, d.h. sie wird nicht bewegt. Alle während eines ZUPT gemessenen Werte werden gemittelt und die Standardabweichung bestimmt. Übersteigt die Standardabweichung einen vorher festgelegten Grenzwert, so ist eine Störung aufgetreten und die Kalibrierung ist ungültig. Aus den 24 gemessenen Mittelwerten ${}^L_b a r^{S1}$ bzw. ${}^L_k r^{S2}$ (einer pro Lage), werden mit dem unten beschriebenen Algorithmus die gesuchten Parameter bestimmt.

Das Prinzip beruht darauf, daß sich bei der Anordnung in verschiedenen Lagen die Sensorfehler und die Erdbeschleunigung bzw. Erddrehraten unterschiedlich auswirken. Der Sensoroffset z.B. ist in allen Lagen gleich groß, die gemessene Komponente ändert sich aber je nach Orientierung. Dies entspricht dem klassischen geodätischen Prinzip der Mehrlagenmessung.

Da die Auswertung auf dem Vergleich der Meßwerte mit der Erdbeschleunigung bzw. der Erddrehrate basiert, müssen deren Beträge am Meßort bekannt sein. Dies ist für die Erddrehrate kein Problem, da diese auf der ganzen Erde konstant ist. Die Erdbeschleunigung dagegen variiert von Ort zu Ort, so daß sie entweder (z.B. mit einem Gravimeter) gemessen oder aus einem digitalen Geländemodell (DGM) bestimmt werden muß.

Ähnliche Verfahren wurden bisher nur bei internen oder Laborkalibrierungen eingesetzt. Die Abwandlung des Verfahrens zum Einsatz als Feldkalibriermethode erlaubt es, einfache Inertialnavigationssysteme ohne Temperaturstabilisierung zu benutzen, da die temperaturabhängigen Offsets und Skalenfaktoren direkt vor und nach der Messung bestimmt werden.

6.2.4 Beschreibung der Hardware

Da das IMU in allen 24 Lagen definiert auf dem Anschlagtisch aufgesetzt werden muß, benötigt das IMU-Gehäuse eine Spezialform, so daß Kabelanschlüsse die Aufsetzmöglichkeiten nicht einschränken. Die Gehäuseform des am IAGB verwendeten INS ist in Abbildung 6.2 und Abbildung 6.3 dargestellt.

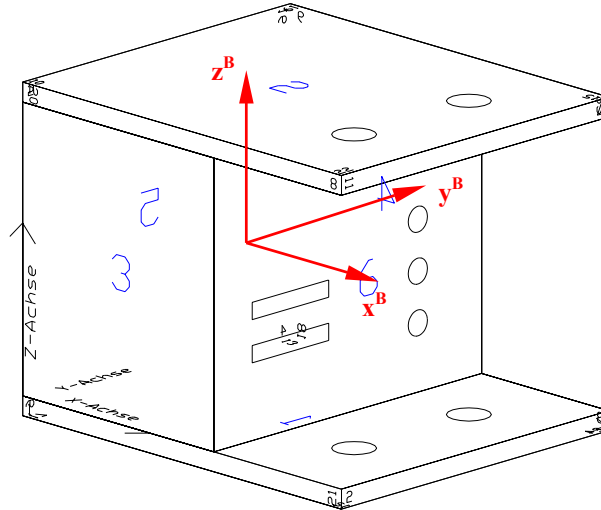


Abbildung 6.2: Gehäuseform des am IAGB verwendeten ESINS

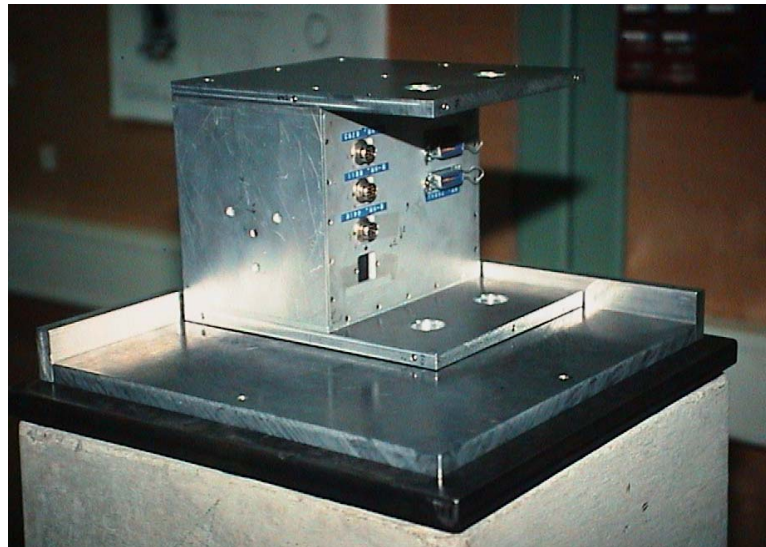


Abbildung 6.3: Das am IAGB verwendeten INS mit Anschlagtisch

In jede der 6 Flächen sind 3 Stahlkugeln eingelassen, wodurch man bis zu $1\ \mu\text{m}$ genau bestimmte Auflagepunkte erhält. Die IMU wird auf den Anschlagtisch gelegt und in die durch 3 Stahlstifte festgelegte Ecke geschoben (Siehe Abbildung 6.4). Damit ist immer die gleiche Position und Ausrichtung in der jeweiligen Lage gewährleistet. Die Beziehung zwischen den Lagen ist noch nicht bekannt, vor allem deshalb, weil das Gehäuse nicht exakt rechteckig gefertigt werden kann. Diese Beziehung wird in Kapitel 6.2.6 bestimmt.

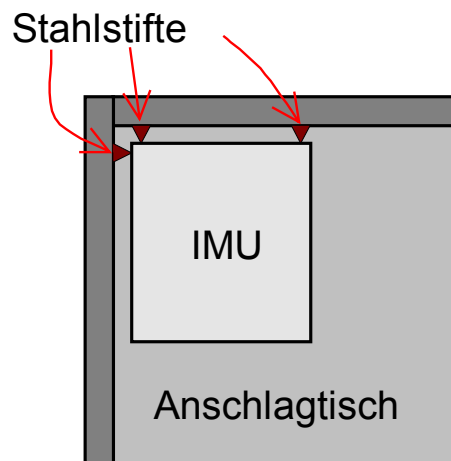


Abbildung 6.4: Skizze des Anschlagtisches

6.2.5 Theorie

Aus der folgenden Tabelle kann abgelesen werden, über welche Gleichung welcher Parameter eines Sensors bestimmt werden kann.

Parameter		Beschleunigungsmesser	Kreisel
Skalenfaktor	${}_s F = \frac{1}{{}_s sf 1}$	(6.14)	(6.44)
Offset	${}_s o = \frac{{}_s o 1}{{}_s sf 1}$	(6.15)	(6.48)
Ausrichtung	${}_s \vec{n}^B$	(6.18)	(6.36)
Erdschwere	\vec{g}^A	(6.17)	
Beschleunigungseinfluß	${}_k f$		(6.47)
Erddrehrate	\vec{k}_e^A		(6.46)
Verfälschte Erddrehrate	${}_k \vec{d}^A$		(6.45)

Tabelle 6.5: Liste der Bestimmungsgleichungen

6.2.5.1 Sensormodell der Beschleunigungsmesser

Das verwendete Sensormodell gliedert sich in 2 Teile. Zuerst wird die Temperaturkorrektur durchgeführt, dann werden Offset, Skalenfaktor und Fehlansichtswinkel korrigiert.

Temperaturkorrektur (Laborkalibrierung)

Diese Korrektur wurde vom Hersteller angegeben. Sie basiert auf der, durch den internen Temperatursensor gelieferten, Temperatur ${}_b Tr$. Offset und Skalenfaktor sind jeweils durch ein Polynom 4. Ordnung bezüglich der Temperatur beschrieben. Das Modell lautet:

$${}_b ar^{S1} = \frac{{}_b I}{{}_b sf0} - {}_b o0$$

mit ${}_b sf0 = {}_b c0 + {}_b c1 \cdot {}_b T + {}_b c2 \cdot {}_b T^2 + {}_b c3 \cdot {}_b T^3 + {}_b c4 \cdot {}_b T^4$ Skalenfaktor der Temperaturkorrektur für Beschleunigungsmesser b

$${}_b o0 = {}_b b0 + {}_b b1 \cdot {}_b T + {}_b b2 \cdot {}_b T^2 + {}_b b3 \cdot {}_b T^3 + {}_b b4 \cdot {}_b T^4$$
 Offset der Temperaturkorrektur für Beschleunigungsmesser b

$${}_b T = {}_b Tr - 20^\circ \text{Celsius}$$

${}_b Tr$ Temperatur des Beschleunigungsmessers b (vom Temperatursensor geliefert)

${}_b I$ vom Beschleunigungssensor b gelieferter Strom

$${}_b c0 \dots {}_b c4, {}_b b0 \dots {}_b b4$$

sind die vom Hersteller für den Beschleunigungsmesser b angegebenen Parameter des Temperaturmodells.

${}_b ar^{S1}$ Temperaturkorrigierte Rohdaten des Beschleunigungsmessers b

Offset und Skalenfaktorkorrektur (Feldkalibrierung)

Das so temperaturkorrigierte Signal ${}_b ar^{S1}$ wird durch ${}_b a^{S1} = {}_b ar^{S1} \cdot {}_b sf1 + {}_b o1$ nochmals korrigiert. Dies ist notwendig, da Offset und Skalenfaktor sich mit der Zeit und insbesondere nach jedem Einschalten ändern.

Außerdem werden die Fehlausrichtungswinkel mit der Korrekturmatrix T^{S1B} korrigiert. Dazu werden die Beschleunigungen der 3 Beschleunigungsmesser zu einem Vektor

$$\vec{a}^{S1} = \begin{pmatrix} {}_{bx} a^{S1} \\ {}_{by} a^{S1} \\ {}_{bz} a^{S1} \end{pmatrix}$$

zusammengefaßt (Sensorkoordinatensystem), der dann in das Bodykoordinatensystem transformiert wird.

$$\vec{a}^B = T^{S1B} \cdot \vec{a}^{S1}$$

Die hier benutzten Parameter ${}_b sf1$, ${}_b o1$ und T^{S1B} werden vor jeder Messung durch eine 24-Lagen-Kalibrierung bestimmt. Siehe Kapitel 6.2.5.2.

6.2.5.2 Kalibriermethode für Beschleunigungsmesser

Da alle Sensoren unabhängig voneinander arbeiten und deshalb auch einzeln kalibriert werden können, wird nur der Sensor Bx ausführlich betrachtet.

Die sensitive Achse des Beschleunigungsmesser B_x geht in Richtung ${}_{bx} \vec{n}^B$. Die in Lage L gemessene Beschleunigungskomponente der Erddrehrate \vec{g} ist dann

$${}_{bx}^L a = {}_{bx}^L \vec{g}^B \cdot {}_{bx} \vec{n}^B = \vec{g}^A \cdot {}_{bx}^L \vec{n}^A \quad (6.1)$$

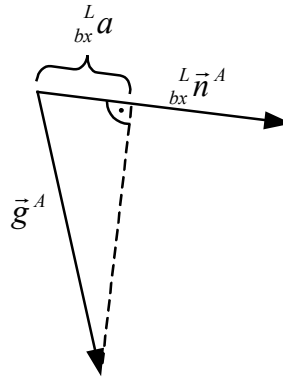


Abbildung 6.6: Skizze der gemessenen Beschleunigungskomponente ${}^L_{bx} \vec{a}$

Die Komponenten von \vec{g}^A sind konstant, die von ${}^L_{bx} \vec{n}^A$ hingegen hängen davon ab, in welcher Lage L sich die IMU befindet. Da aber ${}_{bx} \vec{n}^B$ ein konstanter Vektor ist (die sensitive Achse ist fest mit dem Bodensystem verbunden), kann ${}^L_{bx} \vec{n}^A$ durch folgende Transformation erhalten werden: ${}^L_{bx} \vec{n}^A = {}^L T^{BA} \cdot {}_{bx} \vec{n}^B$. Damit ergibt sich für die gemessenen Sensorsignale

$${}^L_{bx} \vec{a} = \vec{g}^A \cdot {}^L T^{BA} \cdot {}_{bx} \vec{n}^B \quad (6.2)$$

Da die gemessenen Werte zusätzlich noch einen Skalenfaktor und einen Offset beinhalten, ergibt sich als endgültige Formel: ${}^L_{bx} \vec{a} \cdot {}_{bx} sf1 + {}_{bx} o1 = \vec{g}^A \cdot {}^L T^{BA} \cdot {}_{bx} \vec{n}^B$ oder nach ${}^L_{bx} \vec{a}$ aufgelöst:

$${}^L_{bx} \vec{a} = \frac{1}{\underbrace{{}_{bx} sf1}_{{}_{bx} F}} \cdot \vec{g}^A \cdot {}^L T^{BA} \cdot {}_{bx} \vec{n}^B - \underbrace{\frac{{}_{bx} o1}{{}_{bx} sf1}}_{{}_{bx} o} \quad (6.3)$$

$$\text{mit } {}_{bx} F = \frac{1}{{}_{bx} sf1} \quad (6.4)$$

$$\text{und } {}_{bx} o = -\frac{{}_{bx} o1}{{}_{bx} sf1} \text{ ergibt sich} \quad (6.5)$$

$${}^L_{bx} \vec{a} = {}_{bx} F \cdot \vec{g}^A \cdot {}^L T^{BA} \cdot {}_{bx} \vec{n}^B + {}_{bx} o \quad (6.6)$$

$$\text{Ferner gilt noch } \left| {}_{bx} \vec{n}^B \right| = 1 \text{ (da } {}_{bx} \vec{n}^B \text{ eine Richtung ist)} \quad (6.7)$$

$$\text{und } \left| \vec{g}^A \right| = g \text{ (der Betrag der Erdschwere ist bekannt)} \quad (6.8)$$

(6.6) bis (6.8) sind 26 Gleichungen ($L = 1..24$) mit 8 Unbekannten ($\vec{g}^A, {}_{bx} \vec{n}^B, {}_{bx} o, {}_{bx} F$).

Die Transformationsmatrizen ${}^L T^{BA}$ müssen einmal für jede IMU bestimmt werden, siehe Kapitel 6.2.6.

Um Gleichung (6.6) zu lösen, wird der abstrakte 10×1 Vektor ${}_{bx} \vec{e}$ definiert. Er besitzt folgende Komponenten:

$$\begin{aligned}
{}_{bx}e_1 &= {}_{bx}F \cdot \mathbf{g}_x^A \cdot {}_{bx}n_x^B & {}_{bx}e_4 &= {}_{bx}F \cdot \mathbf{g}_x^A \cdot {}_{bx}n_y^B & {}_{bx}e_7 &= {}_{bx}F \cdot \mathbf{g}_x^A \cdot {}_{bx}n_z^B \\
{}_{bx}e_2 &= {}_{bx}F \cdot \mathbf{g}_y^A \cdot {}_{bx}n_x^B & {}_{bx}e_5 &= {}_{bx}F \cdot \mathbf{g}_y^A \cdot {}_{bx}n_y^B & {}_{bx}e_8 &= {}_{bx}F \cdot \mathbf{g}_y^A \cdot {}_{bx}n_z^B \\
{}_{bx}e_3 &= {}_{bx}F \cdot \mathbf{g}_z^A \cdot {}_{bx}n_x^B & {}_{bx}e_6 &= {}_{bx}F \cdot \mathbf{g}_z^A \cdot {}_{bx}n_y^B & {}_{bx}e_9 &= {}_{bx}F \cdot \mathbf{g}_z^A \cdot {}_{bx}n_z^B & {}_{bx}e_{10} &= {}_{bx}o
\end{aligned} \tag{6.9}$$

wobei gilt $\vec{\mathbf{g}}^A = \begin{pmatrix} \mathbf{g}_x^A \\ \mathbf{g}_y^A \\ \mathbf{g}_z^A \end{pmatrix}$ und ${}_{bx}\vec{\mathbf{n}}^B = \begin{pmatrix} {}_{bx}n_x^B \\ {}_{bx}n_y^B \\ {}_{bx}n_z^B \end{pmatrix}$

außerdem wird die abstrakte 24x10 Matrix **A** definiert als

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix}
1 T_{11}^{BA} & 1 T_{21}^{BA} & 1 T_{31}^{BA} & 1 T_{12}^{BA} & 1 T_{22}^{BA} & 1 T_{32}^{BA} & 1 T_{13}^{BA} & 1 T_{23}^{BA} & 1 T_{33}^{BA} & 1 \\
2 T_{11}^{BA} & 2 T_{21}^{BA} & 2 T_{31}^{BA} & 2 T_{12}^{BA} & 2 T_{22}^{BA} & 2 T_{32}^{BA} & 2 T_{13}^{BA} & 2 T_{23}^{BA} & 2 T_{33}^{BA} & 1 \\
3 T_{11}^{BA} & 3 T_{21}^{BA} & \dots & \dots & & & & & & \\
\vdots & \vdots & \ddots & & & & & & & \\
24 T_{11}^{BA} & 24 T_{21}^{BA} & 24 T_{31}^{BA} & 24 T_{12}^{BA} & 24 T_{22}^{BA} & 24 T_{32}^{BA} & 24 T_{13}^{BA} & 24 T_{23}^{BA} & 24 T_{33}^{BA} & 1
\end{pmatrix} \tag{6.10}$$

und der 1x24 Meßvektor ${}_{bx}S_L = {}_{bx}^L a$. Damit läßt sich Gleichung (6.6) in Matrixschreibweise darstellen:

$$\mathbf{A} \cdot {}_{bx}\vec{\mathbf{e}} = {}_{bx}\vec{\mathbf{S}} \tag{6.11}$$

wobei \mathbf{A} und ${}_{bx}\vec{\mathbf{S}}$ gegeben sind und ${}_{bx}\vec{\mathbf{e}}$ gesucht wird.

Dies ist ein überbestimmtes Gleichungssystem. Die Lösung für ${}_{bx}\vec{\mathbf{e}}$ läßt sich damit durch Ausgleichsrechnung (Nähbauer, 1961; Böse, 1965; Gotthardt, 1968; Höpcke, 1980) bestimmen. Dazu wird Gleichung (6.11) von links mit \mathbf{A}^T multipliziert und dann nach ${}_{bx}\vec{\mathbf{e}}$ aufgelöst. Man erhält

$${}_{bx}\vec{\mathbf{e}} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot (\mathbf{A}^T \cdot {}_{bx}\vec{\mathbf{S}}) \tag{6.12}$$

Diese Gleichung ist immer lösbar, solange $\|\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A}\| \neq 0$ ist. Dies ist aufgrund der Definition von **A** immer erfüllt.

Aus dem jetzt bekannten ${}_{bx}\vec{\mathbf{e}}$ müssen mit Hilfe der Gleichungen (6.9) die gewünschten Parameter ($\vec{\mathbf{g}}^A$, ${}_{bx}\vec{\mathbf{n}}^B$, ${}_{bx}o$, ${}_{bx}F$) bestimmt werden. Dazu werden zuerst die abstrakten Hilfwerte ${}_{bx}h_i$ definiert:

$$\begin{aligned}
{}_{bx}h_1 &= {}_{bx}e_1^2 + {}_{bx}e_2^2 + {}_{bx}e_3^2 & &= [{}_{bx}F]^2 \cdot [g]^2 \cdot [{}_{bx}n_x^B]^2 \\
{}_{bx}h_2 &= {}_{bx}e_4^2 + {}_{bx}e_5^2 + {}_{bx}e_6^2 & &= [{}_{bx}F]^2 \cdot [g]^2 \cdot [{}_{bx}n_y^B]^2 \\
{}_{bx}h_3 &= {}_{bx}e_7^2 + {}_{bx}e_8^2 + {}_{bx}e_9^2 & &= [{}_{bx}F]^2 \cdot [g]^2 \cdot [{}_{bx}n_z^B]^2 \\
{}_{bx}h_4 &= {}_{bx}e_1^2 + {}_{bx}e_4^2 + {}_{bx}e_7^2 & &= [{}_{bx}F]^2 \cdot [g_x^A]^2 \\
{}_{bx}h_5 &= {}_{bx}e_2^2 + {}_{bx}e_5^2 + {}_{bx}e_8^2 & &= [{}_{bx}F]^2 \cdot [g_y^A]^2 \\
{}_{bx}h_6 &= {}_{bx}e_3^2 + {}_{bx}e_6^2 + {}_{bx}e_9^2 & &= [{}_{bx}F]^2 \cdot [g_z^A]^2
\end{aligned} \tag{6.13}$$

Mit Gleichungen (6.7) und (6.9) ergibt sich ${}_{bx}h_1 + {}_{bx}h_2 + {}_{bx}h_3 = {}_{bx}F^2 \cdot g^2$ und da ${}_{bx}F$ positiv ist

$${}_{bx}F = \frac{1}{g} \sqrt{{}_{bx}h_1 + {}_{bx}h_2 + {}_{bx}h_3} \quad (6.14)$$

und offensichtlich ${}_{bx}o = e_{10}$ (6.15)

Aus den Gleichungen (6.13) können die Beträge der Komponenten von \vec{g}^A und ${}_{bx}\vec{n}^B$ bestimmt werden:

$$\begin{aligned} |g_x^A| &= \frac{\sqrt{{}_{bx}h_4}}{{}_{bx}F} & |g_y^A| &= \frac{\sqrt{{}_{bx}h_5}}{{}_{bx}F} & |g_z^A| &= \frac{\sqrt{{}_{bx}h_6}}{{}_{bx}F} \\ |{}_{bx}n_x^B| &= \frac{\sqrt{{}_{bx}h_1}}{{}_{bx}F \cdot g} & |{}_{bx}n_y^B| &= \frac{\sqrt{{}_{bx}h_2}}{{}_{bx}F \cdot g} & |{}_{bx}n_z^B| &= \frac{\sqrt{{}_{bx}h_3}}{{}_{bx}F \cdot g} \end{aligned} \quad (6.16)$$

Die Vorzeichen können aus (6.9) abgeleitet werden:

Da der Anschlagtisch zumindest in etwa horizontal sein muß, gilt immer $g_z^A < 0$. Damit können über ${}_{bx}e_3$, ${}_{bx}e_6$ und ${}_{bx}e_9$ die Vorzeichen der ${}_{bx}n_i^B$ bestimmt werden. Sind nun die ${}_{bx}n_i^B$ bekannt, so erhält man daraus auch die Vorzeichen von g_x^A und g_y^A . Um den Einfluß des Meßrauschens möglichst gering zu halten, verwendet man dazu zweckmäßigerweise die Komponenten bei denen ${}_{bx}n_i^B \approx 1$ ist.

Dies ist auch der Grund, warum Betrag und Vorzeichen getrennt behandelt wurden, obwohl auch eine Lösung ohne diese Trennung existiert.

Für die restlichen Parameter ergeben sich damit folgende Gleichungen:

$$g_x^A = \frac{{}_{bx}e_1}{|{}_{bx}e_1|} \cdot \frac{-{}_{bx}e_3}{|{}_{bx}e_3|} \cdot \frac{\sqrt{{}_{bx}h_4}}{{}_{bx}F} \quad g_y^A = \frac{{}_{bx}e_2}{|{}_{bx}e_2|} \cdot \frac{-{}_{bx}e_3}{|{}_{bx}e_3|} \cdot \frac{\sqrt{{}_{bx}h_5}}{{}_{bx}F} \quad g_z^A = -\frac{\sqrt{{}_{bx}h_6}}{{}_{bx}F} \quad (6.17)$$

$${}_{bx}n_x^B = \frac{-{}_{bx}e_3}{|{}_{bx}e_3|} \cdot \frac{\sqrt{{}_{bx}h_1}}{{}_{bx}F \cdot g} \quad {}_{bx}n_y^B = \frac{-{}_{bx}e_6}{|{}_{bx}e_6|} \cdot \frac{\sqrt{{}_{bx}h_2}}{{}_{bx}F \cdot g} \quad {}_{bx}n_z^B = \frac{-{}_{bx}e_9}{|{}_{bx}e_9|} \cdot \frac{\sqrt{{}_{bx}h_3}}{{}_{bx}F \cdot g} \quad (6.18)$$

Für die Beschleunigungsmesser B_y und B_z ergeben sich die sensitiven Achsen analog:

$${}_{by}n_x^B = \frac{-{}_{by}e_3}{|{}_{by}e_3|} \cdot \frac{\sqrt{{}_{by}h_1}}{{}_{by}F \cdot g} \quad {}_{by}n_y^B = \frac{-{}_{by}e_6}{|{}_{by}e_6|} \cdot \frac{\sqrt{{}_{by}h_2}}{{}_{by}F \cdot g} \quad {}_{by}n_z^B = \frac{-{}_{by}e_9}{|{}_{by}e_9|} \cdot \frac{\sqrt{{}_{by}h_3}}{{}_{by}F \cdot g} \quad (6.19)$$

$${}_{bz}n_x^B = \frac{-{}_{bz}e_3}{|{}_{bz}e_3|} \cdot \frac{\sqrt{{}_{bz}h_1}}{{}_{bz}F \cdot g} \quad {}_{bz}n_y^B = \frac{-{}_{bz}e_6}{|{}_{bz}e_6|} \cdot \frac{\sqrt{{}_{bz}h_2}}{{}_{bz}F \cdot g} \quad {}_{bz}n_z^B = \frac{-{}_{bz}e_9}{|{}_{bz}e_9|} \cdot \frac{\sqrt{{}_{bz}h_3}}{{}_{bz}F \cdot g} \quad (6.20)$$

Die Transformation T^{S1B} kann nun sofort angegeben werden:

$$T^{S1B} = \begin{pmatrix} {}_{bx}n_x^B & {}_{by}n_x^B & {}_{bz}n_x^B \\ {}_{bx}n_y^B & {}_{by}n_y^B & {}_{bz}n_y^B \\ {}_{bx}n_z^B & {}_{by}n_z^B & {}_{bz}n_z^B \end{pmatrix} \quad (6.21)$$

6.2.5.3 Sensormodell der Kreisel

Genau wie beim Beschleunigungsmesser gliedert sich das verwendete Sensormodell in 2 Teile. Zuerst wird die Temperaturkorrektur durchgeführt, dann werden Offset, Skalenfaktor und Fehlausrichtungswinkel korrigiert.

Temperaturkorrektur (Laborkalibrierung)

Diese Korrektur wurde vom Hersteller angegeben. Sie basiert auf dem durch den internen Temperatursensor gelieferten Wert ${}_kT$. Der Offset wird durch ein Polynom 2. Ordnung, der Skalenfaktor durch eine Polynom 1. Ordnung jeweils bezüglich der Temperatur beschrieben. Das Modell lautet:

$${}_k k r^{S2} = {}_k k s^{S2} \cdot {}_k s f 0 + {}_k o 0$$

$$\text{mit } {}_k s f 0 = {}_k c 0 + {}_k c 1 \cdot T$$

$${}_k o 0 = {}_k b 0 + {}_k b 1 \cdot T + {}_k b 2 \cdot T^2$$

${}_k T$ ist die Sensortemperatur (vom Temperatursensor geliefert) in ° Celsius

${}_k c 0$, ${}_k c 1$, ${}_k b 0$, ${}_k b 1$, ${}_k b 2$ sind die vom Hersteller angegebenen Parameter des Temperaturmodells.

${}_k k s^{S2}$ vom Kreisel k gelieferter unkorrigierter Wert

${}_k k r^{S2}$ Temperaturkorrigierte Rohdaten des Kreisels k

Offset und Skalenfaktorkorrektur

Das so temperaturkorrigierte Signal ${}_k k r^{S2}$ wird dann durch ${}_k k^{S2} = {}_k k r^{S2} \cdot {}_k s f 1 + {}_k o 1$ nochmals korrigiert. Dies ist notwendig, da Offset und Skalenfaktor sich mit der Zeit und insbesondere nach jedem Einschalten ändern.

Außerdem werden die Fehlausrichtungswinkel mit der Korrekturmatrix T^{S2B} korrigiert. Dazu werden die Drehraten der 3 Kreisel zu einem Vektor

$$\vec{k}^{S2} = \begin{pmatrix} {}_k k x^{S2} \\ {}_k k y^{S2} \\ {}_k k z^{S2} \end{pmatrix}$$

zusammengefaßt (Sensorkoordinatensystem), der dann in das Bodykoordinatensystem transformiert wird.

$$\vec{k}^B = T^{S2B} \cdot \vec{k}^{S2}$$

Die hier benutzten Parameter ${}_k s f 1$, ${}_k o 1$ und T^{S2B} werden vor jeder Messung durch eine 24-Lagen-Kalibrierung bestimmt. Siehe Kapitel 6.2.5.4.

6.2.5.4 Kalibriermethode für Kreisel

Genau wie bei den Beschleunigungsmessern werden die Kreisel einzeln kalibriert, so daß die Vorgehensweise nur am Kreisel Kx demonstriert wird. Der wesentlichste Unterschied ist natürlich, daß Drehraten gemessen werden, also muß überall a durch k ersetzt werden.

Analog zu Gleichung (6.1) ist hier die gemessene Drehrate:

$${}^L k_{kx} = {}_{kx} \vec{n}^B \cdot {}^L \vec{k}_e^B + {}_{kx} f \cdot {}_{kx} \vec{n}^B \cdot {}^L \vec{g}^B = {}^L \vec{n}^A \cdot \vec{k}_e^A + {}_{kx} f \cdot {}^L \vec{n}^A \cdot \vec{g}^A \quad (6.22)$$

Der jeweils erste Term ist die gemessene Drehratenkomponente der Erddrehrate \vec{k}_e analog zum Beschleunigungsmesser, der 2. Term kommt von einer unerwünschten Eigenschaft der verwendeten mechanischen Kreisel: Der Meßwert ist abhängig von einer äußeren Beschleunigung, hier der Erdbeschleunigung. Der Parameter ${}_{kx} f$ gibt die Stärke dieser Abhängigkeit an. Definiert man eine 'theoretische' Drehrate

$${}_{kx} \vec{d} = \vec{k}_e + {}_{kx} f \cdot \vec{g} \quad (6.23)$$

so hat Gleichung (6.22) dieselbe Form (6. 1) wie bei den Beschleunigungsmessern:

$${}^L k_{kx} = {}_{kx} \vec{n}^B \cdot {}^L \vec{d}^B = {}^L \vec{n}^A \cdot {}_{kx} \vec{d}^A \quad (6.24)$$

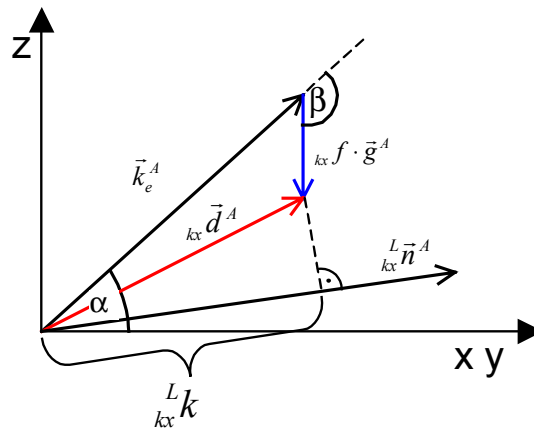


Abbildung 6.7: Skizze der gemessenen Drehratenkomponente ${}^L k_{kx}$

Abbildung 6.7 zeigt die Zusammensetzung der theoretischen Drehrate ${}_{kx} \vec{d}$ aus der Erddrehrate \vec{k}_e und der Erdbeschleunigung \vec{g} . Die Projektion der theoretischen Drehrate auf die sensitive Achse ${}^L \vec{n}^A$ ergibt die gemessene Drehrate ${}^L k_{kx}$. α ist der Winkel zwischen der Erddrehrate \vec{k}_e und der horizontalen Ebene, β der Winkel zwischen Erddrehrate \vec{k}_e und Schwerevektor \vec{g} .

Analog zu Gleichung (6.6) ergibt sich hier

$${}^L k_{kx} = {}_{kx} F \cdot {}_{kx} \vec{d}^A \cdot {}^L T^{BA} \cdot {}_{kx} \vec{n}^B + {}_{kx} o \quad (6.25)$$

$$\text{mit } {}_{kx} F = \frac{1}{{}_{kx} s f 1} \quad (6.26)$$

$$\text{und } {}_{kx} o = -\frac{{}_{kx} o 1}{{}_{kx} s f 1} \text{ ergibt sich} \quad (6.27)$$

$$\text{Ferner gilt noch } |{}_{kx} \vec{n}^B| = 1 \quad ({}_{kx} \vec{n}^B \text{ ist eine Richtung}) \quad (6.28)$$

$$\text{und } |\vec{k}_e^A| = k_e \quad (\text{der Betrag der Erddrehrate ist bekannt}) \quad (6.29)$$

Um Gleichung (6.25) zu lösen, wird wieder ein Vektor ${}_{kx}\vec{e}$ definiert:

$$\begin{aligned} {}_{kx}e_1 &= {}_{kx}F \cdot {}_{kx}d_x^A \cdot {}_{kx}n_x^B & {}_{kx}e_4 &= {}_{kx}F \cdot {}_{kx}d_x^A \cdot {}_{kx}n_y^B & {}_{kx}e_7 &= {}_{kx}F \cdot {}_{kx}d_x^A \cdot {}_{kx}n_z^B \\ {}_{kx}e_2 &= {}_{kx}F \cdot {}_{kx}d_y^A \cdot {}_{kx}n_x^B & {}_{kx}e_5 &= {}_{kx}F \cdot {}_{kx}d_y^A \cdot {}_{kx}n_y^B & {}_{kx}e_8 &= {}_{kx}F \cdot {}_{kx}d_y^A \cdot {}_{kx}n_z^B \\ {}_{kx}e_3 &= {}_{kx}F \cdot {}_{kx}d_z^A \cdot {}_{kx}n_x^B & {}_{kx}e_6 &= {}_{kx}F \cdot {}_{kx}d_z^A \cdot {}_{kx}n_y^B & {}_{kx}e_9 &= {}_{kx}F \cdot {}_{kx}d_z^A \cdot {}_{kx}n_z^B & {}_{kx}e_{10} &= {}_{kx}o \end{aligned} \quad (6.30)$$

wobei gilt
$${}_{kx}\vec{d}^A = \begin{pmatrix} {}_{kx}d_x^A \\ {}_{kx}d_y^A \\ {}_{kx}d_z^A \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad {}_{kx}\vec{n}^B = \begin{pmatrix} {}_{kx}n_x^B \\ {}_{kx}n_y^B \\ {}_{kx}n_z^B \end{pmatrix}$$

Mit der in Gleichung (6.10) definierten Matrix A und dem 1x24 Meßvektor ${}_{kx}S_L = {}_{kx}^L d$ läßt sich Gleichung (6.25) in Matrixschreibweise darstellen:

$$A \cdot {}_{kx}\vec{e} = {}_{kx}\vec{S} \quad (6.31)$$

wobei A und ${}_{kx}\vec{S}$ gegeben sind und ${}_{kx}\vec{e}$ gesucht wird. Als Lösung ergibt sich wieder:

$${}_{kx}\vec{e} = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot (A^T \cdot {}_{kx}\vec{S}) \quad (6.32)$$

Diese Gleichung ist immer lösbar, solange $\|A^T \cdot A\| \neq 0$ ist. Dies ist aufgrund der Definition von A immer erfüllt.

Aus dem jetzt bekannten ${}_{kx}\vec{e}$ müssen mit Hilfe der Gleichungen (6.30) die gewünschten Parameter (${}_{kx}\vec{d}^A$, ${}_{kx}\vec{n}^B$, ${}_{kx}o$, ${}_{kx}F$) bestimmt werden. Dazu werden zuerst die abstrakten Hilfwerte ${}_{kx}h_i$ definiert:

$$\begin{aligned} {}_{kx}h_1 &= {}_{kx}e_1^2 + {}_{kx}e_2^2 + {}_{kx}e_3^2 & &= [{}_{kx}F]^2 \cdot |{}_{kx}\vec{d}^A|^2 \cdot [{}_{kx}n_x^B]^2 \\ {}_{kx}h_2 &= {}_{kx}e_4^2 + {}_{kx}e_5^2 + {}_{kx}e_6^2 & &= [{}_{kx}F]^2 \cdot |{}_{kx}\vec{d}^A|^2 \cdot [{}_{kx}n_y^B]^2 \\ {}_{kx}h_3 &= {}_{kx}e_7^2 + {}_{kx}e_8^2 + {}_{kx}e_9^2 & &= [{}_{kx}F]^2 \cdot |{}_{kx}\vec{d}^A|^2 \cdot [{}_{kx}n_z^B]^2 \\ {}_{kx}h_4 &= {}_{kx}e_1^2 + {}_{kx}e_4^2 + {}_{kx}e_7^2 & &= [{}_{kx}F]^2 \cdot [{}_{kx}d_x^A]^2 \\ {}_{kx}h_5 &= {}_{kx}e_2^2 + {}_{kx}e_5^2 + {}_{kx}e_8^2 & &= [{}_{kx}F]^2 \cdot [{}_{kx}d_y^A]^2 \\ {}_{kx}h_6 &= {}_{kx}e_3^2 + {}_{kx}e_6^2 + {}_{kx}e_9^2 & &= [{}_{kx}F]^2 \cdot [{}_{kx}d_z^A]^2 \end{aligned} \quad (6.33)$$

$$\text{Mit Gleichungen (6.30) und (6.28) ergibt sich } {}_{kx}h_1 + {}_{kx}h_2 + {}_{kx}h_3 = {}_{kx}F^2 \cdot |{}_{kx}\vec{d}^A|^2 \quad (6.34)$$

und da ${}_{kx}F$ positiv ist damit

$$\begin{aligned} {}_{kx}F \cdot |{}_{kx}d_x^A| &= \sqrt{{}_{kx}h_4} & {}_{kx}F \cdot |{}_{kx}d_y^A| &= \sqrt{{}_{kx}h_5} & {}_{kx}F \cdot |{}_{kx}d_z^A| &= \sqrt{{}_{kx}h_6} \\ |{}_{kx}n_x^B| &= \frac{\sqrt{{}_{kx}h_1}}{\sqrt{{}_{kx}h_1 + {}_{kx}h_2 + {}_{kx}h_3}} & |{}_{kx}n_y^B| &= \frac{\sqrt{{}_{kx}h_2}}{\sqrt{{}_{kx}h_1 + {}_{kx}h_2 + {}_{kx}h_3}} & |{}_{kx}n_z^B| &= \frac{\sqrt{{}_{kx}h_3}}{\sqrt{{}_{kx}h_1 + {}_{kx}h_2 + {}_{kx}h_3}} \end{aligned} \quad (6.35)$$

Die Sensitive Achse des Kreisels x zeigt grob in Richtung der x -Achse des Body-Systems, so daß ${}_{kx}n_x^B \approx 1$. Damit gilt:

$${}_{kx}n_x^B = \frac{\sqrt{{}_{kx}h_1}}{\sqrt{{}_{kx}h_1 + {}_{kx}h_2 + {}_{kx}h_3}} \quad (6.36)$$

$$\frac{{}_{kx}e_3}{|{}_{kx}e_3|} \cdot \text{liefert das Vorzeichen von } {}_{kx}d_z^A$$

$$\frac{{}_{kx}e_6}{|{}_{kx}e_6|} \cdot \text{liefert das Vorzeichen von } {}_{kx}d_z^A \cdot {}_{kx}n_y^B$$

Dies zusammen ergibt:

$${}_{kx}n_y^B = \frac{{}_{kx}e_3}{|{}_{kx}e_3|} \cdot \frac{{}_{kx}e_6}{|{}_{kx}e_6|} \cdot \frac{\sqrt{{}_{kx}h_2}}{\sqrt{{}_{kx}h_1 + {}_{kx}h_2 + {}_{kx}h_3}} \quad (6.37)$$

und genauso

$${}_{kx}n_z^B = \frac{{}_{kx}e_3}{|{}_{kx}e_3|} \cdot \frac{{}_{kx}e_9}{|{}_{kx}e_9|} \cdot \frac{\sqrt{{}_{kx}h_3}}{\sqrt{{}_{kx}h_1 + {}_{kx}h_2 + {}_{kx}h_3}} \quad (6.38)$$

Für die Kreisel K_y und K_z ergeben sich die sensitiven Achsen analog:

$$\begin{aligned} {}_{ky}n_x^B &= \frac{{}_{ky}e_3}{|{}_{ky}e_3|} \cdot \frac{{}_{ky}e_6}{|{}_{ky}e_6|} \cdot \frac{\sqrt{{}_{ky}h_1}}{\sqrt{{}_{ky}h_1 + {}_{ky}h_2 + {}_{ky}h_3}} \\ {}_{ky}n_y^B &= \frac{\sqrt{{}_{ky}h_2}}{\sqrt{{}_{ky}h_1 + {}_{ky}h_2 + {}_{ky}h_3}} \\ {}_{ky}n_z^B &= \frac{{}_{ky}e_9}{|{}_{ky}e_9|} \cdot \frac{{}_{ky}e_6}{|{}_{ky}e_6|} \cdot \frac{\sqrt{{}_{ky}h_3}}{\sqrt{{}_{ky}h_1 + {}_{ky}h_2 + {}_{ky}h_3}} \end{aligned} \quad (6.39)$$

$$\begin{aligned} {}_{kz}n_x^B &= \frac{{}_{kz}e_3}{|{}_{kz}e_3|} \cdot \frac{{}_{kz}e_9}{|{}_{kz}e_9|} \cdot \frac{\sqrt{{}_{kz}h_1}}{\sqrt{{}_{kz}h_1 + {}_{kz}h_2 + {}_{kz}h_3}} \\ {}_{kz}n_y^B &= \frac{{}_{kz}e_6}{|{}_{kz}e_6|} \cdot \frac{{}_{kz}e_9}{|{}_{kz}e_9|} \cdot \frac{\sqrt{{}_{kz}h_2}}{\sqrt{{}_{kz}h_1 + {}_{kz}h_2 + {}_{kz}h_3}} \\ {}_{kz}n_z^B &= \frac{\sqrt{{}_{kz}h_3}}{\sqrt{{}_{kz}h_1 + {}_{kz}h_2 + {}_{kz}h_3}} \end{aligned} \quad (6.40)$$

Die Transformation T^{S2B} kann nun sofort angegeben werden:

$$T^{S2B} = \begin{pmatrix} {}_{kx}n_x^B & {}_{ky}n_x^B & {}_{kz}n_x^B \\ {}_{kx}n_y^B & {}_{ky}n_y^B & {}_{kz}n_y^B \\ {}_{kx}n_z^B & {}_{ky}n_z^B & {}_{kz}n_z^B \end{pmatrix} \quad (6.41)$$

Bei den Kreiseln ist es schwieriger, den Skalenfaktor ${}_{kx}F$ zu berechnen, da $|\vec{d}^A|$ nicht bekannt ist. Deshalb wird ein neuer Vektor

$${}_{kx}\vec{R}^A = {}_{kx}F \cdot {}_{kx}\vec{d}^A \tag{6.42}$$

eingeführt. Dieser kann über (6.36), (6.33) und (6.30) bestimmt werden:

$${}_{kx}\vec{R}^A = \begin{pmatrix} \frac{{}_{kx}e_1}{|{}_{kx}e_1|} \sqrt{{}_{kx}h_4} \\ \frac{{}_{kx}e_2}{|{}_{kx}e_2|} \sqrt{{}_{kx}h_5} \\ \frac{{}_{kx}e_3}{|{}_{kx}e_3|} \sqrt{{}_{kx}h_6} \end{pmatrix} \tag{6.43}$$

Abbildung 6.8 zeigt den Zusammenhang zwischen der Erddrehrate \vec{k}_e^A , der gemessenen Drehrate ${}_{kx}\vec{d}^A$, der Hilfsdrehrate ${}_{kx}\vec{R}^A$ und dem Erdschwerevektor \vec{g}^A . Zusätzlich gehen die Modellparameter ${}_{kx}f$ und ${}_{kx}F$ ein. Nach oben ist die z-Achse des Anschlagtischsystems aufgetragen, nach rechts der Vektor in der xy-Ebene, der nach Norden zeigt.

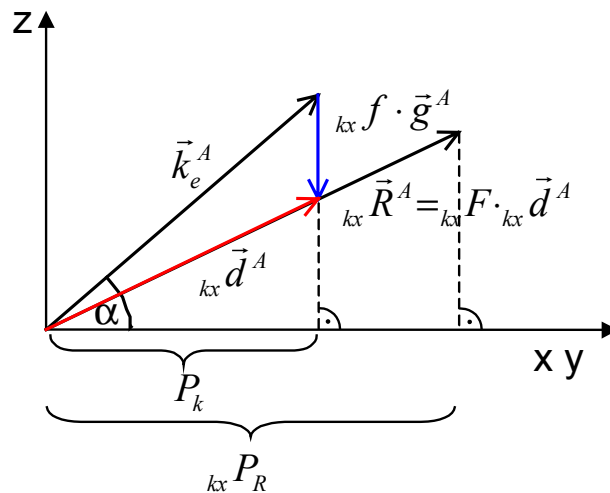


Abbildung 6.8: Zusammenhang zwischen den Drehraten im Anschlagtischkoordinatensystem

Bekannt sind \vec{k}_e^A , ${}_{kx}\vec{R}^A$ und \vec{g}^A , gesucht sind ${}_{kx}\vec{d}^A$, ${}_{kx}f$ und ${}_{kx}F$

Der Winkel α ist durch $\alpha = \beta - 90^\circ$ definiert, wobei β der Winkel zwischen der Erddrehrate \vec{k}_e^A und dem Erdschwerevektor \vec{g}^A ist. α entspricht in etwa der geographischen Breite.

Die Projektion von \vec{k}_e^A auf die Ebene senkrecht zu \vec{g}^A ist :

$$P_k = k \cdot \cos \alpha ,$$

die von ${}_{kx}\vec{R}^A$:

$${}_{kx}P_R = \frac{|{}_{kx}\vec{R}^A \times \vec{g}^A|}{g^A} .$$

Da gilt ${}_{kx}P_R = {}_{kx}F \cdot P_k$, ergibt sich für ${}_{kx}F$

$${}_{kx}F = \frac{|\vec{R}^A \times \vec{g}^A|}{g^A \cdot k_e \cdot \cos \alpha} \quad (6.44)$$

für \vec{g}^A muß der mit den Beschleunigungsmessern bestimmte Erdschwerevektor eingesetzt werden. Ist nun ${}_{kx}F$ bekannt, so folgt damit für ${}_{kx}\vec{d}^A$

$${}_{kx}\vec{d}^A = \frac{1}{{}_{kx}F} \cdot {}_{kx}R^A = \frac{1}{{}_{kx}F} \cdot \begin{pmatrix} \frac{{}_{kx}e_1}{|{}_{kx}e_1|} \sqrt{{}_{kx}h_4} \\ \frac{{}_{kx}e_2}{|{}_{kx}e_2|} \sqrt{{}_{kx}h_5} \\ \frac{{}_{kx}e_3}{|{}_{kx}e_3|} \sqrt{{}_{kx}h_6} \end{pmatrix} \quad (6.45)$$

und

$$\vec{k}_e^A = {}_{kx}\vec{d}^A - {}_{kx}f \cdot \vec{g}^A \quad (6.46)$$

Wird Gleichung (6.23) mit \vec{g}^A multipliziert, so erhält man

$${}_{kx}\vec{d}^A \cdot \vec{g}^A = \vec{k}_e^A \cdot \vec{g}^A + {}_{kx}f \cdot \vec{g}^A \cdot \vec{g}^A, \text{ mit (6.42) und}$$

$$\vec{k}_e^A \cdot \vec{g}^A = k_e \cdot g \cdot \cos \beta = -k_e \cdot g \cdot \sin \alpha \text{ ergibt sich}$$

$$\frac{{}_{kx}\vec{R}^A \cdot \vec{g}^A}{{}_{kx}F} = -k_e \cdot g \cdot \sin \alpha + {}_{kx}f \cdot g^2. \text{ Dies nach } {}_{kx}f \text{ aufgelöst}$$

$${}_{kx}f = \frac{{}_{kx}\vec{R}^A \cdot \vec{g}^A}{{}_{kx}F \cdot g^2} + \frac{k_e}{g} \sin \alpha \quad (6.47)$$

$$\text{Für } {}_{kx}o \text{ ergibt sich direkt aus (6.30) } {}_{kx}o = {}_{kx}e_{10} \quad (6.48)$$

6.2.6 Bestimmung der Schiefwinkligkeit

6.2.6.1 Theorie

Für die Kalibrierung des IMU müssen die Transformationsmatrizen ${}^L T^{BA}$ bekannt sein. Dieses Kapitel befaßt sich mit deren Bestimmung.

${}^L T^{BA}$ beschreibt die Drehung der IMU aus der Lage L in die Lage 1. Wenn das Gehäuse der IMU ein exakter Quader wäre, so könnte man die Transformationsmatrizen sofort angeben:

Lage 1	Lage 2	Lage 3	Lage 4
${}^1 T^{BA} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	${}^2 T^{BA} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	${}^3 T^{BA} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	${}^4 T^{BA} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

$$\begin{array}{cccc}
\text{Lage 5} & \text{Lage 6} & \text{Lage 7} & \text{Lage 8} \\
{}^5\mathbf{T}^{\text{BA}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} & {}^6\mathbf{T}^{\text{BA}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} & {}^7\mathbf{T}^{\text{BA}} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} & {}^8\mathbf{T}^{\text{BA}} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}
\end{array}$$

$$\begin{array}{cccc}
\text{Lage 9} & \text{Lage 10} & \text{Lage 11} & \text{Lage 12} \\
{}^9\mathbf{T}^{\text{BA}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} & {}^{10}\mathbf{T}^{\text{BA}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} & {}^{11}\mathbf{T}^{\text{BA}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} & {}^{12}\mathbf{T}^{\text{BA}} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}
\end{array}$$

$$\begin{array}{cccc}
\text{Lage 13} & \text{Lage 14} & \text{Lage 15} & \text{Lage 16} \\
{}^{13}\mathbf{T}^{\text{BA}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} & {}^{14}\mathbf{T}^{\text{BA}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} & {}^{15}\mathbf{T}^{\text{BA}} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} & {}^{16}\mathbf{T}^{\text{BA}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}
\end{array}$$

$$\begin{array}{cccc}
\text{Lage 17} & \text{Lage 18} & \text{Lage 19} & \text{Lage 20} \\
{}^{17}\mathbf{T}^{\text{BA}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} & {}^{18}\mathbf{T}^{\text{BA}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} & {}^{19}\mathbf{T}^{\text{BA}} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} & {}^{20}\mathbf{T}^{\text{BA}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}
\end{array}$$

$$\begin{array}{cccc}
\text{Lage 21} & \text{Lage 22} & \text{Lage 23} & \text{Lage 24} \\
{}^{21}\mathbf{T}^{\text{BA}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} & {}^{22}\mathbf{T}^{\text{BA}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} & {}^{23}\mathbf{T}^{\text{BA}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} & {}^{24}\mathbf{T}^{\text{BA}} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}
\end{array}$$

In der Realität weicht die Gehäuseform aber mehr oder weniger von dieser Idealform ab, so daß an den obigen Matrizen kleine Korrekturen vorgenommen werden müssen. Das Problem besteht nun darin, die korrigierten Matrixelemente zu bestimmen.

Die geeignetste Methode ist die Bestimmung der Drehmatrizen durch die Messung von identischen Punkten. Dazu wurde der Anschlagtisch auf der Meßfläche eines Koordinatenmeßgerätes (Modell: UPMC 850 von Zeiss) montiert, welches vom Institut für Maschinenelemente (IMA) zur Verfügung gestellt wurde. Die IMU wurde wie bei einer Kalibrierung in allen 24 Lagen auf den Anschlagtisch gelegt. In jeder Lage wurden mindestens 4 ausgewählte Punkte gemessen. Eine Beschreibung dieser Methode ist in Lingel (1993) enthalten; dort wird auch die Genauigkeitssteigerung durch Berücksichtigung der schiefwinkligen Gehäuseform statt einer rechtwinkligen beschrieben.

6.2.6.2 Messung

Die einzigen Punkte an der IMU, die für die Vermessung geeignet erscheinen, sind die Mittelpunkte der eingelassenen Stahlkugeln. Allerdings sind diese nicht direkt einer Messung zugänglich. Um den Mittelpunkt einer Kugel zu bestimmen, wurden 8 bis 15 Punkte auf der Kugeloberfläche angetastet. Aus diesen Antastpunkten bestimmte dann das Koordinatenmeßgerät durch Ausgleichung den Mittelpunkt der Kugel. Der Mittelpunkt und seine Genauigkeit wurden auf einem Drucker ausgegeben. Dies wurde so lange wiederholt, bis mindestens eine Genauigkeit von 2µm erreicht war. Dann wurde der nächste Punkt gemessen. Wenn in einer Lage alle benötigten Punkte gemessen waren, wurde dasselbe Verfahren bei der nächsten Lage wiederholt.

Nach der gesamten Messung waren die Kugelmittelpunkte der Stahlkugeln in allen Lagen bekannt. Das dabei verwendete Koordinatensystem ist durch das Koordinatenmeßgerät festgelegt. Es wurde darauf geachtet, daß in jeder Lage mindestens 3 Punkte gemessen wurden, die auch in einer anderen Lage bestimmt wurden.

6.2.6.3 Auswertung

Zuerst wurden die Kugelmittelpunkte mittels des zusätzlich von der Koordinatenmeßmaschine bestimmten Kugelradius auf den Auflagepunkt der Kugel umgerechnet. Dann wurden über die identischen Punkte von Lage 1 und Lage L die Transformationsmatrizen der 6-Parameter-Transformation bestimmt. Dies sind die gesuchten Transformationsmatrizen ${}^L T^{BA}$.

6.2.7 Durchführung einer 24-Lagen-Kalibrierung

6.2.7.1 Ablauf der Kalibrierung

Um die Einflüsse von Temperaturänderungen so gering wie möglich zu halten, wurde das ESINS ca. 1 Stunde vor der Kalibrierung eingeschaltet. Da während der Kalibrierung keine Erschütterungen auftreten sollten, wurde der Anschlagtisch im Labor des IAGB auf einem Pfeiler montiert, welcher mit einem massiven Fundament im Untergrund ruht. Die y-Achse des Anschlagtisches wurde etwa nach Norden ausgerichtet. Die eigentliche Kalibrierung lief dann folgendermaßen ab:

1. Positionieren des IMU in Lage 1 auf dem Anschlagtisch
2. Starten der Datenaufnahme am PC
3. Marke „ZUPT ein“ setzen (durch Betätigung eines Schalters). Der Beginn des ZUPT wird für die spätere Datenauswertung markiert.
4. 30 Sekunden warten, dieser Wert wurde empirisch als ausreichende Dauer eines ZUPT gewonnen. Während dieser Zeit sollten alle unnötigen Erschütterungen vermieden werden, da sich dadurch die Genauigkeit verringert.
5. Marke „ZUPT aus“ setzen (durch Betätigung eines Schalters). Das Ende des ZUPT wird für die spätere Datenauswertung markiert.
6. IMU in die nächste Lage bringen. Dazu wird das IMU so vorsichtig gedreht, daß die Kreisel immer innerhalb des zulässigen Meßbereichs (<100 °/s) bleiben.
7. Die Schritte 3. bis 6. werden dann für jede der 24 Lagen wiederholt
8. Beenden der Datenaufnahme

Der so erhaltene Datensatz hat eine Größe von ca. 7MB und ist auf zwei Dateien verteilt:

Die Inertialdaten sind in der Datei IAGBxx.DAT gespeichert, die Zusatzinformationen in der Datei IAGBxx.DDD. Die xx in den Dateinamen geben die Nummer der Messung an.

Format der IAGBxx.DAT Datei

Diese Datei ist eine Binärdatei, welche in Abständen von 1/256 s folgende Records enthält:

b _x I	Werte des Beschleunigungsmessers B _x	INT16
b _y I	Werte des Beschleunigungsmessers B _y	INT16
b _z I	Werte des Beschleunigungsmessers B _z	INT16
k _x ks	Wert der 1. Achse des Kreisels 2	INT16
k _y ks	Wert der 2. Achse des Kreisels 1	INT16
k _z ks	Wert der 1. Achse des Kreisels 1	INT16
k _{z2} ks	Wert der 2. Achse des Kreisels 2	INT16
R	Zusatzkanal (z.B. für Synchronisierung)	INT16

Den einzelnen Records ist durch die Reihenfolge des Auftretens implizit eine Recordnummer RNR zugeordnet. Aus dieser kann durch folgende Formel der zugehörige Zeitpunkt t (bezogen auf den Start der Datenerfassung) bestimmt werden:

$$t = \frac{1\text{s}}{256} \cdot RNR$$

Format der IAGBxx.DDD Datei

Diese Datei ist eine Binärdatei, welche Records in folgendem Format enthält:

RNR	Recordnummer und damit der Zeitpunkt	INT32
IDX	Beschreibt die Bedeutung von WERT	INT32
WERT	Zahlenwert für IDX	INT32 bzw. REAL32

Im Folgenden eine Liste von IDX/WERT Paaren:

IDX	WERT	Typ	Bedeutung
1	DNR	INT32	Anfang der Messung
2	DNR	INT32	Ende der Messung
3	DNR	INT32	Anfang ZUPT
4	DNR	INT32	Ende ZUPT
5	DNR	INT32	Anfang CUPT
6	DNR	INT32	Ende CUPT
7	LabNr	INT32	Label mit der Nummer LabNr
8	Dauer	INT32	Unterbrechung von Dauer Abtastintervallen
9	DNR	INT32	Schalter Res eingeschaltet
10	DNR	INT32	Schalter Res ausgeschaltet
256	T	REAL32	Außentemperatur
257	TB _x	REAL32	Temperatur des Beschleunigungsmessers B _x
258	TB _y	REAL32	Temperatur des Beschleunigungsmessers B _y
259	TB _z	REAL32	Temperatur des Beschleunigungsmessers B _z
261	TK1	REAL32	Temperatur des Kreisels K1
262	TK2	REAL32	Temperatur des Kreisels K2
512	DI/O	INT32	Zustand der Digital I/O
513	AnzNogo	INT32	Kreisel 1 außerhalb Meßbereich
514	AnzNogo	INT32	Kreisel 1 wieder innerhalb Meßbereich
515	AnzNogo	INT32	Kreisel 2 außerhalb Meßbereich
516	AnzNogo	INT32	Kreisel 2 wieder innerhalb Meßbereich

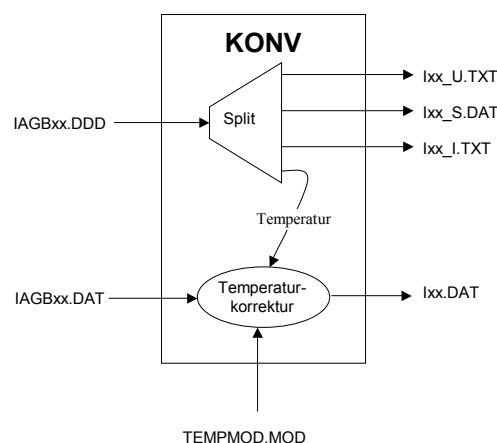
517	DNR	INT32	steigende Flanke von Zeitsynchrnsignal 1
518	DNR	INT32	fallende Flanke von Zeitsynchrnsignal 1
519	AnzViop	INT32	Synchronisationsfehler mit VIOP-Karte
520	DNR	INT32	steigende Flanke von Zeitsynchrnsignal 2
521	DNR	INT32	fallende Flanke von Zeitsynchrnsignal 2
768	Lage	INT32	Lage der IMU während Kalibrierung
1024	Id	INT32	ID des VIOP Programmes (1 = Normal, 2 = Simuliert)
1025	Freq	INT32	Samplingfrequenz in Hz
1026	Gain	INT32	Verstärkungsfaktor = 2 hoch Gain
1027	SChan	INT32	Anfangskanal Beschleunigungsmesser
1028	EChan	INT32	Endkanal Beschleunigungsmesser
1029	0	INT32	Neues VIOP-Programm geladen
1030	AnzDat	INT32	Anzahl der Datenworte pro Record im DAT File
1031	BM	INT32	Typ der verwendeten AD-Wandler für Beschleunigungsmesser
1280	VMEIrq	INT32	Falscher IRQ am VME-Bus statt 3112
1281	IRQ	INT32	kein VME Kreisel IRQ
1282	VMEIrq	INT32	Falscher IRQ am VME-Bus statt 2176
1283	IRQ	INT32	kein VME iMAR IRQ
1284	VMEIrq	INT32	Falscher IRQ am VME-Bus statt 2192
1285	IRQ	INT32	kein VME Temp IRQ
1380	Z	INT32	Zähler AD1
1382	N	INT32	Nenner AD1

Die Temperaturen der Sensoren wurden mit einer Abtastrate von 2 Hz erfaßt.

6.2.7.2 Auswertung der Kalibrierung

Temperaturkorrektur

An den so erhaltenen Rohdaten (IAGBxx.DAT und IAGBxx.DDD) der Beschleunigungsmesser ${}_bI$ bzw. der Kreisel ${}_kks$ wird zuerst die in Kapitel 6.2.5.1 bzw. 6.2.5.3 beschriebene Temperaturkorrektur des Herstellers angebracht. Diese Korrektur wird im Programm KONV vorgenommen. Die Temperaturmodelle der Hersteller werden aus der Datei TEMPMOD.MOD eingelesen.



Das Programm liefert die Temperaturkorrigierten Daten ${}_bar^{S1}$ bzw. ${}_kkr^{S2}$ in der Datei Ixx.DAT.

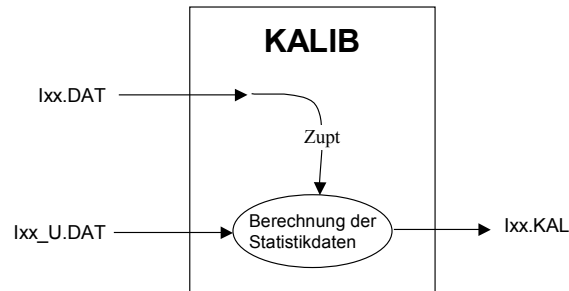
Die Datei Ixx_S.DAT enthält die aus der Datei IAGBxx.DDD extrahierten Informationen über Syncsignale, Timer und ZUPTs; diese sind mit einer Datenrate von 256 Hz binär dargestellt.

Die Datei Ixx_U.TXT enthält die Informationen über Beginn und Ende von ZUPTs, CUPTs und der Lage in ASCII-Form.

Die Datei Ixx_I.TXT enthält alle restlichen Informationen (VIOP, KALIB, Fehler, ...) aus der Datei IAGBxx.DDD in lesbarer Form (ASCII).

Bestimmung der Statistikdaten

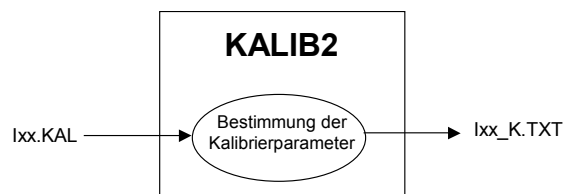
Im zweiten Schritt werden die statistischen Daten von allen Sensoren in allen Lagen während der ZUPTs berechnet (Programm KALIB).



Die statistischen Daten (\bar{y} , Σt , Σt^2 , Σy , Σy^2 , Σty) für jeden ZUPT und jeden Sensor werden in der Datei Ixx.KAL abgelegt.

Bestimmung der Kalibrierparameter

In einem dritten Schritt (Programm KALIB2) werden aus den statistischen Daten \bar{y} für jeden Sensor die Kalibrierparameter wie in den Kapiteln 6.2.5.2 und 6.2.5.4 beschrieben bestimmt.



Der so erzeugte Parametersatz hat die folgende Form:

```
{ Dateiname : I19_K.TXT          Datum : 14.7.1993   Zeit : 11:09:35 }
```

```
Bx:
  Offset:   -0.012466211833979
  Skalenf:  +1.001268770324476
  Richtung:  0.9999992294   -0.0011637131   0.0004322537
  Schwere:   -0.0080193208   0.0007278903   -9.8083299947

By:
  Offset:   -0.015112200096342
  Skalenf:  +1.000025603071086
  Richtung:  0.0006604250   0.9999997660   0.0001617103
  Schwere:   -0.0079883855   0.0000282415   -9.8083300469

Bz:
  Offset:   +0.030423060614332
  Skalenf:  +1.000021259352383
  Richtung:  0.0002522268   0.0006227313   0.9999997707
  Schwere:   -0.0074155683   -0.0000860364   -9.8083304964

Kx:
  Offset:   -0.000086672055681
  Richtung:  0.9968974632   -0.0685379081   0.0387040427
  Skalenf:   0.967204233058320
  g-Abh.:   -2.7926371756e-06
  Drehrate: -5.1168954438e-07   -4.8082390367e-05   8.2212221010e-05
  Erddreh:  -5.3349378010e-07   -4.8081766590e-05   5.4821113520e-05
```

Ky:

```

Offset:    0.000063355886495
Richtung:  0.0921370944      0.9936090592      0.0652057765
Skalenf:   0.957456740394902
g-Abh.:    1.8915134280e-06
Drehrate:  -5.8663975955e-07    -4.8080868109e-05    3.6268555741e-05
Erddreh:   -5.7187128014e-07    -4.8081290608e-05    5.4821143982e-05

```

Kz:

```

Offset:    0.000060151376124
Richtung:  0.0398126716      -0.0433411228      0.9982667470
Skalenf:   0.974944514419054
g-Abh.:    1.9235410436e-06
Drehrate:  -5.5500689903e-07    -4.8081258541e-05    3.5954392923e-05
Erddreh:   -5.3998835574e-07    -4.8081688193e-05    5.4821118592e-05

```

Kz2:

```

Offset:    0.000015985237331
Richtung:  0.0146883722      0.0851113162      0.9962631759
Skalenf:   0.958916187492594
g-Abh.:    -2.9077004145e-06
Drehrate:  -5.5257565238e-07    -4.8081896350e-05    8.3340832524e-05
Erddreh:   -5.7527827403e-07    -4.8081246871e-05    5.4821146796e-05

```

g0: -7.8077581668e-03 +2.2336516095e-04 -9.8083301793e+00

K0: -5.5515792250e-07 -4.8081498066e-05 +5.4821130722e-05

Beschleunigungstransformation:

$$\{ \quad a = B s + O$$

```

      Bxx      Bxy      Bxz      Ox
      Byx      Byy      Byz      Oy
      Bzx      Bzy      Bzz      Oz

```

```

}
+9.9873294826e-01  -6.5954770076e-04  -2.5149653621e-04  +1.2448100576e-02
+1.1639530396e-03  +9.9997396366e-01  -6.2300880758e-04  +1.5145270550e-02
-4.3243285401e-04  -1.6142137262e-04  +9.9997918004e-01  -3.0430257439e-02

```

Drehratentransformation:

$$\{ \quad w = K s + O + D a$$

```

      Kxx      Kxy      Kxz      Ox
      Kyx      Kyy      Kyz      Oy
      Kzx      Kzy      Kzz      Oz
      Dxx      Dxy      Dxz
      Dyx      Dyy      Dyz
      Dzx      Dzy      Dzz

```

```

}
+1.0325020930e+00  -9.2776977496e-02  -4.5206078676e-02  +9.8086254388e-05
+6.9982434442e-02  +1.0418766438e+00  +4.2443481166e-02  -6.2496530734e-05
-4.4202760114e-02  -6.3265106016e-02  +1.0264964236e+00  -6.1568099678e-05

-2.8834037287e-06  -1.7548889874e-07  -8.6955747755e-08
-1.9543554806e-07  +1.9707236622e-06  +8.1641778057e-08
+1.2344227116e-07  -1.1966679755e-07  +1.9745080020e-06

```

Der erste Teil beschreibt die Parameter der Sensoren, bei den Beschleunigungsmessern sind dies:

Offset	${}_bO$
Skalenfaktor	${}_bF$
Richtung	${}_b\vec{n}^B$
Schwere	\vec{g}^A

Bei den Kreiseln:

Offset	${}_kO$
Skalenfaktor	${}_kF$
g-Abhängigkeit	${}_kf$
Richtung	${}_k\vec{n}^B$
Drehrate	\vec{d}^A
Erddrehrate	\vec{k}^A

Im zweiten Teil sind die vollständigen Transformationen angegeben. Sie berücksichtigen die Richtung der sensitiven Achse, den Skalenfaktor und den Offset. Bei den Kreiseln wird zusätzlich die g-Abhängigkeit über die Matrix D angegeben.

Die Auswerteprogramme für die eigentlichen Messungen benutzen nur den zweiten Teil.

6.2.8 Genauigkeit

Bisher wurden noch keine Vergleichsmessungen mit einem Referenzsystem vorgenommen, so daß eine Aussage über die Genauigkeit des Verfahrens nicht gemacht werden kann. Einen Anhaltspunkt bietet aber die Wiederholgenauigkeit. Dazu wurden mehrere Kalibrierungen direkt hintereinander ausgeführt und für jede mit der in Kapitel 6.2.5 beschriebenen Methode die Kalibrierparameter bestimmt. Die Standardabweichung der so erhaltenen Parameter ist ein Maß für die Wiederholbarkeit. In Tabelle 6.9 sind die erhaltenen Werte dargestellt. Zusätzlich sind die von SAGEM (Camberlein, 1985) bei einer 18-Lagen-Laborkalibrierung mit einem 2-achsigen Drehtisch erreichten Genauigkeiten eingetragen. SAGEM verwendete ein Inertialnavigationssystem mit Laserkreisel (RLG) und ZUPTs mit einer Dauer von 1 Minute, so daß eine Kalibrierung ca. 20 Minuten dauerte.

Ein direkter Vergleich ist nicht möglich, doch erkennt man, daß die Werte der Beschleunigungsmesser in der gleichen Größenordnung liegen. Bei den Kreiseln hingegen ist die 24-Lagen-Kalibrierung des IAGB um ein bis drei Größenordnungen schlechter. Dies liegt daran, daß die 24-Lagen-Kalibrierung die relativ kleine Erddrehrate verwendet, wohingegen bei SAGEM ein Drehtisch benutzt wurde. Um hier eine Verbesserung zu erzielen, könnte man den Anschlagtisch auf einen einachsigen Drehtisch montieren. Damit hat man den Vorteil einer größeren Drehrate, allerdings ist die Kalibrierung dann wieder nur im Labor möglich.

		IAGB	SAGEM
Beschleunigungsmesser	Offset	3 μg	2 μg
	Skalenfaktor	6 ppm	5 ppm
	Fehlausrichtung	4 μrad	5 μrad
Kreisel	Offset	0.1 $^\circ/\text{h}$	0.01 $^\circ/\text{h}$
	Skalenfaktor	1100 ppm	2 ppm
	Fehlausrichtung	4000 μrad	5 μrad

Tabelle 6.9: Wiederholbarkeit der 24-Lagen Kalibrierung (IAGB) und Genauigkeit der Kalibrierung bei SAGEM

6.2.9 Zusammenfassung

Die meisten in Inertialnavigationssystemen eingesetzten Sensoren haben die unerwünschte Eigenschaft, daß sich Offset und Skalenfaktor nach jedem Einschalten ändern. So können in einer Laborkalibrierung bestimmte Werte i.a. nicht für eine Messung im Feld verwendet werden. Um die aktuellen Werte dieser Parameter zu erhalten, muß direkt vor der Messung im Feld eine Kalibrierung durchgeführt werden. Für diesen Zweck wurde die "24-Lagen-Kalibrierung" entwickelt. Eine Kalibrierung dauert ca. 45 Minuten und erfordert nur einen Anschlagtisch und eine stabile Unterlage sowie den Betrag des Erdschwerevektors am Ort der Kalibrierung.

Zur Nachkalibrierung der Beschleunigungsmesser kann dieses Verfahren sehr gut verwendet werden. Bei den Kreiseln muß jeweils abgeschätzt werden, ob die erreichbare Genauigkeit ausreichend ist.

Die zusätzlich erhaltenen Fehlaustrichtungswinkel werden i.a. nicht benötigt, da diese sich mit der Zeit nicht wesentlich verändern.

7 Deformation einer Eisenbahnbrücke durch Zugüberfahrt

7.1 Problembeschreibung und Aufgabenstellung

Die Deutsche Bundesbahn beabsichtigte im Rahmen eines vom European Rail Research Institute (ERRI) organisierten Forschungsprojektes, das Zusammenwirken einer als Durchlaufträger ausgeführten Brücke mit dem darüber rollenden Zug im Versuch zu untersuchen. Ziel der Arbeit war es, diejenige Durchbiegung der Brücke festzulegen, die mit Hinblick auf den Schwingungs-Komfort des Reisenden zugelassen werden kann.

Der wesentliche Teil der Arbeit wurde durch Simulationsrechnungen des Zusammenwirkens von Fahrzeug und Brücke erledigt. Um die Ergebnisse der Simulationsrechnung überprüfen zu können und die unter Verkehrslast auftretende reale dynamische und statische Verformung der Brücke zu bestimmen, wurden Streckenversuche durchgeführt, bei denen die Brückenverformung und die dynamische Antwort der sie überfahrenden Fahrzeuge gemessen wurden.

Für die Auswahl einer geeigneten Brücke waren folgende Kriterien ausschlaggebend:

- Die Brücke mußte als Durchlaufträger ausgeführt sein und mindestens drei Öffnungen aufweisen, d.h. außer in den 2 Widerlagern noch durch 2 Pfeiler unterstützt werden.
- Die Strecke mußte mit mindestens 200 km/h überfahren werden können, da die Untersuchungsergebnisse für die Konzeption von künftigen Schnellbahntrassen herangezogen werden sollten.
- Die Brücke mußte derart weich sein, daß die dynamische Antwort der sie überfahrenden Fahrzeuge den Pegel der üblichen regellosen Schwingungen deutlich überschritt.
- Die Brücke mußte in einem Teil des DB-Netzes liegen, in dem es die Betriebsverhältnisse gestatteten, zusätzliche Versuchsfahrten einzuschleichen.

Alle diese Kriterien sind bei der Weserbrücke bei Vennebeck erfüllt. Es handelt sich um eine als Vollwandträger-Verbundplatte ausgebildete Verbundbrücke mit gevouteten Stahlhauptträgern und oberliegender Fahrbahn. Die Brücke besteht aus 3 Feldern und ist zweigleisig, d.h. bei Belastung nur eines Gleises wird die Verbundplatte tordiert.



Abbildung 7.1: Überblick über die gesamte Brücke

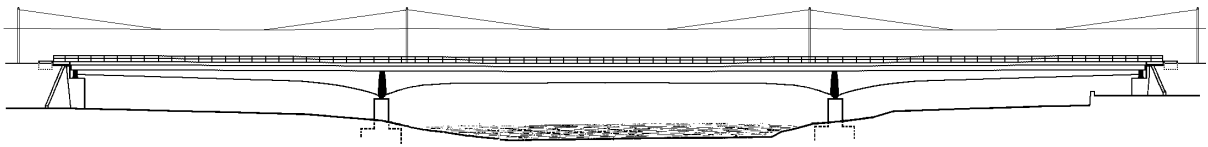


Abbildung 7.2: Längsschnitt der Brücke ca. im Maßstab 1:1400

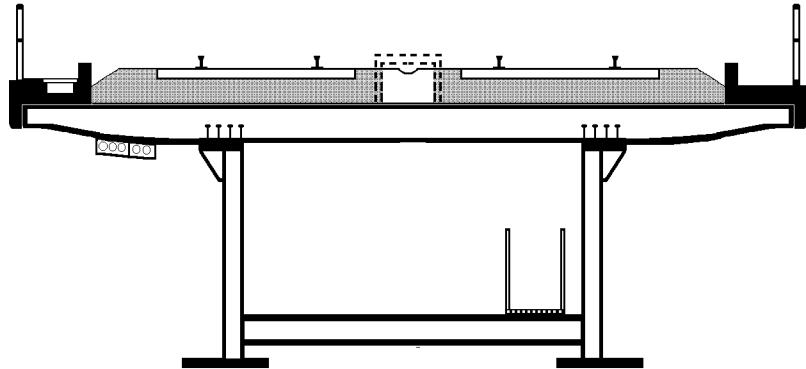


Abbildung 7.3: Querschnitt der Brücke ca. im Maßstab 1:100

Der Ablauf der Messung war folgendermaßen geplant:

Ein Meßzug sollte die Brücke mit verschiedenen Geschwindigkeiten überfahren, wobei während der Überfahrt zum einen die Durchbiegung der Brücke in der Mitte aller 3 Felder jeweils an beiden Hauptträgern und zum anderen die dynamische Antwort der Fahrzeuge gemessen werden sollten. Geplant waren folgende Geschwindigkeiten: 120 km/h, 160 km/h, 180 km/h, 190 km/h und 200 km/h. Dabei sollten alle Fahrten einmal mit unbelastetem Nebengleis und einmal mit einem durch einen stehenden Brückenbelastungszug belasteten Nebengleis durchgeführt werden.

Die Messung der dynamischen Antwort der Fahrzeuge mußte im Meßzug selbst vorgenommen werden und wurde durch die Meßgruppe L3 der Bundesbahn-Versuchsanstalt Minden/Westf. durchgeführt, deren Ergebnisse für eine Auswertung nicht zur Verfügung standen. Die Durchführung der Messung der Durchbiegung der Brücke wurde an die Gesellschaft für Geodätische Meß- und Rechentechnik (FGMT) vergeben, die in Zusammenarbeit mit dem Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen (IAGB) der Universität Stuttgart die Planung, Durchführung und Auswertung dieser Messungen übernahm. Nur dieser Teil wird in der vorliegenden Arbeit betrachtet.

Aufgabenstellung:

1. Die Durchbiegung in der Mitte der 3 Felder war jeweils an den beiden Hauptträgern zu messen. Dabei war unter den beiden Außenfeldern fester Boden, so daß eine direkte Abstandsmessung möglich war. Das Mittelfeld überspannt die Weser, so daß dort ein anderes Verfahren eingesetzt werden mußte, wobei die Schifffahrt auf der Weser nicht behindert werden durfte, so daß praktisch nur ein optisches Verfahren eingesetzt werden konnte.
2. Die maximale Durchbiegung konnte bis zu 80 mm erreichen, die auftretenden Eigenfrequenzen sollten unter 7 Hz liegen.
3. Die Position des Meßzuges auf der Brücke war so zu bestimmen, das zu jeder Durchbiegung die zugehörige Stellung des Zuges auf der Brücke angegeben werden konnte. Damit bestand auch die Möglichkeit die Daten mit den im Meßzug gemessenen zu vergleichen, da auch bei diesen die Position des Zuges mit gemessen wurde.

4. Die Eigenfrequenzen für Biegung und Torsion sollten aus dem Ausschwingverhalten der Brücke bestimmt werden.

7.2 Realisierung des Multi-Sensor-Meßsystems

7.2.1 Konzept der Messung

Aufgrund der in Kapitel 7.1 beschriebenen Randbedingungen wurde ein Meßkonzept erarbeitet, welches folgende Messungen vorsah:

1. Die Durchbiegung in den Seitenfeldern wurde direkt mit Wegaufnehmern erfaßt. Dazu wurden auf jeder Seite 2 Wegaufnehmer für den linken und den rechten Hauptträger benötigt, insgesamt also 4 Wegaufnehmer.
2. Die Durchbiegung der beiden Hauptträger im Mittelfeld sollten, um eine Redundanz zu erreichen, jeweils von zwei CCD-Kameras aufgenommen werden, die an beiden Ufern aufgestellt waren, so daß insgesamt 4 Kameras benötigt wurden.
3. Die Eigenschwingungen sollten mit vertikal montierten Beschleunigungsmessungen erfaßt werden, so daß auf jedem Feld 2, insgesamt also 6 Beschleunigungsmesser zum Einsatz kamen.
4. Die Bestimmung der Position des Meßzuges geschah mit einer oberhalb der Schienen befestigten Lichtschranke, die durch die Räder unterbrochen wurde. Alternativ konnte ein an der Schiene befestigter Dehnungsmeßstreifen zum Einsatz kommen.
5. Die Synchronisierung der einzelnen Messungen untereinander wurde durch ein eigens erzeugtes Synchronsignal gewährleistet.

Eine Skizze der Anordnung der Sensoren an einem Hauptträger ist in Abbildung 7.6 gezeigt. Die Kamerasignale wurden direkt an der Kamera mit einem handelsüblichen S-VHS Videorecorder für die spätere Auswertung aufgezeichnet. Alle anderen Sensoren waren mit einer zentralen Datenerfassung verbunden, welche die Meßwerte visualisierte und speicherte.



Abbildung 7.4: Meßbus mit zentraler Datenerfassung.

7.2.2 Beschreibung der verwendeten Sensoren

7.2.2.1 Überblick

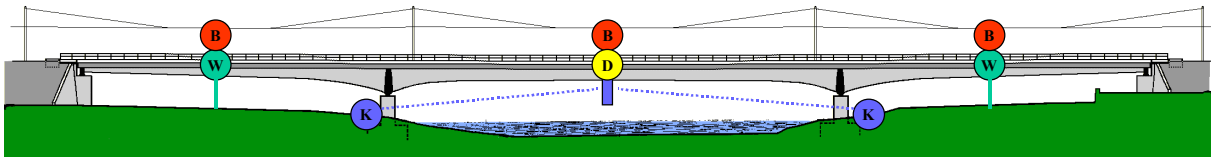


Abbildung 7.5: Skizze der an der Brücke angebrachten Sensoren (Längsansicht)

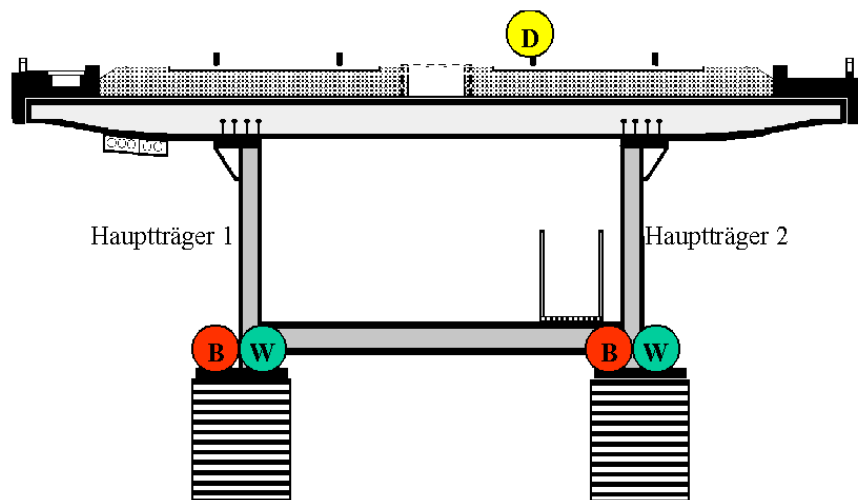


Abbildung 7.6: Skizze der an der Brücke angebrachten Sensoren (Queransicht)



Wegaufnehmer Anzahl: 4

An jedem der beiden Hauptträger waren in beiden Seitenfeldern Wegaufnehmer angebracht. Beschreibung in Kapitel 7.2.2.2



Kamera Anzahl: 4 Kameras 2 Zieltafeln

An jedem der beiden Hauptträger waren im mittleren Brückenfeld Zieltafeln angebracht. Jede Zieltafel wurde von beiden Ufern aus beobachtet. Beschreibung in Kapitel 7.2.2.3



Beschleunigungsmesser Anzahl: 6

An jedem der beiden Hauptträger waren in allen drei Feldern Beschleunigungsmesser angebracht. Beschreibung in Kapitel 7.2.2.4



Dehnungsmeßstreifen Anzahl: 1

In der Mitte der Brücke war an der vom Meßzug überfahrenen Schiene ein Dehnungsmeßstreifen angebracht. Beschreibung in Kapitel 7.2.2.5

7.2.2.2 Wegaufnehmer

Zum Einsatz kamen die induktiven Wegaufnehmer W100K von HBM. Sie besitzen einen Arbeitsbereich von 210 mm und eine Linearitätsabweichung von maximal 0,2 %. Als Meßverstärker wurde der MCA5101 verwendet. Damit erhält man eine zum Weg proportionale Ausgangsspannung im Bereich von ± 5 Volt. Um den Abstand zwischen Hauptträger und Boden von ca. 6 m zu überbrücken, wurden Masten aufgestellt, welche mit Seilen abgespannt und am Hauptträger in einer Führung frei verschiebbar befestigt waren. Dort wurden auch die Wegaufnehmer montiert und die Meßverstärker installiert. Die Ausgangssignale wurden in einem doppelt geschirmten Kabel zur zentralen Datenerfassung geleitet.

Zur Kalibrierung der Wegaufnehmer wurde die bekannte Dicke einer Platte bestimmt, woraus sich der Skalenfaktor ableiten lies. Der Offset war bei den Messungen uninteressant, da nur eine relative Bewegung der Brücke bestimmt werden sollte.

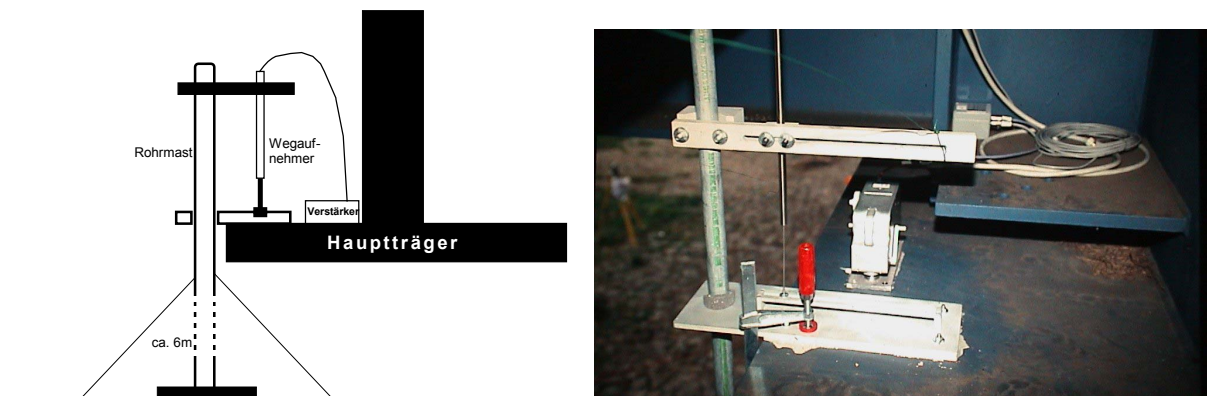


Abbildung 7.7: Befestigung der Wegaufnehmer an den Hauptträgern der Brücke

7.2.2.3 Kamera

Für die Messungen im Mittelfeld wurden 4 CCD-Kameras eingesetzt, welche auf zwei an den beiden Hauptträgern im Mittelfeld befestigte Zieltafeln ausgerichtet waren. Die in Abbildung 7.8a gezeigten Zieltafeln bestanden aus 12 übereinander angeordneten horizontalen 4 cm breiten Streifen mit einem Abstand von 4 cm. Die Kameras waren an beiden Ufern unter der Brücke aufgestellt und jeweils mit einem 200 mm Objektiv bestückt, so daß die Zieltafel formatfüllend aufgenommen werden konnte. Durch die Messungen von beiden Ufern wurde die Redundanz erhöht, um so mögliche Fehlerquellen ausschließen zu können.

Die Daten der 4 Kameras wurden direkt mit 4 S-VHS Videorecordern aufgezeichnet. Das unten beschriebene Zeitsynchronsignal wurde frequenzmoduliert und in den Tonkanal eingespeist, so daß zu jedem Zeitpunkt ein Bezug zu den anderen Meßwerten hergestellt werden konnte.

Genau wie bei den Wegaufnehmern stört ein Offset die relativen Messungen nicht. Der Skalenfaktor wurde bei der Auswertung der Bilddaten aus der Streifenbreite gewonnen.

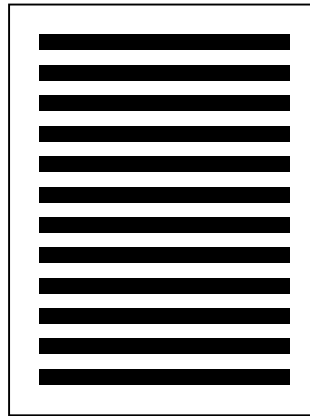


Abbildung 7.8: a) Ansicht einer Zieltafel

b) Blick der Kameras auf die Zieltafeln

7.2.2.4 Beschleunigungsmesser

Die Bestimmung der Eigenfrequenzen sollte ursprünglich aus dem Ausschwingverhalten der Brücke nach einer Zugüberfahrt bestimmt werden. Da die Brücke zu diesem Zeitpunkt aber noch durch viele erzwungene Schwingungen angeregt ist, ist eine klare Trennung der Eigenschwingungen nicht möglich.

Aus diesem Grund wurde zur Bestimmung der Eigenfrequenzen die Brücke durch kleine Kraftstöße (z.B. Hüpfen einer Person) angeregt. Dies entspricht in erster Näherung einer Anregung durch einen δ -Kraftstoß, in welchem alle Frequenzen enthalten sind. Damit können alle Eigenschwingungen angeregt werden, welche an der Anregungsstelle keinen Knoten besitzen.

Da die dadurch angeregten Schwingungen extrem kleine Amplituden aufweisen, sind die oben beschriebenen Wegaufnehmer durch ihre Genauigkeit im 1/10 mm-Bereich zu deren Bestimmung ungeeignet.

Deshalb wurden in allen 3 Feldern jeweils auf beiden Hauptträgern vertikal ausgerichtete Beschleunigungsmesser installiert. Diese reagieren sehr empfindlich auf Schwingungen und erlauben es, die Eigenfrequenzen sehr einfach zu messen.

Da bei den Messungen nur die Eigenfrequenzen bestimmt werden sollten, die Amplitude der Schwingungen aber nicht interessierte, konnte auf eine aufwendigere Kalibrierung verzichtet werden. Der interne Offset wurde vernachlässigt und der Skalenfaktor aus einer Nullmessung und dem bekannten Wert der Erdbeschleunigung bestimmt.

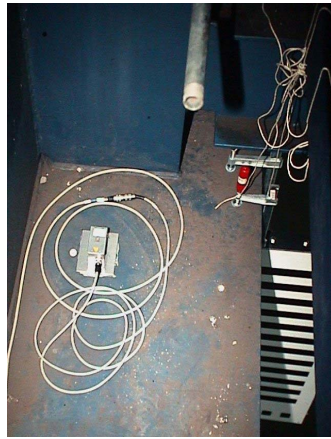


Abbildung 7.9: Anbringung des Beschleunigungsmessers, darunter die Zieltafel

7.2.2.5 Zusätzliche Sensoren

Bestimmung der Zugposition

Um jedem Meßzeitpunkt die Position des Zuges auf der Brücke zuordnen zu können, wurde in der Mitte der Brücke knapp oberhalb der Schienenoberkante eine Lichtschranke angebracht, die durch die Räder des Zuges unterbrochen wurde. Dieses Signal wurde im zentralen Datenerfassungssystem aufgenommen.

An derselben Stelle war auch ein Dehnungsmeßstreifen an der Schiene befestigt, der bei der Überfahrt jeder Achse des Zuges einen deutlichen Signalpeak erzeugte, welcher vom Datenerfassungssystem aufgezeichnet wurde.

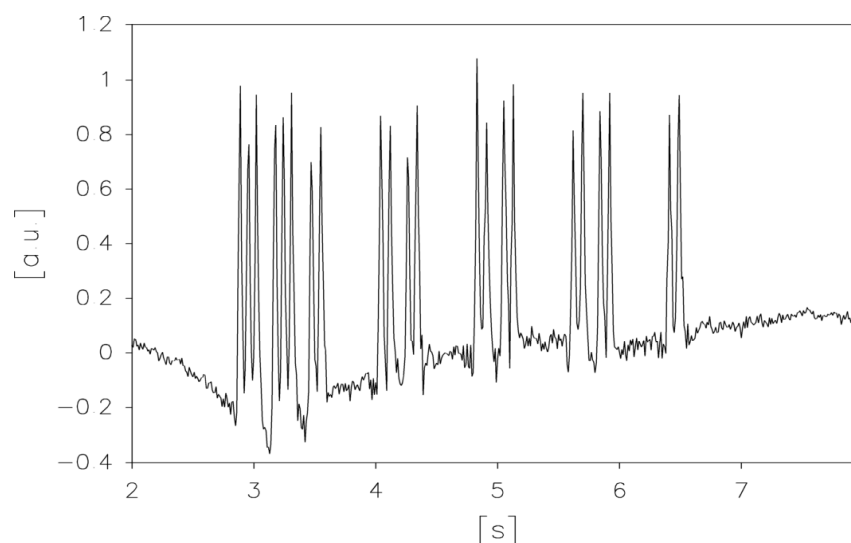


Abbildung 7.10: Signal des Dehnungsmeßstreifens während der Überfahrt des Meßzuges

Aus den gemessenen Peaks konnten die Zeitpunkte bestimmt werden, zu denen die jeweilige Achse die Mitte der Brücke passierte. Da die Geometrie des Meßzuges bekannt war, konnte daraus die Geschwindigkeit des Zuges bestimmt werden. Aus dieser als konstant angenommenen Geschwindigkeit und den oben bestimmten Zeitpunkten konnte die Zugposition zu jedem beliebigen Zeitpunkt berechnet werden.

Synchronsignal

Da alle vom zentralen Meßrechner erfaßten Daten mit derselben Frequenz gemessen wurden, war der zeitliche Bezug dieser Meßwerte zueinander festgelegt. Der Bezug zu den von den Kameras gelieferten Bilddaten mußte aber durch ein zusätzliches Zeitsynchronsignal erfolgen. Dieses wurde von einem unabhängigen Rechner erzeugt und sowohl vom zentralen Datenerfassungssystem sowie in modulierter Form von den Videorecordern auf dem Tonkanal aufgezeichnet. Das Signal besaß TTL-Pegel und enthielt alle 23 Sekunden einen Zeitcode, bestehend aus einem Startimpuls und 22 Datenbits, die den Tag und die Uhrzeit enthielten. Damit konnte jeder Messung, die länger als 23 Sekunden dauerte ein eindeutiges Zeitfenster zugeordnet werden.

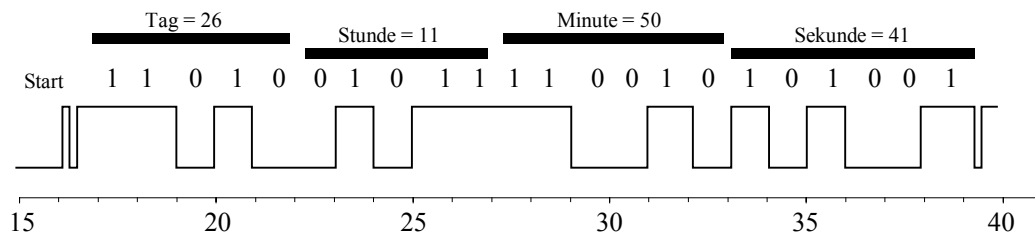


Abbildung 7.11: Beispiel für das Zeitsynchronsignal am 26.10. um 11:50:41 Uhr

Überwachung

Zur zusätzlichen Kontrolle wurde eine Kamera so aufgestellt, daß die gesamte Brücke aufgenommen wurde. Damit hatte man bei der Auswertung die Möglichkeit, bei unvorhergesehenen Meßwerten nach einer möglichen Ursache zu suchen, z.B. ein auf dem Nachbargleis fahrender Zug. Auch bei dieser Kamera wurde das modulierte Zeitsynchronsignal aufgezeichnet.

Statische Kontrolle

Um einen absoluten Bezug zwischen den einzelnen Meßstellen herstellen zu können, wurden die statischen Deformationen der Brücke konventionell mit einem Theodoliten eingemessen. Dazu wurden an den Hauptträgern in der Mitte jedes Feldes Zielmarken angebracht, die jeweils vor und nach Auffahrt des Meß- bzw. Belastungszuges gemessen wurden.



Abbildung 7.12: Bild der Kontrollkamera und Standpunkt des Theodolits

7.2.3 Beschreibung der Datenerfassung

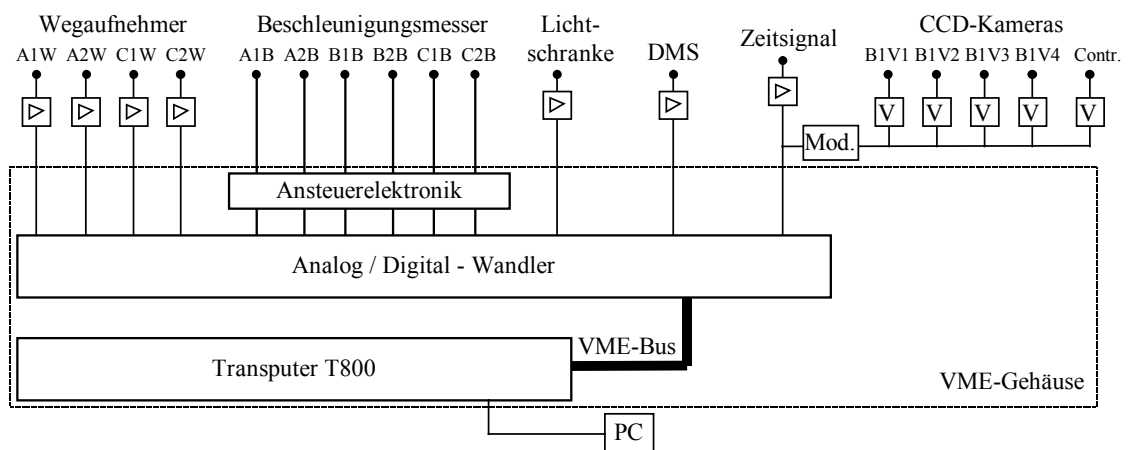


Abbildung 7.13: Schema der Datenerfassung

Das Konzept der Datenerfassung ist in Abbildung 7.13 dargestellt. Die Wegaufnehmer waren direkt mit den Meßverstärkern gekoppelt, deren Ausgänge über ein doppelt geschirmtes Kabel mit einer A/D-Wandler-Karte im VME-Bus verbunden waren. Die Beschleunigungsmesser wurden direkt mit der in die zentrale Datenerfassung integrierten Ansteuerelektronik verbunden, welche die verstärkten und tiefpaßgefilterten Signale an die A/D-Wandler-Karte weiterleitete. Auch die Signale der Lichtschranke, des DMS und das Zeitsynchronsignal wurden nach einer Verstärkung in den A/D-Wandler eingespeist. Das Zeitsynchronsignal wurde auf einen 1000-Hz-Ton moduliert und an die Toneingänge der Videorecorder angeschlossen.

Das eigentliche Meßprogramm lief auf einem Transputer vom Typ T800, der über einen VME-Bus Zugriff auf den A/D-Wandler hatte. Die 13 Eingangskanäle wurden mit einer Frequenz von 100 Hz abgetastet und an den über einen Transputerlink angeschlossenen PC übertragen, wo sie online grafisch angezeigt und auf der Festplatte abgespeichert wurden.

7.3 Durchführung der Messungen

Die eigentlichen Messungen an der Eisenbahnbrücke gliederten sich in zwei Teile. Zum einen wurde die Durchbiegung während der Überfahrt des Meßzuges gemessen, zum anderen die Eigenschwingungen der unbelasteten Brücke.

7.3.1 Kalibrierung

Da in den Messungen nur relative Deformationen bezogen auf die unbelastete Brücke benötigt wurden, konnte sich das Kalibrieren der Sensoren auf den Skalenfaktor beschränken.

Wegaufnehmer

Der Skalenfaktor s_w des Wegaufnehmers wurde bestimmt, indem unter die Tastschuppe eine Aluminiumplatte mit der Dicke d gelegt wurde. Aus der Änderung des Ausgangssignals a konnte mit

$$s_w = \frac{d}{a}$$

der Skalenfaktor bestimmt werden.

Beschleunigungsmesser

Die vertikal montierten Beschleunigungsmesser sollten im statischen Fall genau die Erdbeschleunigung liefern. Der gültige Erdbeschleunigungswert wurde aus dem nächstgelegenen Schwerefestpunkt abgeleitet und auf den Ort der Brücke reduziert. Der Vergleich dieses Wertes mit dem vom Beschleunigungsmesser gelieferten ergab den Skalenfaktor. Der Sensor-Offset wurde dabei vernachlässigt.

CCD-Kameras

Während der Messungen waren für die CCD-Kameras keine Kalibrierungen notwendig, da der Skalenfaktor in der Auswertung aus der Streifenbreite des Zieltafelmusters bestimmt wurde.

7.3.2 Deformation durch Zugüberfahrten

Die Messungen der Durchbiegung gliederten sich in zwei Teile, die Überfahrten mit belastetem und mit unbelastetem Nebengleis. In beiden Fällen wurden jeweils 5 Messungen gemacht, wobei der Meßzug die folgenden Geschwindigkeiten hatte: 120, 160, 180, 190 und 200 km/h. Der Meßzug bestand aus der Lok Nr. 750003-6 (6 Achsen á 193 kN), dem Meßwagen Nr. 92012 (480 kN) und 3 Wagen vom Typ Bm (je 390 kN). Die Fahrtrichtung war immer von Minden nach Bad Oeynhausen (Felder III, II, I).

Zuerst wurden die Messungen mit belastetem Nebengleis durchgeführt. Dabei fuhr der Belastungszug von Bad Oeynhausen kommend auf das 2. Gleis der Brücke, so daß während der Überfahrt des Meßzuges auf dem 1. Gleis schon eine statische Durchbiegung vorhanden war. Die Messungen wurden vor der Auffahrt des Belastungszuges gestartet und erst gestoppt, nachdem die Brücke wieder unbelastet war, so daß immer die gesamte Periode unbelastet - belastet - unbelastet beobachtet wurde, was eine Meßzeit von ca. 10 bis 15 Minuten ergab. Der Belastungszug bestand aus einer Lok (Nr. 103 240-8, 6 Achsen á 193 kN), 5 Brückenbelastungswagen (je 10 Achsen á ca. 170 kN) und am Ende wieder einer Lok (Typ 752 001-8, 4 Achsen á 210 kN).

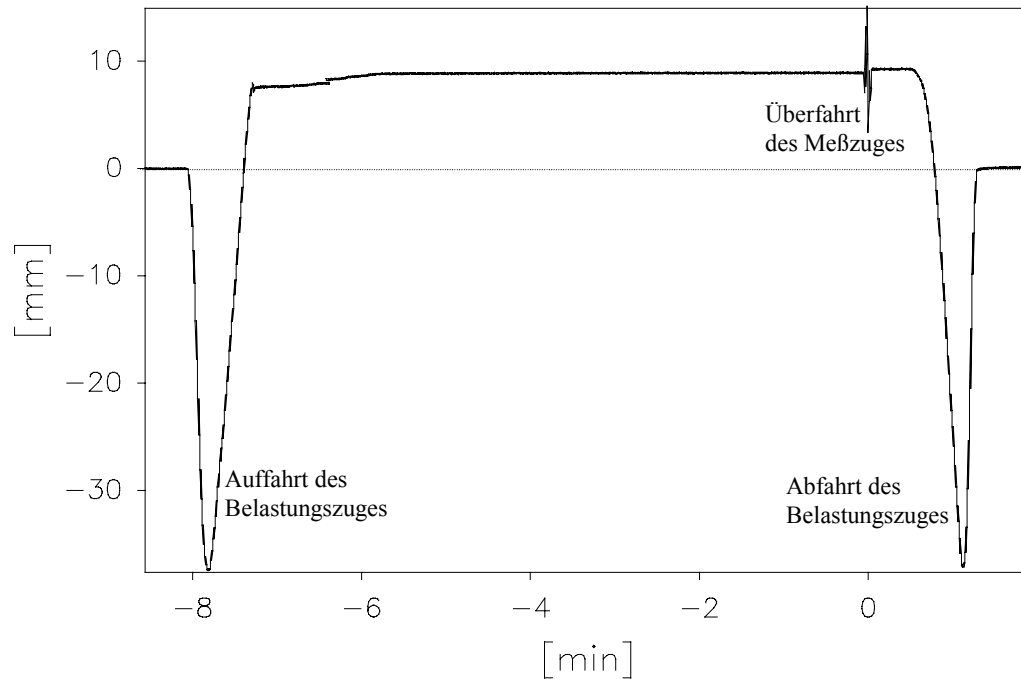


Abbildung 7.14: Deformation der Brücke im Feld I, Hauptträger 2 durch Belastungszug

Aus obiger Abbildung erkennt man, daß das Feld I durch den Belastungszug angehoben wurde. Die Belastungen im Mittelfeld waren also so groß, daß durch die Biegung des Durchlaufträgers die äußeren Felder angehoben wurden, trotz des teilweise darauf stehenden Belastungszuges.

Die Messungen mit unbelastetem Nebengleis wurden kurz vor der Überfahrt des Meßzuges gestartet und gleich danach wieder beendet. Die Meßzeit betrug ca. 2 Minuten, wobei die eigentliche Überfahrt nur 4-6 Sekunden dauerte.



Abbildung 7.15: Überfahrt des Meßzuges

7.3.3 Schwingungsmessungen

Ursprünglich sollten die Eigenschwingungen der Brücke aus dem Ausschwingverhalten nach einer Zugüberfahrt bestimmt werden. Während der Messungen bestätigte sich aber, daß die Störungen durch die Erschütterungen des Zuges so groß waren, daß keine Aussagen über die Eigenschwingungen gemacht werden konnten.

Zur Bestimmung der Eigenschwingungen im unbelasteten Zustand wurde die Brücke durch Hüpfen einer Person auf den verschiedenen Feldern angeregt. Da die Amplituden der so angeregten Schwingungen nur einige μm betragen, konnten sie nur von den Beschleunigungsmessern detektiert werden. Es wurden 3 Messungen durchgeführt, wobei die Brücke jeweils in der Mitte eines jeden Feldes angeregt wurde.

Durch Fouriertransformation der so erhaltenen Beschleunigungssignale sollten sich die Eigenschwingungen der Brücke bestimmen lassen. Die Anregung durch Hüpfen entspricht in erster Näherung einem Kraftstoß, das heißt mathematisch einer δ -Stoß Anregung. Darin sind alle Frequenzen enthalten, so daß alle Eigenschwingungen, die an der Anregungsstelle keinen Knoten besitzen, angeregt werden.

8 Theoretische Untersuchung der Brückenverformung

Es gibt verschiedene Verfahren zur Erstellung von Deformationsmodellen. Heute wird oft die Finite-Elemente-Methode (FEM) eingesetzt, welche eine sehr detaillierte Modellierung eines Objektes zuläßt. Da die Erstellung eines Modells aber nicht den Schwerpunkt dieser Arbeit bildet, und keine ausführlichen Geometrie- und Materialdaten vorhanden sind, soll im weiteren ein relativ einfaches mechanisches Modell erarbeitet werden, welches die Deformation doch einigermaßen korrekt wiedergibt. Genauere Modelle können in der Literatur zu FEM (z.B. Gallagher, 1976; Desai und Abel, 1972; Axelson, 1992; Link 1989) und zur technischen Mechanik (Holzmann et.al., 1975; Magnus und Müller, 1974; Nowacki, 1974) sowie in Schütz (1988) nachgelesen werden. Eine ausführliche Behandlung der Eigenfrequenzen von stabförmigen Körpern ist in Speier (1960) dargestellt, wobei besonders auf die Kopplung zwischen Biege- und Torsionsschwingungen eingegangen wird. Pelzer (1987) gibt einen Überblick über dynamische Deformationsmodelle.

8.1 Koordinatensystem

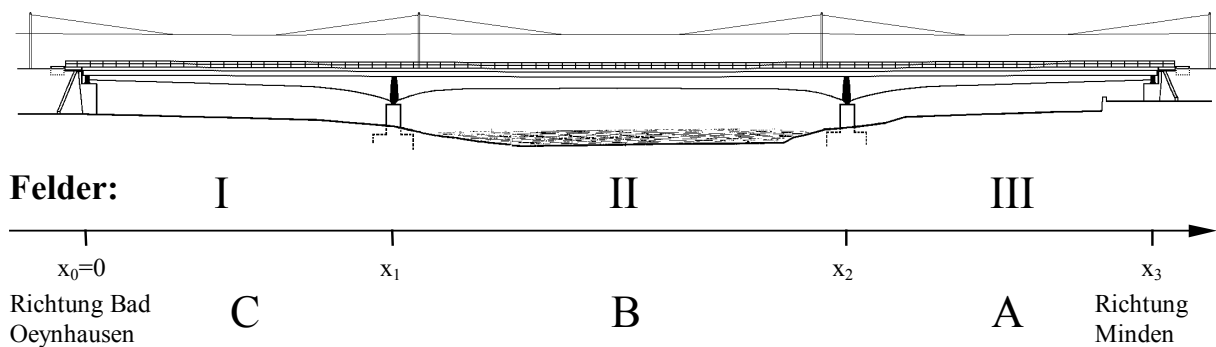


Abbildung 8.1: Definition des Koordinatensystems an der Vennebeckbrücke

Der Nullpunkt des Koordinatensystems liegt in der Mitte der Brücke am Widerlager, auf Bad Oeynhausener Seite auf der Höhe der Schienenoberkante. Die x-Achse geht in Längsrichtung der Brücke Richtung Minden, die z-Achse zeigt nach oben und die y-Achse ergänzt die beiden zu einem Rechtssystem, d.h. sie geht in obiger Skizze nach hinten, in der Realität wesenabwärts.

Hauptträger 1 war der vom Meßzug überfahrene ($y = 2,5$ m), Hauptträger 2 der auf der Seite des Belastungsgleises ($y = -2,5$ m). Die Bezeichnung der Felder ging von dem Feld auf Bad Oeynhausener Seite (Feld I) über das Mittelfeld (Feld II) bis zum Mindener Feld (Feld III).

Die Geometrie der Brücke und die Lage des verwendeten Koordinatensystems ist aus obiger Skizze zu entnehmen, wobei für die Stützstellen gilt:

Widerlager 1	$x_0 = 0$ m
Pfeiler 1	$x_1 = 56$ m
Pfeiler 2	$x_2 = 139$ m
Widerlager 2	$x_3 = 195$ m

Zusätzlich wurden noch folgende Hilfsgrößen eingeführt:

$$x_4 = x_2 - x_1$$

$$x_5 = x_3 - x_2$$

8.2 Biegung

Da die Brücke als Durchlaufträger ausgebildet ist, kann bei der Berechnung der Durchbiegung das Modell der Balkenbiegung verwendet werden. Dafür gelten nach Marguerre (1967) folgende vereinfachte Differentialgleichungen:

$$M''(x,t) = -q(x,t) \quad (8.1)$$

$$\tilde{w}'''(x,t) = -\frac{1}{E(x) \cdot I(x)} M(x,t) \quad (8.2)$$

Darin bedeuten $M(x,t)$ die Momente, $q(x,t)$ die Lastverteilung, $E(x)$ das Elastizitätsmodul, $I(x)$ das Flächenträgheitsmoment und $\tilde{w}(x,t)$ die Brückendurchbiegung. ' bedeutet die Ableitung nach x .

Die auf die Brücke wirkenden Lasten sind

$$q(x,t) = q_B(x) + \sum_{i=1}^N K_{L_i} \delta(x - x_{L_i}) - \frac{q_B(x)}{g_0} \ddot{\tilde{w}}(x,t) + D \cdot \dot{\tilde{w}}(x,t) \quad (8.3)$$

$q_B(x)$ ist das Eigengewicht der Brücke, die Summe entsteht durch die Belastung mit den Kräften K_{L_i} an der Stelle x_{L_i} (z.B. Achslast), der zu $\ddot{\tilde{w}}(x,t)$ proportionale Term beschreibt die Trägheitskräfte, wodurch nach d'Alembert (Kröner, 1971) die statischen Gleichungen in dynamische übergehen. Der letzte Term enthält die Dämpfung der Brücke. Die durch Widerlager und Pfeiler wirkenden Kräften werden durch die Rand- und Anschlußbedingungen berücksichtigt.

Für die weiteren Betrachtungen soll angenommen werden, daß die Biegesteifigkeit $E(x) \cdot I(x)$ unabhängig von x sei, so daß die Abkürzung

$$e = \frac{1}{E(x) \cdot I(x)} \quad (8.4)$$

eingeführt werden kann. Aus den obigen Gleichungen ergibt sich die Differentialgleichung

$$\tilde{w}^{(4)} + e \frac{q_B(x)}{g_0} \ddot{\tilde{w}} - e D \dot{\tilde{w}} = e \cdot q_B(x) + e \sum_{i=1}^N K_{L_i} \delta(x - x_{L_i}), \quad (8.5)$$

welche die statische und dynamische Durchbiegung der Brücke beschreibt. Als Ansatz wird eine harmonische zeitliche Schwingung $\tilde{w}(x,t) = e^{i\omega t} \cdot w(x)$ mit der Kreisfrequenz ω angenommen, wodurch sich aus (8.5) die DGL

$$e^{i\omega t} \cdot [w^{(4)} - \lambda^4 w] = e \cdot q_B(x) + e \sum_{i=1}^N K_{L_i} \delta(x - x_{L_i}) \quad (8.6)$$

ergibt, wobei λ durch

$$\lambda^4 := e \cdot \frac{q_B}{g_0} \cdot \omega^2 + i \cdot e \cdot D \cdot \omega \quad (8.7)$$

definiert wurde. Dabei wurde $q_B = q_B(x)$ als unabhängig von x angenommen, d.h. die Brücke besitzt überall eine konstante Eigenlast. Mit der Annahme, daß die durch die Laständerungen hervorgerufenen Bewegungen viel langsamer als die Eigenschwingungen der Brücke sind, kann die Zeitabhängigkeit von x_{L_i} als parametrisch angenommen werden, so daß die rechte Seite von

(8.6) unabhängig von der Zeit ist. Dann muß auch die linke Seite zeitunabhängig sein, was nur in den folgenden 2 Fällen erfüllt ist:

$$\text{a) } w_S^{(4)} - \lambda^4 w_S = 0 \quad (8.8)$$

Dies ist die homogene DGL, welche die Biegeschwingungen der Brücke beschreibt.

$$\text{b) } \omega = 0 \quad (8.9)$$

Damit wird $\lambda = 0$ und (8.6) geht in die inhomogene DGL

$$w^{(4)} = e \cdot q_B(x) + e \sum_{i=1}^N K_{L_i} \delta(x - x_{L_i}) \quad (8.10)$$

über. (8.10) ist linear und kann deshalb nach dem Superpositionsprinzip in zwei Gleichungen aufgeteilt werden:

$$1) w_E^{(4)} = e \cdot q_B(x) \quad (8.11)$$

Dies ist die Biegung durch das Eigengewicht der Brücke.

$$2) w_L^{(4)} = e \sum_{i=1}^N K_{L_i} \delta(x - x_{L_i}) \quad (8.12)$$

Dies ist die Biegung durch die statischen Lasten an den Stellen x_{L_i} .

Die Gesamtbiegung der Brücke setzt sich aus den 3 Lösungen der Gleichungen (8.8), (8.11) und (8.12) zusammen:

$$w(x) = w_S(x) + w_E(x) + w_L(x)$$

Diese werden in den folgenden Kapiteln bestimmt.

8.2.1 Schwingungseigenformen

Die Eigenfrequenzen und Eigenschwingungen der Biegung werden aus (8.8) bestimmt. Die allgemeine Lösung dieser DGL hat die Form

$$w(x) = A \sin(\lambda x) + B \cos(\lambda x) + C \sinh(\lambda x) + D \cosh(\lambda x) \quad (8.14)$$

Die Brücke besteht aus 3 Feldern, so daß für jedes Feld eine solche Lösung existiert:

$$\text{I. } w_1(x) = A_1 \sin(\lambda x) + B_1 \cos(\lambda x) + C_1 \sinh(\lambda x) + D_1 \cosh(\lambda x) \quad (8.15)$$

$$\text{II. } w_2(x) = A_2 \sin(\lambda(x - x_1)) + B_2 \cos(\lambda(x - x_1)) + C_2 \sinh(\lambda(x - x_1)) + D_2 \cosh(\lambda(x - x_1)) \quad (8.16)$$

$$\text{III. } w_3(x) = A_3 \sin(\lambda(x - x_2)) + B_3 \cos(\lambda(x - x_2)) + C_3 \sinh(\lambda(x - x_2)) + D_3 \cosh(\lambda(x - x_2)) \quad (8.17)$$

Diese 3 Gleichungen enthalten 13 Unbekannte: A_i, B_i, C_i, D_i ($i \in [1,3]$) und λ . Die 12 Rand- und Anschlußbedingungen lauten:

$$w_1(0) = 0 \quad (8.18)$$

$$w_1(x_1) = 0 \quad (8.19)$$

$$w_2(x_1) = 0 \quad (8.20)$$

$$w_2(x_2) = 0 \quad (8.21)$$

$$w_3(x_2) = 0 \quad (8.22)$$

$$w_3(x_3) = 0 \quad (8.23)$$

$$w_1'(x_1) = w_2'(x_1) \quad (8.24)$$

$$w_1''(x_1) = w_2''(x_1) \quad (8.25)$$

$$w_1'(x_2) = w_2'(x_2) \quad (8.26)$$

$$w_1''(x_2) = w_2''(x_2) \quad (8.27)$$

$$w_1''(0) = 0 \quad (8.28)$$

$$w_3''(x_3) = 0 \quad (8.29)$$

Aus 11 dieser Gleichungen erhält man bis auf einen Amplitudenfaktor alle A_i , B_i , C_i , D_i in Abhängigkeit von λ . Die 12. Gleichung ergibt eine Bestimmungsgleichung für λ , die im allgemeinen nur numerisch gelöst werden kann. Für die hier betrachtete Brücke ergeben sich folgende Werte:

$\lambda_3 = 0,0448 \text{ m}^{-1}$	$f_3 = 1,05 \text{ Hz}$	Grundschwingung
$\lambda_4 = 0,0611 \text{ m}^{-1}$	$f_4 = 1,96 \text{ Hz}$	
$\lambda_5 = 0,0661 \text{ m}^{-1}$	$f_5 = 2,30 \text{ Hz}$	
$\lambda_6 = 0,0863 \text{ m}^{-1}$	$f_6 = 3,91 \text{ Hz}$	
$\lambda_7 = 0,1127 \text{ m}^{-1}$	$f_7 = 6,68 \text{ Hz}$	
$\lambda_8 = 0,1196 \text{ m}^{-1}$	$f_8 = 7,52 \text{ Hz}$	
$\lambda_9 = 0,1293 \text{ m}^{-1}$	$f_9 = 8,79 \text{ Hz}$	
$\lambda_{10} = 0,1580 \text{ m}^{-1}$	$f_{10} = 13,1 \text{ Hz}$	
$\lambda_{11} = 0,1735 \text{ m}^{-1}$	$f_{11} = 15,8 \text{ Hz}$	
$\lambda_{12} = 0,1786 \text{ m}^{-1}$	$f_{12} = 16,7 \text{ Hz}$	
$\lambda_{13} = 0,1995 \text{ m}^{-1}$	$f_{13} = 20,9 \text{ Hz}$	
$\lambda_{14} = 0,2254 \text{ m}^{-1}$	$f_{14} = 26,7 \text{ Hz}$	
...	...	

wobei $f_i = \frac{\omega_i}{2\pi}$ die mit (8.7) aus λ berechneten Eigenfrequenzen sind. Dabei wurde

$$e = 3 \cdot 10^{-12} \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2} \quad \text{und}$$

$$q_B = 3 \cdot 10^5 \text{ N m}^{-1} \quad (8.30)$$

verwendet und die Dämpfung D vernachlässigt. Der Index von λ und f gibt die Anzahl der Halbwellen in der Schwingungseigenform an.

In Abbildung 8.2 sind die ersten 12 Eigenschwingungen aufgetragen, wobei die einzelnen Kurven jeweils um den Betrag der Frequenz nach oben verschoben und die Maximalwerte der Schwingungen auf 1 gesetzt wurden.

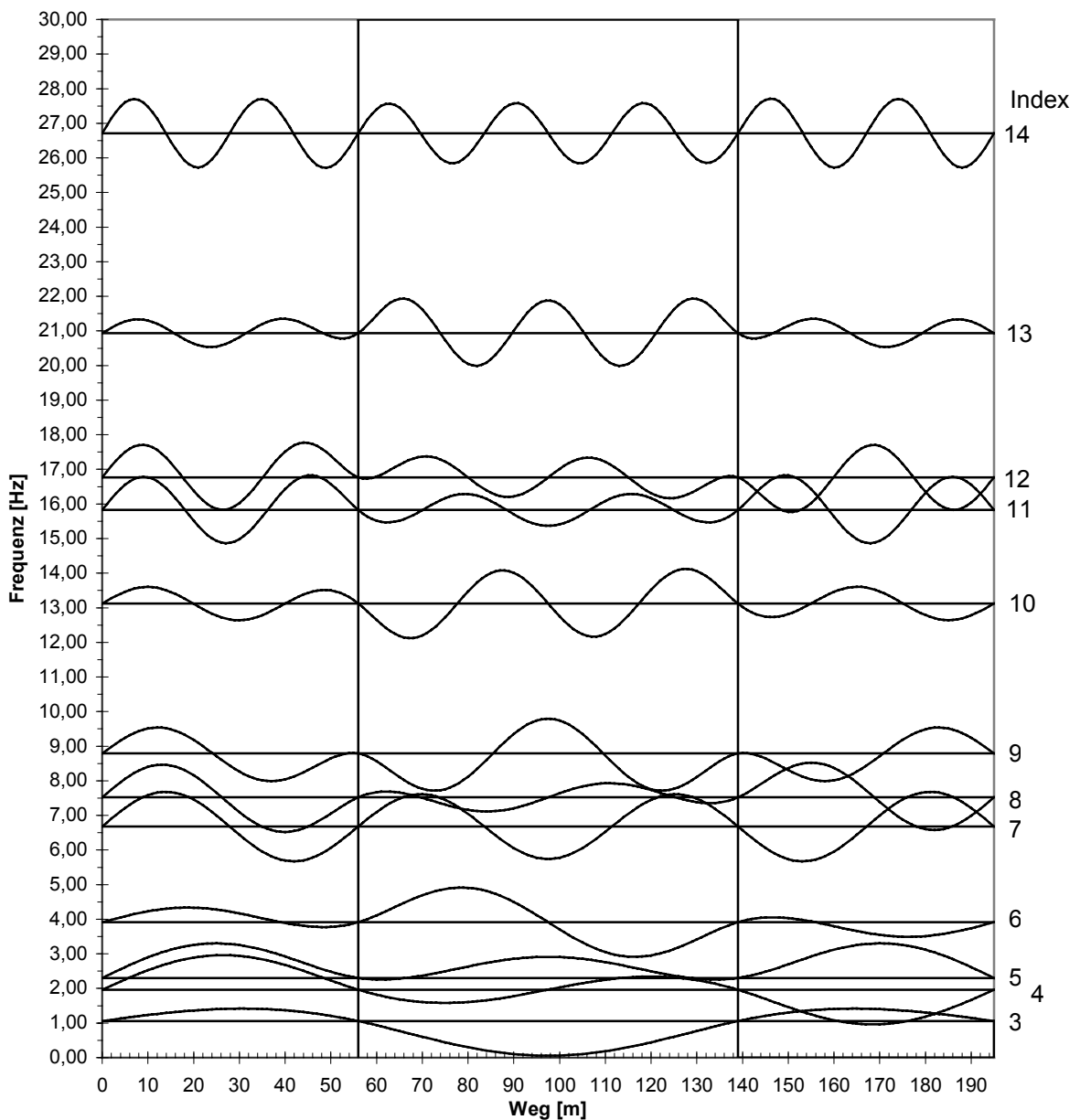


Abbildung 8.2: theoretisch bestimmte Eigenschwingungen der Biegungen der Vennebeckbrücke

Die relativen Amplituden in den Feldmitten sind in der folgenden Tabelle angegeben:

Index	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Feld I	0,36	1,00	0,98	0,31	-0,02	-0,21	-0,36	-0,46	-0,95	-0,90	-0,25	0,03
Feld II	-1,00	0,00	0,61	0,00	-0,94	0,00	1,00	0,00	-0,46	0,00	0,95	0,00
Feld III	0,36	-1,00	0,98	-0,31	-0,02	0,21	-0,36	0,46	-0,95	0,90	-0,25	-0,03

Tabelle 8.3: Relative Amplituden der Eigenschwingungen in den Feldmitten

8.2.2 Biegelinie der Brücke durch ihr Eigengewicht

Um die Durchbiegung der Brücke durch ihr Eigengewicht zu bestimmen, muß Gleichung (8.11) gelöst werden. Da die Brücke näherungsweise einen konstanten Querschnitt hat, kann $q_B(x) = q_B$ als konstant angenommen werden, so daß sich als allgemeine Lösung

$$w(x) = \frac{1}{24} e \cdot q_B \cdot x^4 + \frac{1}{6} a_3 \cdot x^3 + \frac{1}{2} a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0 \quad (8.31)$$

ergibt. Wieder gibt es für jedes der 3 Felder eine solche Lösung:

$$\text{I.} \quad w_1(x) = \frac{1}{24} e \cdot q_B \cdot x^4 + \frac{1}{6} a_3 \cdot x^3 + \frac{1}{2} a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0 \quad (8.32)$$

$$\text{II.} \quad w_2(x) = \frac{1}{24} e \cdot q_B \cdot (x - x_1)^4 + \frac{1}{6} b_3 \cdot (x - x_1)^3 + \frac{1}{2} b_2 \cdot (x - x_1)^2 + b_1 \cdot (x - x_1) + b_0 \quad (8.33)$$

$$\text{III.} \quad w_2(x) = \frac{1}{24} e \cdot q_B \cdot (x - x_2)^4 + \frac{1}{6} c_3 \cdot (x - x_2)^3 + \frac{1}{2} c_2 \cdot (x - x_2)^2 + c_1 \cdot (x - x_2) + c_0 \quad (8.34)$$

Die 12 Rand- und Anschlußbedingungen sind bereits in Kapitel 8.2.1 in Gleichungen (8.18)-(8.29) definiert, so daß damit die a_i , b_i und c_i bestimmt werden können, welche zu $e \cdot q_B$ proportional sind. Für die hier betrachtete Brücke mit $e \cdot q_B$ aus (8.30) ergeben sich

$a_0 = 0,000000 \text{ m}$	$b_0 = 0,000000 \text{ m}$	$c_0 = 0,000000 \text{ m}$
$a_1 = -2,237826$	$b_1 = -2,109947$	$c_1 = 2,109947$
$a_2 = 0,000000 \text{ m}^{-1}$	$b_2 = -0,465833 \text{ m}^{-1}$	$c_2 = -0,465833 \text{ m}^{-1}$
$a_3 = 0,016882 \text{ m}^{-2}$	$b_3 = 0,037350 \text{ m}^{-2}$	$c_3 = 0,033518 \text{ m}^{-2}$

Die so beschriebene Biegelinie ist in der folgenden Abbildung gezeigt.

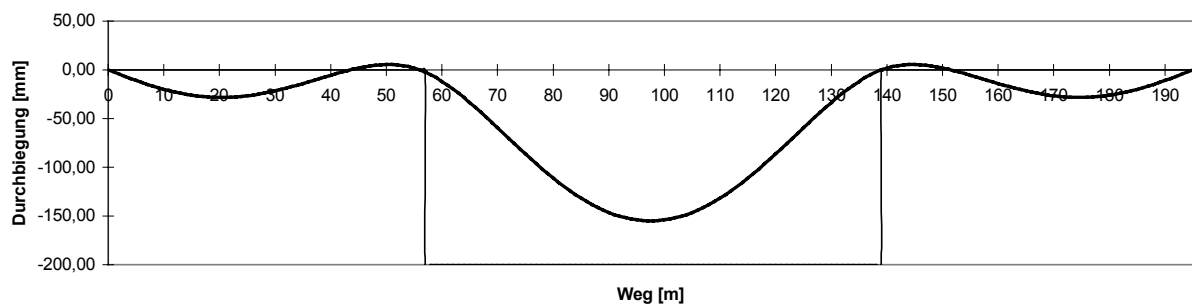


Abbildung 8.4: Durch das Eigengewicht verursachte Biegelinie der Vennebeckbrücke

Zur Kontrolle wurde diese Berechnung mit dem Programm STAB2D (Version 4) des Instituts für Statik der Universität Hannover (<http://www.statik.uni-hannover.de>) überprüft, wobei sich exakt dieselben Durchbiegungen ergaben.

8.2.3 Biegelinie der Brücke bei Belastung

Die Brückendeformation durch N diskrete Kräfte K_{L_i} an den Stellen x_{L_i} wird durch Gleichung (8.12) beschrieben. Da diese Gleichung linear ist, kann sie für jede Kraft einzeln gelöst werden, wobei die Summe der Einzellösungen die gesuchte Deformation ergibt. Zu lösen ist also die Gleichung

$$w^{(4)} = eK_L \cdot \delta(x - x_L) \quad , \quad (8.35)$$

welche die durch die Kraft K_L an der Stelle x_L hervorgerufene Deformation der Brücke beschreibt. Die allgemeine Lösung hat die Form

$$w(x) = \frac{1}{6}d_3 \cdot x^3 + \frac{1}{2}d_2 \cdot x^2 + d_1 \cdot x + d_0 \quad , \quad (8.36)$$

wobei an der Stelle $x = x_L$ die 3. Ableitung einen Sprung um $e \cdot K_L$ machen muß, wodurch dieses Feld in 2 Integrationsintervalle zerfällt. Es müssen 3 Fälle unterschieden werden, je nachdem, in welchem Feld die Kraft angreift. In jedem der Fälle müssen 4 Integrationsintervalle betrachtet werden, die im folgenden angegeben sind.

Fall 1: $x_0 < x_L < x_1$ Last auf Feld I

I: $x_0 < x < x_L$

II: $x_L < x < x_1$

III: $x_1 < x < x_2$

IV: $x_2 < x < x_3$

Fall 2: $x_1 < x_L < x_2$ Last auf Feld II

I: $x_0 < x < x_1$

II: $x_1 < x < x_L$

III: $x_L < x < x_2$

IV: $x_2 < x < x_3$

Fall 3: $x_2 < x_L < x_3$ Last auf Feld III

I: $x_0 < x < x_1$

II: $x_1 < x < x_2$

III: $x_2 < x < x_L$

IV: $x_L < x < x_3$

Die Rand- und Anschlußbedingungen sind analog zu denen in Kapitel 8.2.1 [Gleichungen (8.18)-(8.29)], allerdings kommen die Anschlußbedingungen an der Stelle x_L hinzu, die für den Fall 1 folgendermaßen lauten:

$$w_1(x_L) = w_2(x_L) \quad (8.37)$$

$$w_1'(x_L) = w_2'(x_L) \quad (8.38)$$

$$w_1''(x_L) = w_2''(x_L) \quad (8.39)$$

$$w_2'''(x_L) - w_1'''(x_L) = e \cdot K_L \quad (8.40)$$

Für die Fälle 2 und 3 gelten die entsprechenden Bedingungen.

Löst man diese 16 Gleichungen für jeden der 3 Fälle, so erhält man die Koeffizienten der Polynome in den 4 Integrationsintervallen in Abhängigkeit von x_L . Sie sind proportional zu $e \cdot K_L$.

Um die Deformation durch eine Einzellast zu erhalten, muß in Abhängigkeit von x_L der zutreffende Fall ausgewählt werden, bei dem dann die Biegelinie in den 4 Teilintervallen durch Polynome 3. Grades definiert wird. Die Biegelinie für eine Last von 120 t (z.B. eine Lok) an der Stelle $x_L = 28$ m ist in Abbildung 8.5 dargestellt.

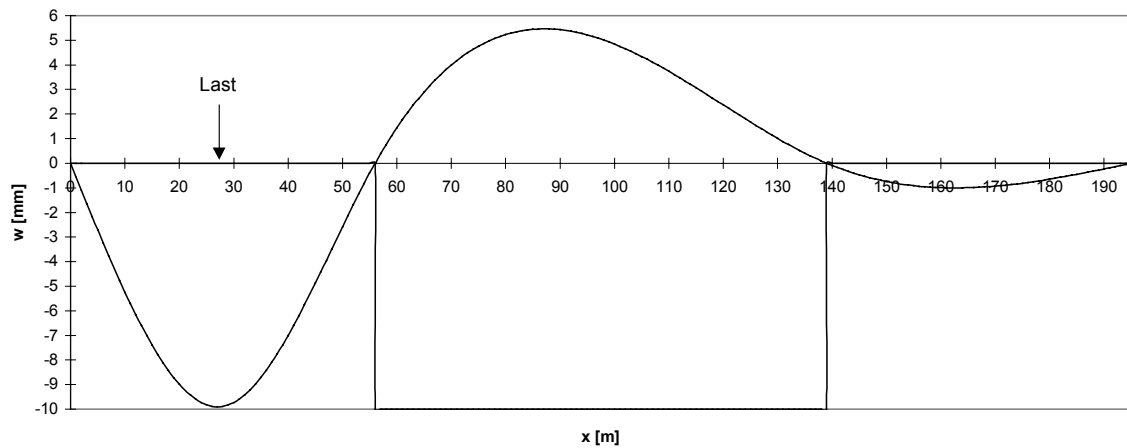


Abbildung 8.5: Deformation der Vennebeckbrücke durch eine Einzellast bei $x_L = 28$ m

Auch diese Berechnung wurde mit dem Programm STAB2D (Version 4) des Instituts für Statik der Universität Hannover verifiziert.

Soll die Deformation der Brücke durch die Belastung mit einem Zug bestimmt werden, so muß für jede Achse eine solche Biegelinie bestimmt werden. Die Summe dieser Biegelinien ergibt dann die gesuchte Deformation. Die Achslasten und Achsabstände des bei den Messungen verwendeten Meßzuges sind in Abbildung 8.6 aufgeführt.

	Kraft [kN]	Position [m]					
Lok:	193,0	0,00	2,25	4,50	9,60	11,85	14,10
Meßwagen:	120,0	19,25	21,75	38,25	40,75		
Wagen 1:	97,5	45,65	48,15	64,65	67,15		
Wagen 2:	97,5	72,05	74,55	91,05	93,55		
Wagen 3:	97,5	98,45	100,95	117,45	119,95		

Abbildung 8.6: Achslasten und Positionen der Achsen im Meßzug

Steht der so definierte Zug so auf der Brücke, daß die erste Achse der Lok bei $x = 28$ m ist, so ergibt sich die in Abbildung 8.7 gezeigte Biegelinie. Zusätzlich sind noch die Achspositionen und -lasten eingezeichnet.

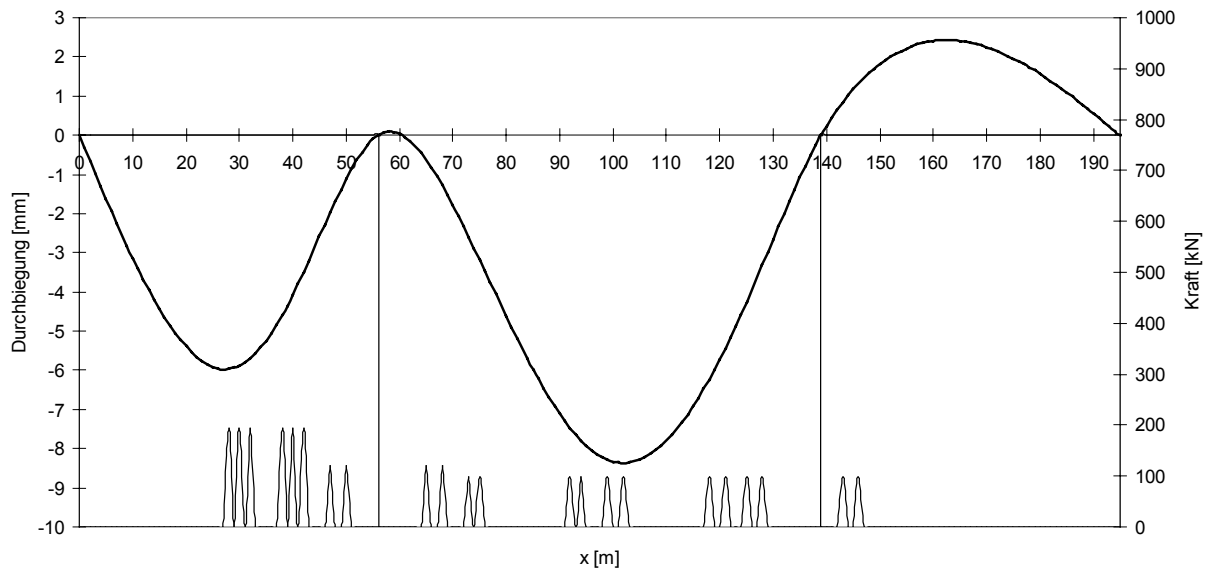


Abbildung 8.7: Deformation der Brücke bei Belastung durch den Meßzug an der Position $x_L = 28$ m

8.2.4 Deformation durch Zugüberfahrt

Im ersten Ansatz wurde folgende quasistatische Näherungslösung für die Überfahrt des Zuges verwendet:

Für jeden Zeitpunkt wird die Position des Zuges auf der Brücke bestimmt und mit dieser eine statische Biegelinie, wie in Abbildung 8.7 gezeigt, berechnet. Von dieser Biegelinie werden die Werte an den Meßpositionen $x = 28$ m, $x = 97,5$ m und $x = 167$ m genommen und über die Zeit aufgetragen. Es ergeben sich die in Abbildung 8.8 gezeigten Kurven, die einer simulierten Zugüberfahrt mit $v = 200$ km/h entsprechen. Diese können direkt mit den Meßwerten verglichen werden.

Da bereits dieser Ansatz eine sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Werten liefert, wurde auf ein aufwendigeres Berechnungsverfahren verzichtet.

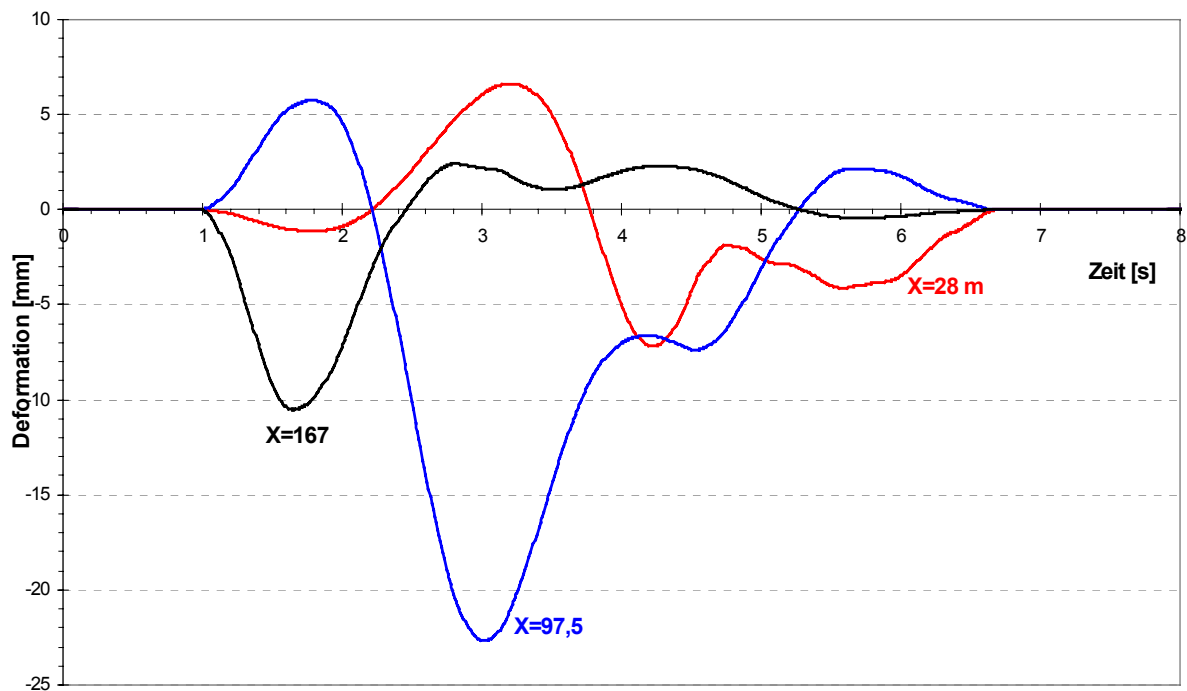


Abbildung 8.8: Simulation der Meßwerte bei einer Zugüberfahrt mit $v = 200$ km/h

Für eine einzelne Lok mit 4 Achsen (0,0 m; 2,8 m; 10,2 m; 13,0 m) á 210 kN ergibt sich die in Abbildung 8.9 dargestellte Bewegung. Die Kurve von Feld I ($x = 28$ m) hat eine sehr starke Ähnlichkeit mit Abbildung 8.5, d.h. die Biegelinie der Brücke hat die gleiche Form wie die an einer Stelle der Brücke gemessene Deformation über die Zeit. Diese Tatsache beschreibt der Maxwellsche Vertauschungssatz (Marguerre, 1967; Seite 46), der aussagt, daß die Deformation an der Stelle x bei Belastung an der Stelle x' gleich groß ist, wie die bei x' mit Belastung an der Stelle x . Die Ursache für diesen Satz liegt in der Vertauschbarkeit von x und x_L in Gleichung (8.35).

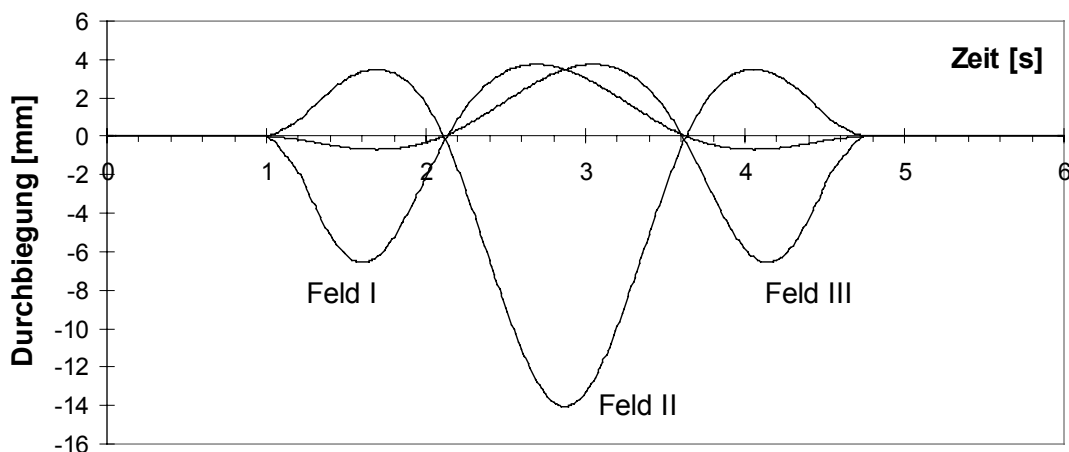


Abbildung 8.9: Simulation der Meßwerte bei der Überfahrt einer Lok mit $v = 200$ km/h in den 3 Feldmitten

8.3 Torsion

Wie bei der Biegung wird für die Torsion das Modell der Balkentheorie verwendet. Allerdings spielt hier das Querschnittsprofil eine bedeutende Rolle, denn die Torsion setzt sich aus 2 Anteilen zusammen, der Torsion der Fahrbahn und der durch die Hauptträger erzeugten Torsion. Letztere entsteht durch die unterschiedlich große Belastung der Hauptträger, wodurch die Brücke tordiert wird.

$$\varphi(x, t) = \varphi_H(x, t) + \varphi_F(x, t) \quad (8.41)$$

8.3.1 Torsionsanteil der Hauptträger

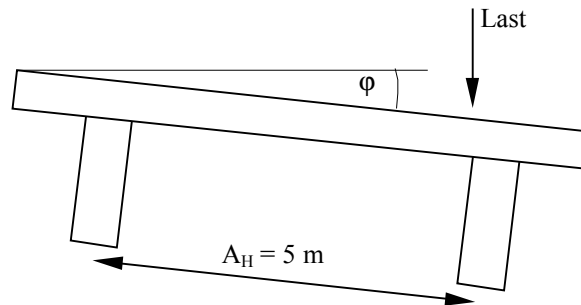


Abbildung 8.10: Querschnittsmodell für Torsionsberechnung

Da die Brücke zweigleisig ist, wird sie bei einer Zugüberfahrt unsymmetrisch belastet, wodurch sich unterschiedlich große Biegungen der beiden Hauptträger ergeben. Sind diese $w_1(x, t) = b_1 \cdot w(x, t)$ und $w_2(x, t) = b_2 \cdot w(x, t)$, so berechnet sich die dadurch erzeugte Torsion folgendermaßen:

$$\varphi_H(x, t) = \frac{w_1(x, t) - w_2(x, t)}{A_H} = \frac{b_1 - b_2}{A_H} \cdot w(x, t) = b_H \cdot w(x, t) \quad (8.42)$$

Dabei ist $w(x, t)$ die Standard-Biegekurve und b_H ein Proportionalitätsfaktor. Dieser Anteil der Torsion ist proportional zur Biegekurve, so daß die Torsion durch Belastungen und Zugüberfahrten direkt aus den oben angegebenen Kurven abgeleitet werden kann. Für diesen Torsionsanteil treten dieselben Eigenfrequenzen wie für die Biegeschwingungen auf.

8.3.2 Torsionsanteil der Fahrbahn

Auch hier wird als Modell für den Durchlaufträger ein Stab angenommen, für den nach Nowacki (1974) folgende Gleichungen gelten:

$$M'_t(x, t) = -T(x, t) \quad (8.43)$$

$$\tilde{\varphi}'_F(x, t) = \frac{1}{G(x) \cdot C(x)} M_t(x, t) \quad (8.44)$$

Darin bedeuten $M_t(x, t)$ die Torsionsmomente, $T(x, t)$ die Torsionslasten, $G(x)$ das Schubmodul, $C(x)$ das polare Trägheitsmoment und $\tilde{\varphi}_F(x, t)$ den Torsionswinkel.

Die auf eine Brücke wirkenden Torsionslasten sind

$$T(x, t) = \sum_{i=1}^N T_{L_i} \delta(x - x_{L_i}) - I_0 \cdot \ddot{\tilde{\varphi}}_F(x, t) + D_i \cdot \dot{\tilde{\varphi}}_F(x, t) \quad (8.45)$$

Die Summe entsteht durch die Torsionslasten, die nach (8.46) aus den Belastungskräften K_{L_i} an der Stelle x_{L_i} (z.B. Achslast) entstehen. Der zu $\ddot{\varphi}_F(x, t)$ proportionale Teil beschreibt die Trägheitskräfte, wodurch nach d'Alembert (Kröner, 1971) die statischen Gleichungen in dynamische übergehen. Der letzte Term enthält die Dämpfung der Torsion. Die durch Widerlager und Pfeiler wirkenden Torsionsmomente werden durch die Rand- und Anschlußbedingungen berücksichtigt.

$$T_{L_i} = \frac{1}{2} A_H \cdot K_{L_i} \quad (8.46)$$

Für die weiteren Betrachtungen soll angenommen werden, daß die Torsionssteifigkeit $G(x) \cdot C(x)$ unabhängig von x sei, so daß die Abkürzung

$$g = \frac{1}{G(x) \cdot C(x)} \quad (8.47)$$

eingeführt werden kann. Aus (8.43) bis (8.48) ergibt sich die Differentialgleichung

$$\ddot{\varphi}_F'' - g I_0 \ddot{\varphi}_F + g D_i \dot{\varphi}_F = -g \sum_{i=1}^N T_{L_i} \delta(x - x_{L_i}) \quad (8.48)$$

welche die statische und dynamische Torsion der Brücke beschreibt. Als Ansatz wird wieder eine harmonische zeitliche Schwingung $\tilde{\varphi}_F(x, t) = e^{i\omega t} \cdot \varphi_F(x)$ mit der Kreisfrequenz ω angenommen, wodurch sich aus (8.48) die DGL

$$e^{i\omega t} \cdot [\varphi_F'' + \lambda_i^2 \varphi_F] = -g \sum_{i=1}^N T_{L_i} \delta(x - x_{L_i}) \quad (8.49)$$

ergibt, wobei λ_i durch

$$\lambda_i^2 := g \cdot I_0 \cdot \omega^2 + i \cdot g \cdot D_i \cdot \omega \quad (8.50)$$

definiert wurde. Mit der Annahme, daß die durch die Laständerungen hervorgerufenen Torsionsbewegungen viel langsamer als die Eigenschwingungen der Brücke sind, kann die Zeitabhängigkeit von x_{L_i} als parametrisch angenommen werden, so daß die rechte Seite von (8.49) unabhängig von der Zeit ist, weshalb auch die linke Seite zeitunabhängig sein muß. Dies ist nur in den folgenden 2 Fällen erfüllt:

$$\text{a) } \varphi_F'' + \lambda_i^2 \cdot \varphi_F = 0 \quad (8.51)$$

Dies ist die homogene DGL, welche die Torsionsschwingungen der Brücke beschreibt.

$$\text{b) } \omega = 0$$

Damit wird $\lambda_i = 0$, und (8.49) geht über in die inhomogene DGL

$$\varphi_F'' = -g \sum_{i=1}^N T_{L_i} \delta(x - x_{L_i}) \quad (8.52)$$

Dies ist die Torsion durch die statischen Lasten.

Die Gesamttorsion der Brücke durch den Fahrbahnanteil setzt sich aus den Lösungen der Gleichungen (8.51) und (8.52) zusammen. Diese werden in den folgenden Kapiteln bestimmt.

8.3.2.1 Torsionsschwingungen

Die Eigenfrequenzen und Eigenschwingungen der Fahrbahntorsion werden aus (8.51) bestimmt. Die allgemeine Lösung dieser DGL hat die Form

$$\varphi_F(x) = A \sin(\lambda_l x) + B \cos(\lambda_l x) \quad (8.53)$$

Da die Torsionsschwingungen eines Feldes keine Auswirkungen auf die Schwingungen der anderen Felder haben, ergibt sich für jedes Feld eine unabhängige Schwingung.

Für Feld I müssen folgende Randbedingungen erfüllt sein:

$$\varphi_F(0) = 0 \quad (8.54)$$

$$\varphi_F(x_1) = 0 \quad (8.55)$$

Damit ergibt sich

$$\lambda_l = n \cdot \frac{\pi}{x_1} \quad n \in \mathbf{N} \quad (8.56)$$

Wird die Dämpfung wieder vernachlässigt ($D_t = 0$), so ergibt sich für die Eigenfrequenzen

$$f_l = \frac{1}{2x_1 \sqrt{gI_0}} n \quad (8.57)$$

Für die beiden anderen Felder ergeben sich analog

$$f_{II} = \frac{1}{2x_4 \sqrt{gI_0}} n \quad (8.58)$$

$$f_{III} = \frac{1}{2x_5 \sqrt{gI_0}} n \quad (8.59)$$

Für die hier betrachtete Brücke ergeben sich folgende Werte:

Feld I und III:

$$f_1 = 16,3 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 32,6 \text{ Hz}$$

$$f_3 = 48,9 \text{ Hz}$$

...

Feld II:

$$f_1 = 11,0 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 22,0 \text{ Hz}$$

$$f_3 = 33,0 \text{ Hz}$$

...

Dabei wurde $g I_0 = 3 \cdot 10^{-7} \text{ s}^2 \text{ m}^{-2}$ gesetzt.

Die Eigenfrequenzen der Torsion liegen deutlich höher als die der Biegeschwingung und sie sind äquidistant. Diese Eigenschaften stimmen mit den in Speier (1960) bestimmten überein, obwohl die Äquidistanz dort durch die Kopplung mit der Biegeschwingung gestört wird.

8.3.2.2 Torsion durch Belastung

Die Brückendeformation durch N diskrete Torsionsmomente T_{L_i} an den Stellen x_{L_i} wird durch Gleichung (8.52) beschrieben. Da diese Gleichung linear ist, kann sie für jedes Torsionsmoment einzeln gelöst werden, wobei die Summe der Einzellösungen die gesuchte Torsion ergibt. Zu lösen ist also die Gleichung

$$\varphi_F'' = -g \cdot T_L \cdot \delta(x - x_L) \quad (8.60)$$

welche die durch das Torsionsmoment T_L an der Stelle x_L hervorgerufene Torsion der Brücke beschreibt. Die allgemeine Lösung hat die Form

$$\varphi_F(x) = a \cdot x + b \quad (8.61)$$

Die Torsion ist nur auf dem Feld ungleich Null, auf dem das Torsionsmoment angreift, so daß im folgenden nur ein Feld betrachtet werden muß. Geht dieses von x_a bis x_b mit der Torsionslast an der Stelle x_L , so zerfällt es in die Teilintervalle

$$\text{I} \quad x_a < x < x_L \quad \varphi_{F,1}(x) = a_1 \cdot (x - x_a) + b_1 \quad (8.62)$$

$$\text{II} \quad x_L < x < x_b \quad \varphi_{F,2}(x) = a_2 \cdot (x - x_L) + b_2 \quad (8.63)$$

Die Rand- und Anschlußbedingungen sind

$$\varphi_{F,1}(x_a) = 0 \quad (8.64)$$

$$\varphi_{F,2}(x_b) = 0 \quad (8.65)$$

$$\varphi_{F,1}(x_L) = \varphi_{F,2}(x_L) \quad (8.66)$$

$$\varphi'_{F,2}(x_L) - \varphi'_{F,1}(x_L) = -g \cdot T_L \quad (8.67)$$

Aus (8.62) bis (8.67) ergibt sich

$$a_1 = gT_L \frac{x_L - x_b}{x_a - x_b} \quad a_2 = gT_L \frac{x_L - x_a}{x_a - x_b} \quad (8.68)$$

$$b_1 = 0 \quad b_2 = gT_L \frac{(x_L - x_a)(x_L - x_b)}{x_a - x_b}$$

Damit ist die Torsion an der Stelle x gegeben durch:

$$\varphi_F(x, x_L) = \begin{cases} \frac{gT_L}{x_a - x_b} (x - x_a)(x_L - x_b) & x < x_L \\ \frac{gT_L}{x_a - x_b} (x_L - x_a)(x - x_b) & x > x_L \end{cases} \quad (8.69)$$

Auch in dieser Gleichung können x und x_L vertauscht werden, ohne daß sie sich ändert. Darin kommt wieder der Maxwell'sche Vertauschungssatz zum Ausdruck. Die Torsion in der Feldmitte $x = \frac{1}{2}(x_a + x_b)$ ergibt sich zu

$$\varphi_F(x_L) = \begin{cases} \frac{gT_L}{2} (x_L - x_a) & x_L < \frac{1}{2}(x_a + x_b) \\ \frac{gT_L}{2} (x_b - x_L) & x_L > \frac{1}{2}(x_a + x_b) \end{cases} \quad (8.70)$$

Diese Funktion ist in Abbildung 8.11 dargestellt.

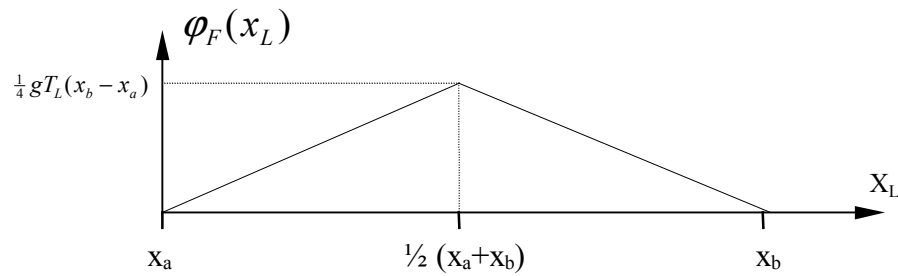


Abbildung 8.11: Torsion der Fahrbahn in Feldmitte durch eine Torsionslast an der Stelle x_L

Bewegt sich eine Einzellast über die Brücke, so nimmt die Torsion der Fahrbahn bis zur Feldmitte linear zu und anschließend wieder ab. Der dabei erreichte Maximalwert ist proportional zur Länge der Brücke und zum angreifenden Torsionsmoment.

8.3.3 Torsion bei Einzellast

Nach (8.41) ergibt sich die Gesamttorsion aus den beiden Anteilen

$$\varphi(x, t) = \varphi_H(x, t) + \varphi_F(x, t) .$$

Die in den beiden Anteilen auftretenden Proportionalitätsfaktoren können aus der Geometrie und den Materialeigenschaften des Bauwerks abgeleitet werden. Hier wurden sie aus den Meßwerten bestimmt. Die Torsion für eine Last von 120 t (Lok) an der Stelle $x_L = 28 \text{ m}$ $y_L = 2,5 \text{ m}$ ist in Abbildung 8.12 dargestellt. Neben der Gesamttorsion sind die Anteile der Fahrbahn und der Hauptträger eingetragen.

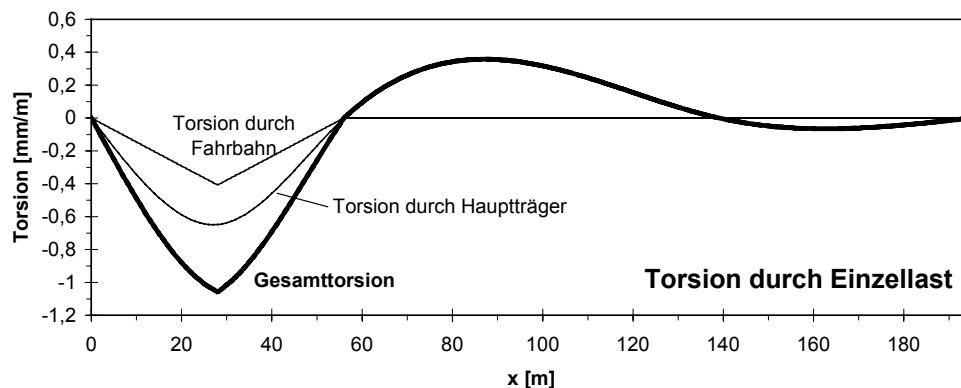


Abbildung 8.12: Torsion der Vennebeckbrücke durch eine Torsionslast bei $x_L = 28 \text{ m}$

Die vom Meßzug erzeugte Torsion setzt sich aus 22 Einzellasten zusammen: sie ist in Abbildung 8.13 dargestellt. Die Lok steht an der Stelle $x_L = x_1/2$. Neben der Gesamttorsion sind die Anteile der Fahrbahn und der Hauptträger eingetragen. Außerdem ist im unteren Teil die Verteilung der Achslasten dargestellt.

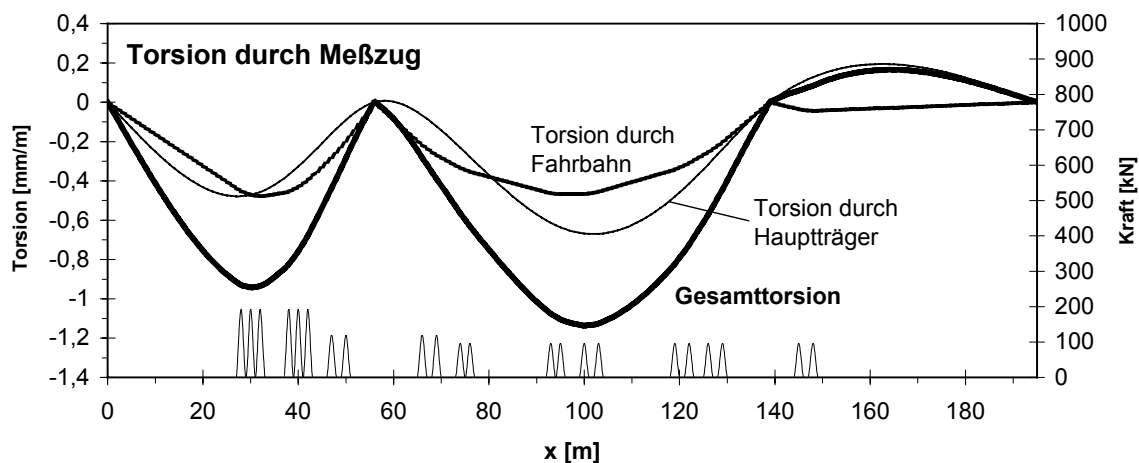


Abbildung 8.13: Torsion durch Meßzug, Lok bei $x = 28$ m

8.3.4 Torsion durch Zugüberfahrt

Um die Überfahrt zu simulieren, wird für jeden Zeitpunkt die Position des Zuges bestimmt, daraus die statische Torsionskurve (wie im vorigen Kapitel beschrieben) berechnet und von dieser die Werte an den 3 Meßstellen bestimmt. Diese Wertefolge liefert die zeitliche Entwicklung der Torsion in den 3 Feldmitten und ist in den folgenden Abbildungen dargestellt. Der direkte Vergleich mit den Meßwerten ist in Kapitel 9 gezeigt.

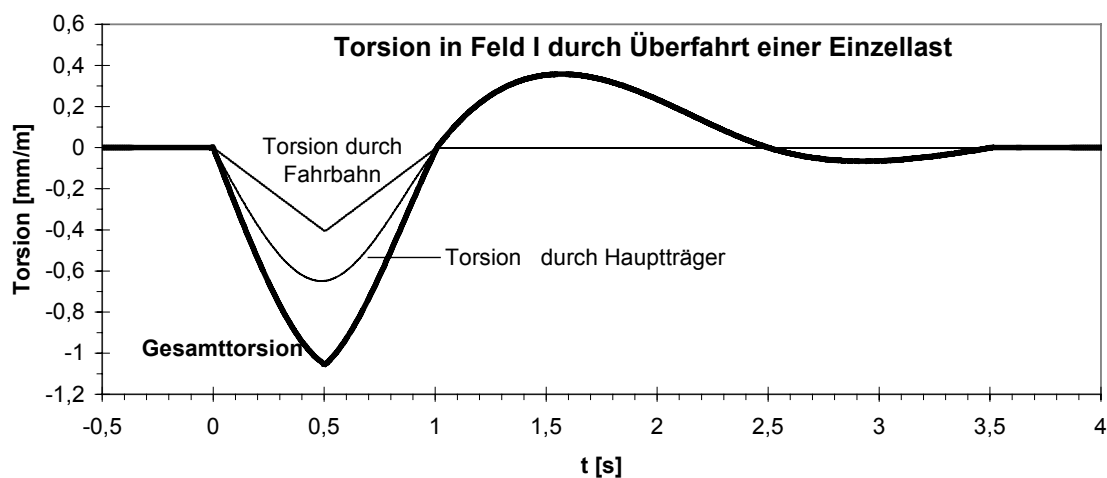


Abbildung 8.14: Berechnete Torsion in Feld I bei der Überfahrt einer Einzellast mit $v = 200$ km/h

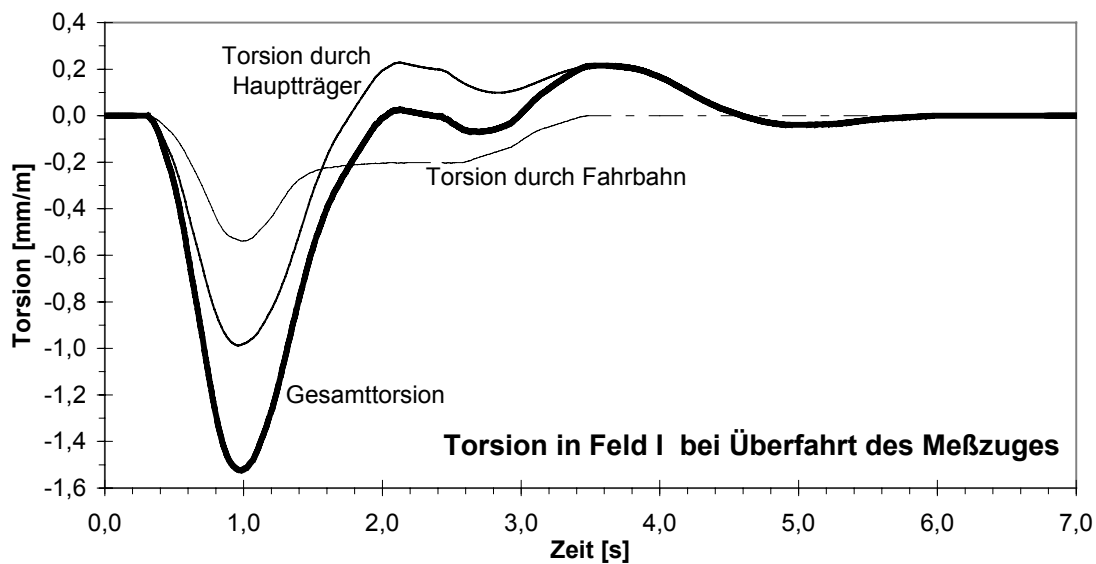


Abbildung 8.15: Berechnete Torsion in Feld I bei der Überfahrt des Meßzuges mit $v = 200$ km/h

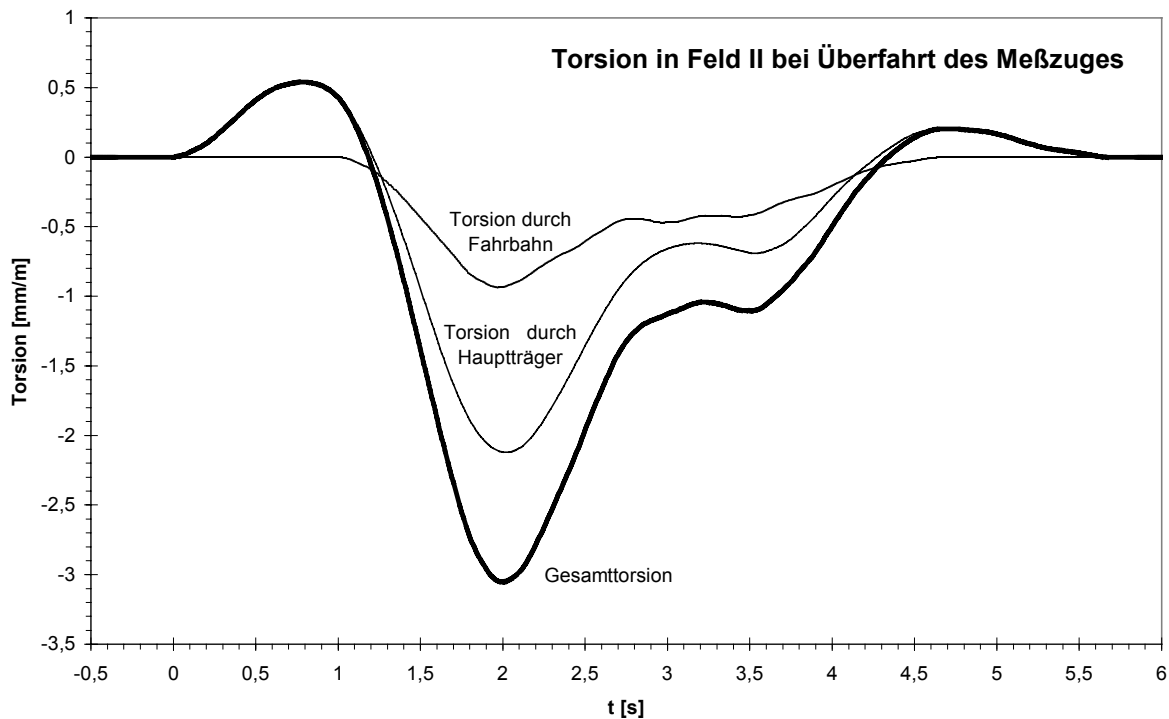


Abbildung 8.16: Berechnete Torsion in Feld II bei der Überfahrt des Meßzuges mit $v = 200$ km/h

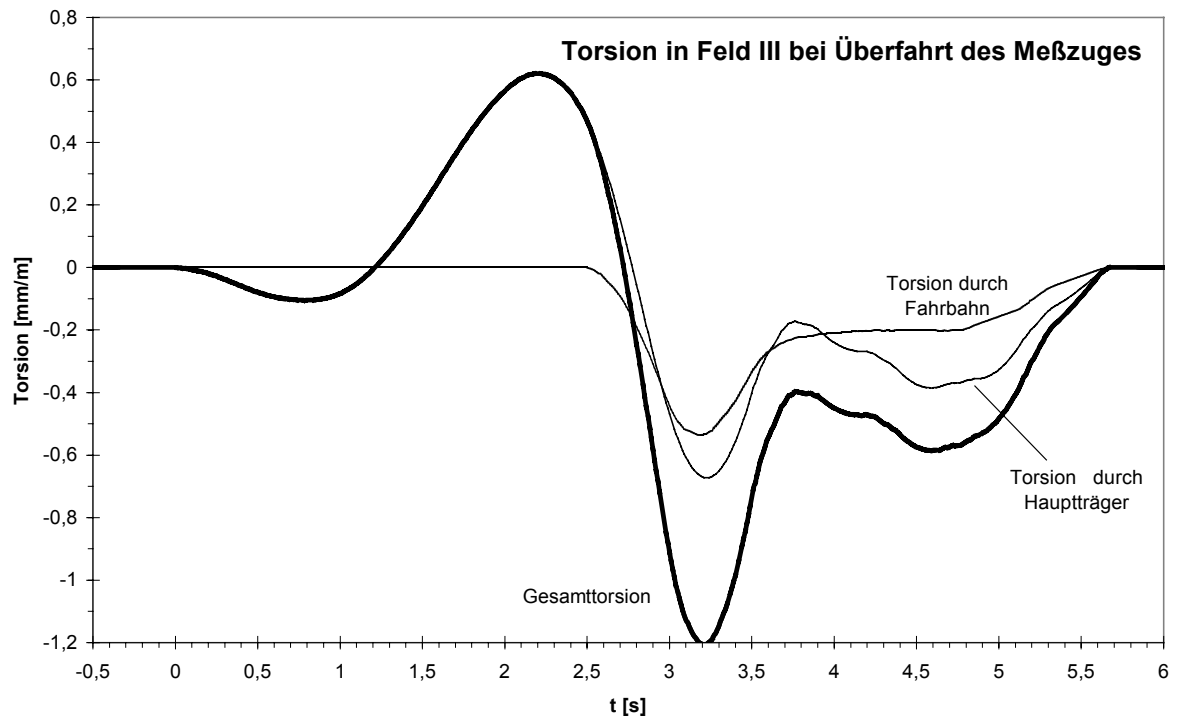


Abbildung 8.17: Berechnete Torsion in Feld III bei der Überfahrt des Meßzuges mit $v = 200$ km/h

9 Auswertung der Messung und Vergleich mit Theorie

9.1 Zeitsynchronisation

Das gesamte Datenerfassungssystem bestand aus 5 unabhängigen Meßsystemen (4 Videorecorder und das zentrale Datenerfassungssystem [ZDES]), die nur durch das gemeinsame Zeitsynchronsignal verbunden waren. Da die Bildfrequenz eines Videorecorders nicht exakt 25 Hz entspricht, sondern von Gerät zu Gerät etwas variiert, waren 5 verschiedene Abtastraten zu synchronisieren. Die Meßfrequenz des zentralen Datenerfassungssystems wurde durch einen internen Quarz auf 100 Hz stabilisiert, so daß sie als konstant angenommen werden konnte.

Aus dem Signal der Lichtschranke bzw. des Dehnungsmeßstreifens konnte für jede Achse der Zeitpunkt bestimmt werden, an dem sie die Brückenmitte passiert hat. Aus diesen Zeiten und der Geometrie des Meßzuges konnte dessen Geschwindigkeit und damit der Zeitpunkt bestimmt werden, an dem die erste Achse der Lok das Widerlager an Feld III passierte. Siehe Kapitel 7.2.2.5 "Bestimmung der Zugposition".

Dieser Zeitpunkt wurde bei jeder Messung als $t = 0$ s definiert. Zusammen mit der Abtastrate des ZDES von 100 Hz war damit der Zeitpunkt für jedes vom ZDES gemessene Ereignis festgelegt.

Um die von den anderen Meßsystemen (Videorecorder) gemessenen Werte auf die gleiche Zeitskala umrechnen zu können, wurden im ZDES folgende Zeitpunkte bestimmt:

- Zeitpunkt des Startimpulses des letzten Zeitcodes direkt vor der Überfahrt des Meßzuges
- Zeitpunkt des Startimpulses des letzten Zeitcodes direkt nach der Überfahrt des Meßzuges

Die Zeit-Offsets und Abtastraten der von den Videorecordern gemessenen Daten wurden jetzt so gewählt, daß die Zeiten der entsprechenden Startimpulse des dortigen Zeitsynchronsignals mit den oben bestimmten übereinstimmten.

Damit konnte jedem Meßwert ein eindeutiger Zeitpunkt auf einer gemeinsamen Zeitskala zugeordnet werden.

9.2 Deformationsmessungen während Zugüberfahrt

9.2.1 Auswertung der Videodaten

Aus den mit den Kameras beobachteten Bewegungen der Zieltafeln mußte im Labor die Deformation der Brücke bestimmt werden. Dazu wurde die in Abbildung 9.1 gezeigte Schaltung verwendet.

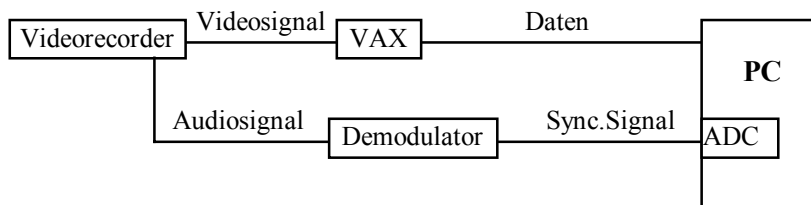


Abbildung 9.1: Auswertung der Videobilder

Die Videokassette wurde in einem S-VHS-Recorder abgespielt, der sein Videosignal an eine in einer VAX installierten Bildverarbeitungskarte lieferte. Dort wurde die Bildfolge von Zieltafeln durch ein Bildauswerteprogramm analysiert, wobei jedes Videobild in mehreren Spalten nach

horizontalen Schwarz-Weiß-Übergängen (Kanten) abgesucht und die Pixelkoordinaten dieser Übergänge gemittelt wurden. Da immer alle Kanten im Bild zu sehen waren und diese die Vertikalbewegung der Brücke mitmachten, lieferte dieser Mittelwert eine Größe, die direkt der Durchbiegung proportional war. Die Skalierung wurde dadurch erreicht, daß der mittlere Abstand der Übergänge berechnet und mit der bekannten Streifenbreite von 40 mm verglichen wurde. Dadurch wurde auch der Betrachtungswinkel von ca. 9 Gon berücksichtigt. Die so errechnete Durchbiegung wurde Online an einen PC übertragen, der die erhaltenen Werte abspeicherte, wobei zusätzlich das vom Audiosignal des Videorecorders über einen Demodulator erhaltene Zeitsynchronsignal gespeichert wurde.

Der Offset der Deformation wurde so festgelegt, daß der Mittelwert über ca. 50 Messungen bei unbelasteter Brücke eine Deformation von 0 mm ergab. Die Festlegung der Abtastrate und des Zeitnullpunktes wurde wie in Kapitel 9.1 beschrieben vorgenommen.

Jede Zieltafel wurde von 2 Kameras aufgenommen, so daß die Deformation jedes Hauptträgers doppelt vorlag. Um die Genauigkeit zu erhöhen, war es wünschenswert, die beiden Signale zu mitteln. Dies war allerdings nicht ohne weiteres möglich, da verschiedene Abtastraten vorlagen, so daß die einzelnen Meßzeitpunkte einander nicht direkt zugeordnet werden konnten. Um dieses Problem zu beheben und auch Vergleiche mit den vom ZDES gemessenen Daten zu ermöglichen, wurden die Signale auf die einheitliche Abtastrate von 100 Hz umgerechnet.

Dies wurde erreicht, indem die von den Kameras erhaltenen Meßwerte durch einen Akima-Spline (Hilberg, 1989; Akima, 1970) interpoliert und diese Kurven dann mit 100 Hz abgetastet wurden. Die so erhaltenen Daten wurden gemittelt und ergaben die Deformation der beiden Hauptträger im Feld II, welche in Abbildung 9.2 dargestellt sind.

Der Rauschanteil bei diesen Messungen war so gering, daß auf eine Filterung verzichtet werden konnte.

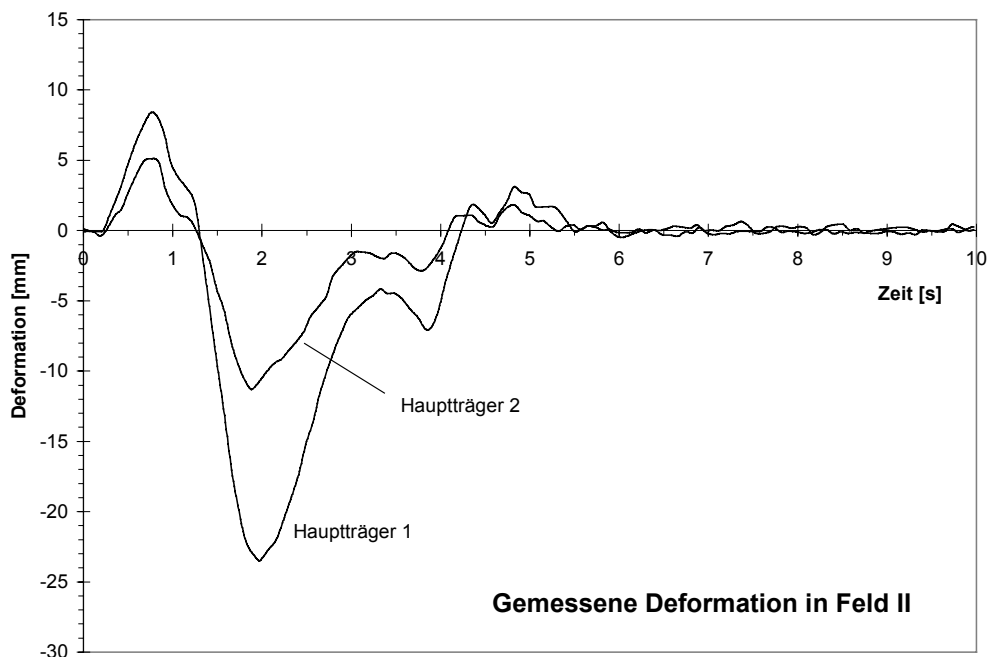


Abbildung 9.2: Gemessene Deformation der beiden Hauptträger in Feld II während der Überfahrt des Meßzuges mit $v = 200$ km/h bei unbelastetem Nebengleis

Durch die redundante Messung mit 2 Kameras bestand die Möglichkeit, die Genauigkeit der Messungen abschätzen zu können. Der Vergleich des Signals einer Kamera mit dem Mittelwert lieferte eine Standardabweichung von ca. 0,2 mm. Diesen Wert erhält man auch, wenn man die

Standardabweichung der Meßwerte bei unbelasteter Brücke bestimmt. Werden noch andere Fehlerquellen wie systematische Fehler berücksichtigt, so liegt die Genauigkeit bei 0,4 mm.

9.2.2 Auswertung der Wegaufnehmerdaten

Die von den Wegaufnehmern gemessenen Deformationen lagen schon in digitaler Form vor, so daß gleich wie in Kapitel 9.1 beschrieben, der Zeitnullpunkt festgelegt werden konnte. Der Offset wurde, wie bei den Videosignalen, so festgelegt, daß die unbelastete Brücke eine Deformation von 0 mm ergab. Der Skalenfaktor wurde wie in Kapitel 7.3.1 beschrieben bestimmt.

Da bei diesen Messungen zum Teil starke Einstreuungen (hervorgerufen durch das Starkstromnetz der Bahn) im Frequenzbereich um $16 \frac{2}{3}$ Hz auftraten, wurden die so skalierten Daten mit einem digitalen Tiefpaß 2. Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 5 Hz gefiltert (IIR-Filter, siehe Kapitel 3.4.3). Dadurch konnten die Störungen weitgehend unterdrückt werden, ohne daß dabei wesentliche Informationen über die Bewegung der Brücke verloren gingen.

Die mit den Wegaufnehmern in den Randfeldern gemessenen Deformationen der beiden Hauptträger während der Überfahrt des Meßzuges mit $v = 200$ km/h sind in Abbildung 9.3 und Abbildung 9.4 dargestellt.

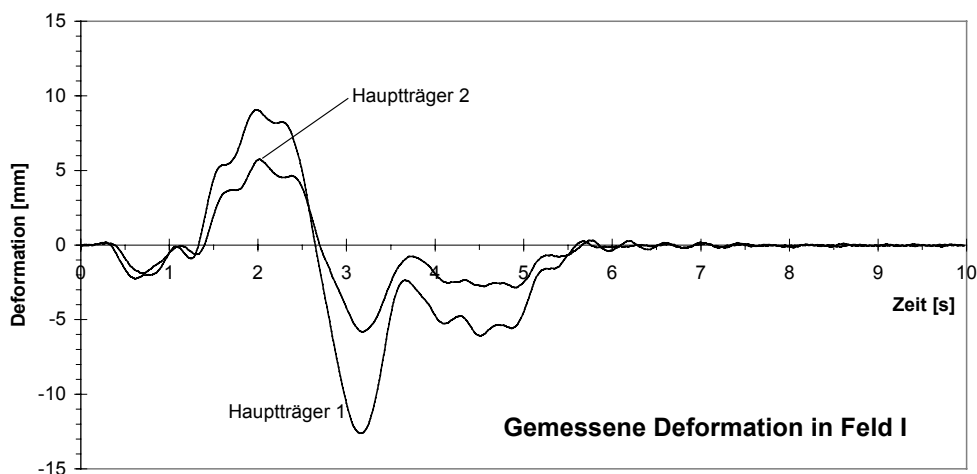


Abbildung 9.3: Gemessene Deformation der beiden Hauptträger in Feld I während der Überfahrt des Meßzuges mit $v = 200$ km/h bei unbelastetem Nebengleis

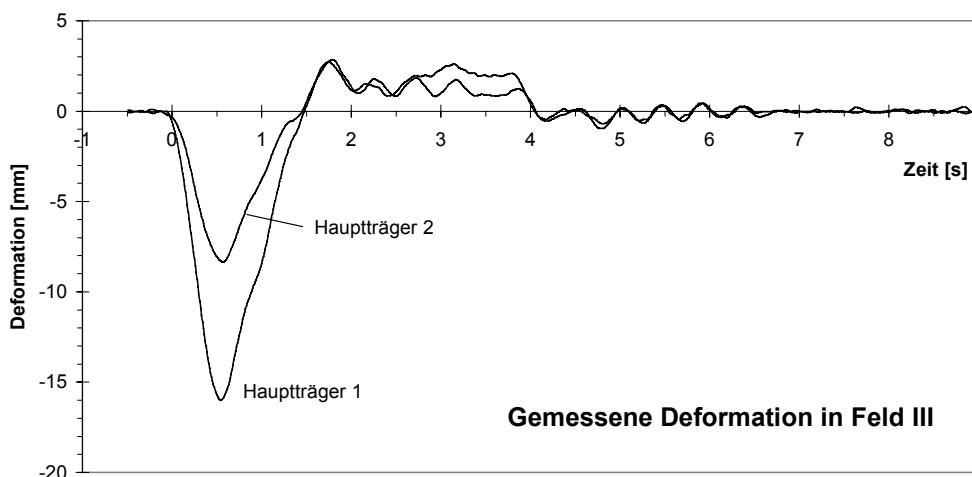


Abbildung 9.4: Gemessene Deformation der beiden Hauptträger in Feld III während der Überfahrt des Meßzuges mit $v = 200$ km/h bei unbelastetem Nebengleis

Die Genauigkeit der Messungen kann aus der Standardabweichung der unbelasteten Brücke abgeleitet werden. Bei den Wegaufnehmermessungen liegt diese um 0,1 mm, so daß bei Berücksichtigung von systematischen Fehlern eine Genauigkeit von 0,2 mm erreicht wird.

9.2.3 Deformation der Brücke

Die oben bestimmten Datensätze enthalten die Durchbiegungen der beiden Hauptträger in allen 3 Feldern. Die Deformation der Brücke besteht aus einer mittleren Biegung und einer Torsion, die durch die unsymmetrische Belastung der Brücke hervorgerufen wird. Werden die Signale der beiden Hauptträger mit $H1$ und $H2$ bezeichnet, so ergibt sich für die

$$\text{mittlere Biegung: } d = \frac{H1 + H2}{2}, \quad (9.1)$$

$$\text{und für die Torsion } \varphi \approx \tan \varphi = \frac{H1 - H2}{A}, \quad (\text{für kleine Torsionen}) \quad (9.2)$$

wobei $A = 5$ m der Abstand der Hauptträger ist. Die gemessenen Biegungen und Torsionen sind in Kapitel 9.3 zusammen mit den berechneten Kurven dargestellt und werden dort auch diskutiert.

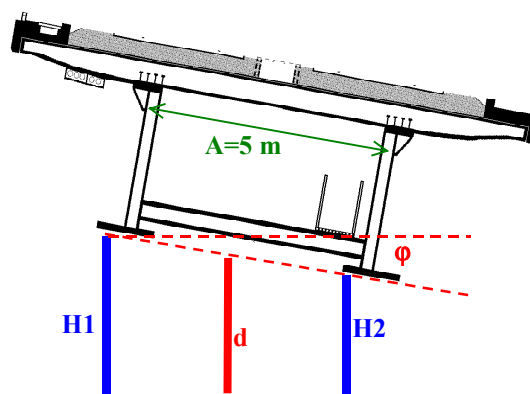


Abbildung 9.5: Bestimmung der Biegung und Torsion aus den Hauptträgerbiegungen

9.3 Ergebnisse der Deformationsmessungen und Vergleich mit der Theorie

In diesem Kapitel werden die Meßergebnisse dargestellt, diskutiert und mit den theoretisch berechneten Kurven verglichen. Von den 10 durchgeführten Meßfahrten wurde exemplarisch die Messung ausgesucht, bei der das Nebengleis unbelastet war und der Meßzug mit einer Geschwindigkeit von 200 km/h über die Brücke fuhr. Die Ergebnisse der anderen Messungen sehen qualitativ gleich aus, so daß hier auf eine Darstellung verzichtet wird. Es gibt nur zwei Unterschiede: zum einen werden die Kurven bei langsameren Geschwindigkeiten entlang der Zeitachse gedehnt, zum anderen tritt bei der Biegung durch ein belastetes Nebengleis ein Offset auf.

In allen Diagrammen ist neben der gemessenen auch die theoretisch berechnete Kurve dargestellt (dicke Linie). In den meisten Fällen stimmen Messung und Theorie sehr gut überein. Dies zeigt, daß das doch relativ einfache Modell für die qualitative Modellierung der Bewegung ausreicht.

Dies ist eine der wesentlichen Aussagen dieser Arbeit.

Bei der Erstellung des Modells wurden folgende Annahmen getroffen:

1. Die Querschnittsform der Brücke ist konstant, d.h. unabhängig von x . Diese Annahme ist nicht exakt richtig, da sich die Höhe der Hauptträger zu den Pfeilern hin leicht vergrößert.
2. Elastizitätsmodul und Schubmodul sind unabhängig von x . Auch diese Annahme ist sicher nicht exakt erfüllt.
3. Es gilt das Hooksche Gesetz. Dies kann bei den kleinen Verformungen als richtig angenommen werden.
4. Bei der Berechnung der Biegung wird die Schubverformung vernachlässigt. Dies ist bei langen Objekten wie einer Brücke möglich.
5. Die Dämpfung wird vernachlässigt. Auf die Deformation durch den fahrenden Zug hat dies praktisch keinen Einfluß, die Eigenfrequenzen liegen dadurch etwas höher.
6. Es gilt die Bernoullische Annahme: Die zur unverformten Balkenachse normalen Querschnitte bleiben auch nach der Verformung eben und normal zur verformten Balkenachse.
7. Die Geschwindigkeit des Zuges ist konstant.

9.3.1 Biegung

Die Biegekurve der Brücke wurde aus den Biegungen der beiden Hauptträger nach Gleichung (9.1) berechnet. Die Biegung in den Seitenfeldern I und III stimmt sehr gut mit der Theorie überein, wohingegen im Mittelfeld die Theorie eine um 9 mm größere maximale Durchbiegung vorhersagt. Diese große Abweichung ist kein Meßfehler, sondern liegt in den zu starken Vereinfachungen des Modells. So wurde im Mittelfeld trotz eines anderen Querschnittes dieselbe Biegesteifigkeit EI wie in den Randfeldern angenommen, wodurch sich die maximale Durchbiegung stark ändern kann, da diese direkt proportional zu EI ist.

Die Messungen enthalten zusätzlich eine durch den Zug angeregte erzwungene Schwingung mit einer Frequenz von ca. 2 Hz. Diese ist in Feld 3 besonders deutlich zu erkennen.

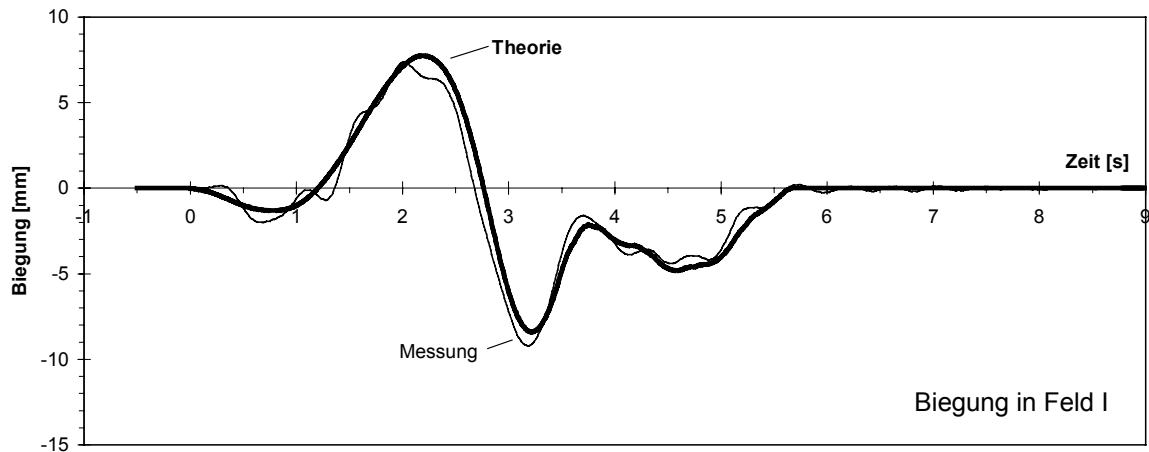


Abbildung 9.6: Biegung der Brücke in Feld I bei Überfahrt des Meßzuges mit 200 km/h und unbelastetem Nebengleis

Die Hauptbiegung wird durch die Lok erzeugt, da diese dreimal so schwer wie die Wagen ist und diese Last zudem noch stärker lokalisiert ist. Während die Lok auf Feld III auffährt (0 s bis 1,2 s) biegt sich dieses nach unten, das mittlere wird angehoben und das erste wieder abgesenkt. Im Bereich (1,2 s bis 2,8 s) fährt sie auf das mittlere Feld, so daß Feld I angehoben wird. Von 2,8 s bis 3,6 s ist sie auf dem Meßfeld, wodurch dieses abgesenkt wird. Bis zum Zeitpunkt 5,6 s sind nur noch die Wagen auf dem Feld, wodurch dieses noch etwas nach unten gedrückt wird.

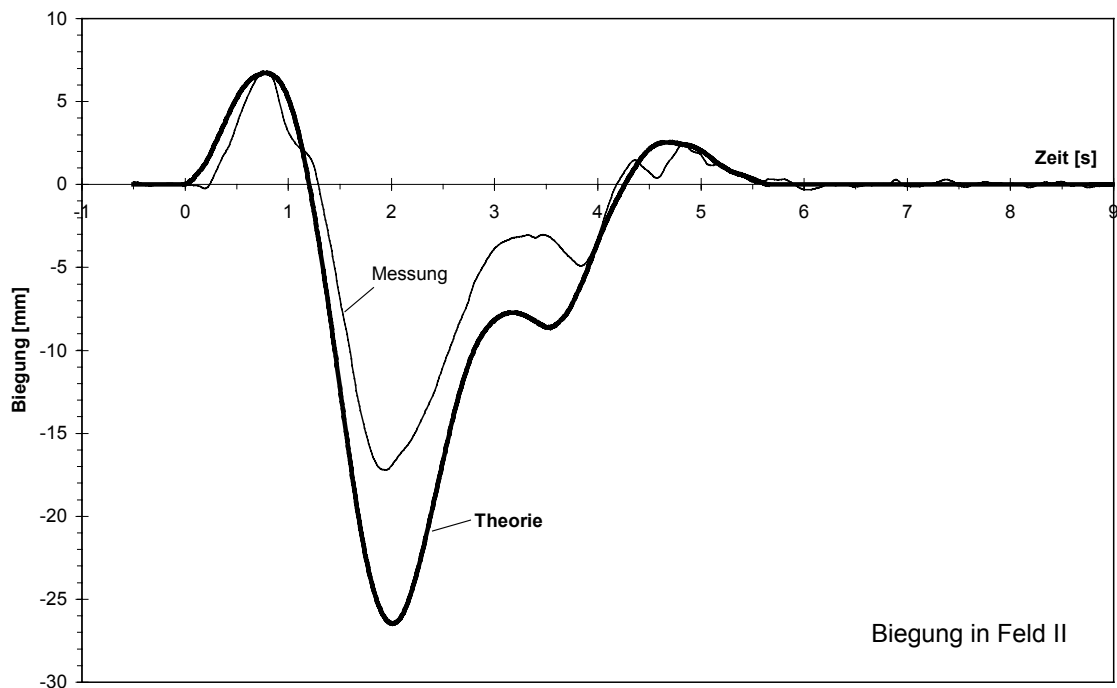


Abbildung 9.7: Biegung der Brücke in Feld II bei Überfahrt des Meßzuges mit 200 km/h und unbelastetem Nebengleis

Während die Lok auf Feld III auffährt, wird das Mittelfeld angehoben (0 s bis 1,2 s); wenn sie anschließend (1,2 s bis 3 s) auf das Mittelfeld kommt, wird dieses stark abgesenkt. In der Phase von 3 s bis 4 s ist die Lok auf Feld I, wodurch Feld II angehoben wird; allerdings sind die

Wagen noch direkt über der Meßstelle und bewegen die Brücke dort nach unten. Erst ab 4 s sind nur noch die Wagen auf Feld I, wodurch das Mittelfeld angehoben wird.

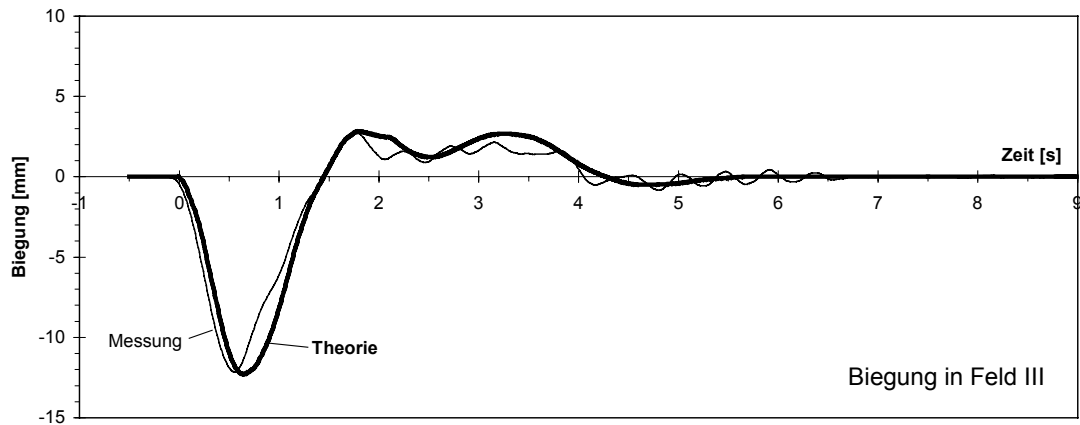


Abbildung 9.8: Biegung der Brücke in Feld III bei Überfahrt des Meßzuges mit 200 km/h und unbelastetem Nebengleis

Die Lok fährt sofort auf das Meßfeld III, wodurch sich dieses die ersten 1,4 Sekunden absenkt. Anschließend sind die Wagen auf Feld III, was aber durch die von der Lok auf Feld II erzeugten Anhebung überkompensiert wird.

9.3.2 Torsion

Die Torsion der Brücke wurde aus den Biegungen der beiden Hauptträger nach Gleichung (9.2) berechnet. Die Torsion stimmt in allen Feldern sehr gut mit der Theorie überein. Die größten Abweichungen rühren von einer erzwungenen Schwingung mit einer Frequenz von etwa 2,5 Hz her, die durch die Folge der Zugachsen angeregt wurde.

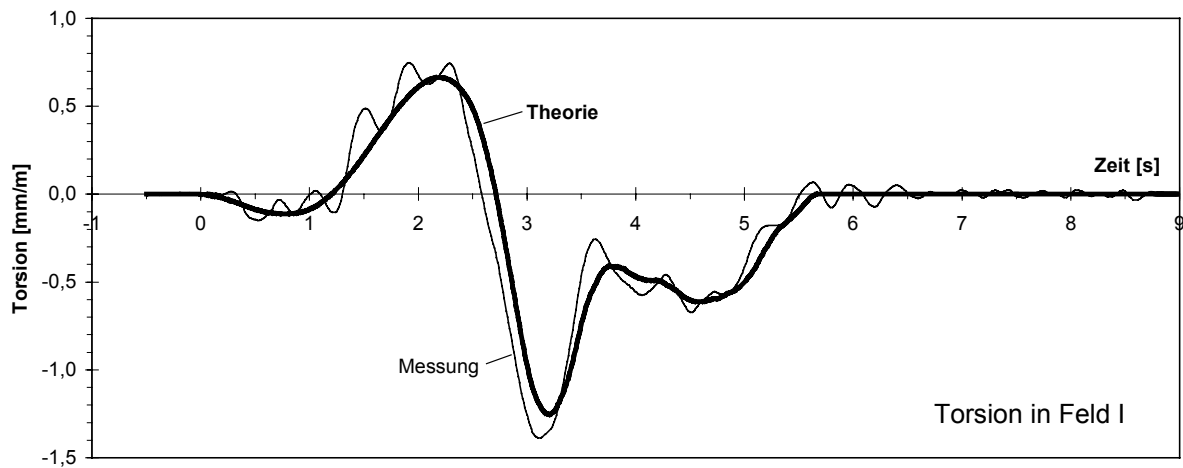


Abbildung 9.9: Torsion der Brücke in Feld I bei Überfahrt des Meßzuges mit 200 km/h und unbelastetem Nebengleis

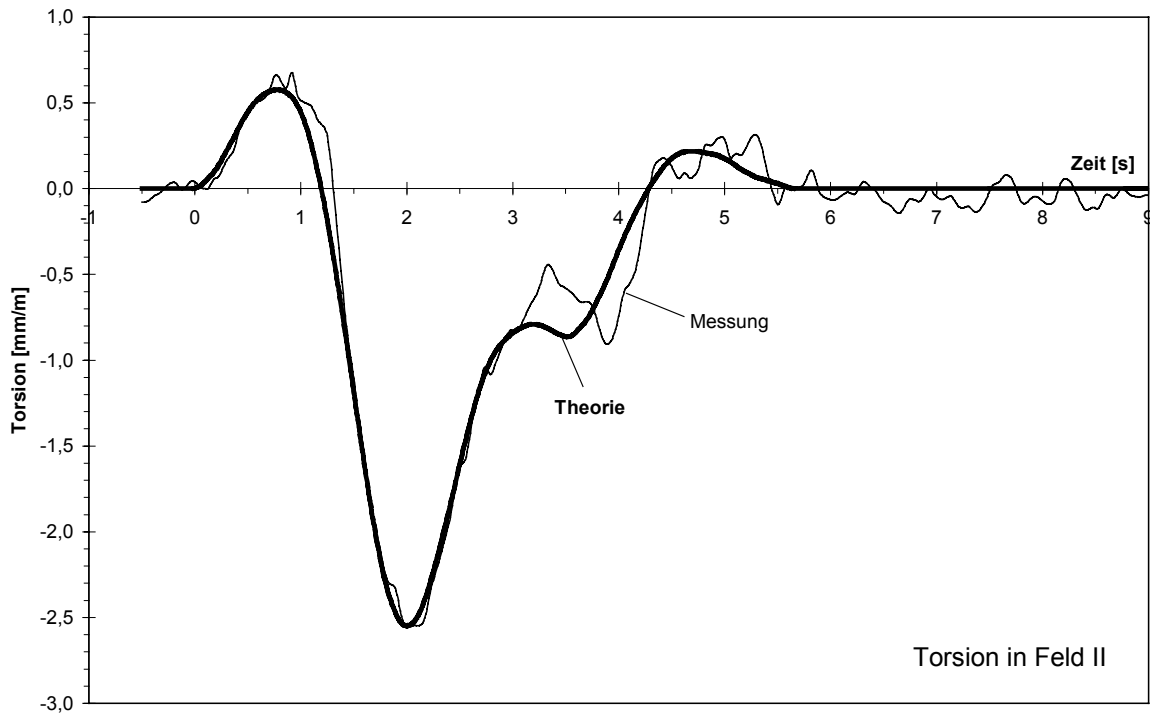


Abbildung 9.10: Torsion der Brücke in Feld II bei Überfahrt des Meßzuges mit 200 km/h und unbelastetem Nebengleis

In Abbildung 9.10 erkennt man zusätzlich, daß zum Zeitpunkt $t=3$ s eine erzwungene Torsions-schwingung mit einer Frequenz von ca. 0,8 Hz angeregt wird.

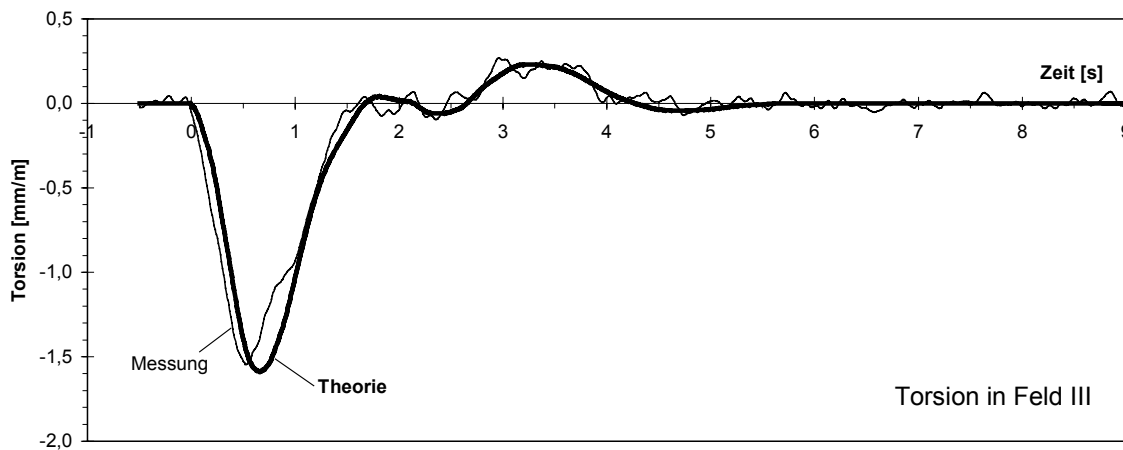


Abbildung 9.11: Torsion der Brücke in Feld III bei Überfahrt des Meßzuges mit 200 km/h und unbelastetem Nebengleis

Die Entstehung der Torsionsbewegung kann genau wie die der Biegung erklärt werden, da ein Großteil der Torsion auf die unterschiedliche Biegung der Hauptträger zurückgeführt werden kann. Aus diesem Grund unterscheiden sich die Kurven der Torsion und der Biegung nicht wesentlich.

9.4 Geschwindigkeitsabhängigkeit der maximalen Deformation

Bestimmt man die maximale Deformation, d.h. die Differenz zwischen größter und kleinster z-Koordinate für alle Meßfahrten, so erhält man folgende Tabelle:

Geschwindigkeit [km/h]	Feld III [mm]	Feld II [mm]	Feld I [mm]
20	13,3	19,7	14,7
120	13,0	20,7	15,2
160	13,7	21,7	15,6
180	13,8	22,7	16,1
190	14,1	23,4	16,5
200	14,1	24,0	17,0

Tabelle 9.12: Abhängigkeit der maximalen Deformation von der Überfahrtgeschwindigkeit des Zuges

Man erkennt eindeutig eine Geschwindigkeitsabhängigkeit der Biegung (nicht Torsion). In der folgenden Abbildung sind die Werte graphisch aufgetragen, wobei alle Werte auf die Deformation bei 200 km/h bezogen wurden.

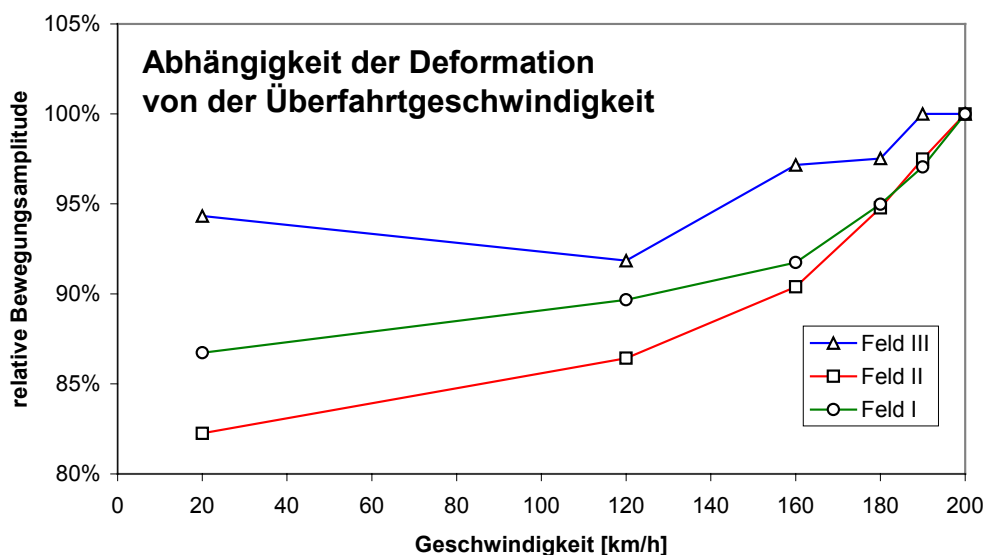


Abbildung 9.13: Abhängigkeit der Deformation von der Überfahrtgeschwindigkeit

Das in Kapitel 8 entwickelte einfache Modell kann diesen Sachverhalt nicht erklären, da die Zeit darin nur als Parameter eingeht.

9.5 Schwingungsmessungen

Wie in Kapitel 7.3.3 beschrieben, wurde die Brücke für die Schwingungsmessungen durch Hüpfen einer Person angeregt. Die Amplituden der so erzeugten Schwingungen betragen nur einige μm , so daß sie von den Wegaufnehmern nicht detektiert werden konnten. Aus diesem Grund wurden für die Schwingungsanalyse nur die Daten der Beschleunigungsmesser herangezogen.

Für die bereits digital vorliegenden Beschleunigungen wurde, wie in Kapitel 9.1 beschrieben, der Zeitnullpunkt festgelegt.

Da aus diesen Messungen keine Informationen über die absoluten Amplituden gewonnen werden sollten, wurde das in Kapitel 7.3.1 beschriebene vereinfachte Kalibrierverfahren angewandt.

Von dem so erhaltenen Wert wurde noch die statische Erdbeschleunigung abgezogen, um die reine Schwingungsbeschleunigung zu erhalten.

9.5.1 Biegeschwingung

Um die Biegeschwingung von der Torsionsschwingung zu separieren, wurden die Beschleunigungen der beiden Hauptträger analog zu Gleichung (9.1) gemittelt.

9.5.1.1 Anregung in Feld I

Die folgende Abbildung zeigt die Fouriertransformierten der 3 so erhaltenen Signale.

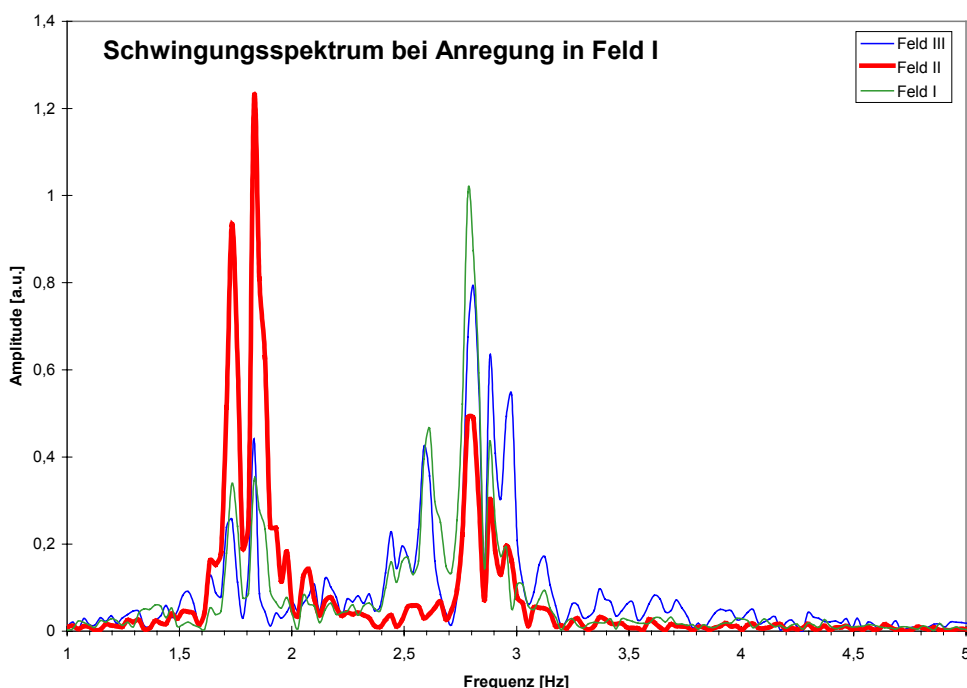


Abbildung 9.14: Amplitudenspektrum der Biegeschwingungen bei Anregung auf Feld I

Man erkennt 3 Frequenzbereiche, in denen Eigenschwingungen vorkommen, und zwar bei

- 1,8 Hz größte Amplitude im Mittelfeld
- 2,6 Hz Amplitude fast nur in den Außenfeldern
- 2,8 Hz größte Amplitude in den Außenfeldern

Die Frequenzen sind aufgesplittet, da die Anregung durch Hüpfen keine Delta-Stoß-Anregung ist und z.T. zur Anregung mehrere 'Hüpfer' stattfanden. Wird jeweils die größte Amplitude auf 1 normiert, so ergeben sich folgende Amplitudenbeträge:

	Feld I	Feld II	Feld III
--	---------------	----------------	-----------------

1,8 Hz	0,33	1,00	0,36
2,6 Hz	0,93	0,08	1,00
2,8 Hz	0,82	0,50	1,00

Tabelle 9.15: Normierte Amplitudenbeträge der Biegeschwingung bei Anregung im Feld I

Die relative Phasenlage der einzelnen Schwingungen könnte theoretisch aus der komplexen Fouriertransformierten bestimmt werden, in der Praxis macht sich aber dabei die Meßgenauigkeit so bemerkbar, daß kein aussagekräftiges Ergebnis erreicht wird. Aus diesem Grund wurde hier ein anderes Verfahren eingesetzt: Es wurden die Differenzen und Summen aus den Beschleunigungen der Biegung (Zeitsignale) der einzelnen Felder gebildet und diese anschließend fouriertransformiert. Es ergeben sich die folgenden Abbildungen:

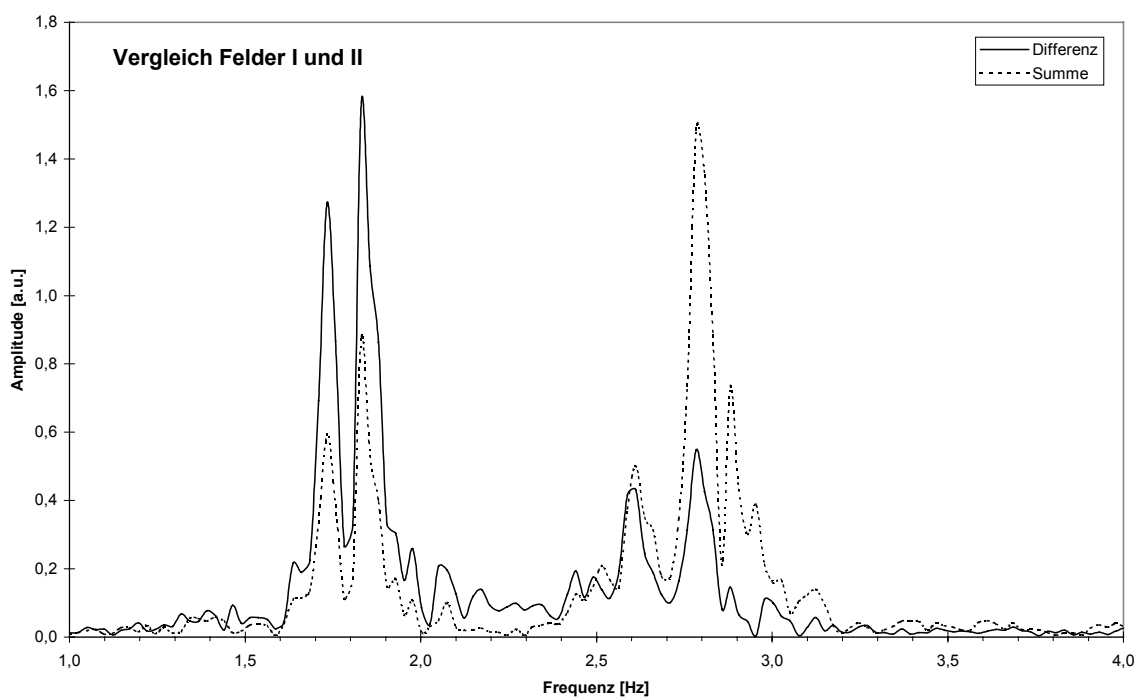


Abbildung 9.16: Spektren der Kombinationssignale aus Feldern I und II bei Anregung in Feld I

Bei der Frequenz 1,8 Hz ist die Differenz größer als die Summe, d.h. die Amplituden haben in den Feldern I und II unterschiedliche Vorzeichen. Bei der Frequenz 2,6 Hz sind Summe und Differenz etwa gleich groß, d.h. eine der Amplituden muß sehr klein sein. Bei der Frequenz 2,8 Hz ist die Summe größer als die Differenz, d.h. die Amplituden haben in den Feldern I und II das gleiche Vorzeichen.

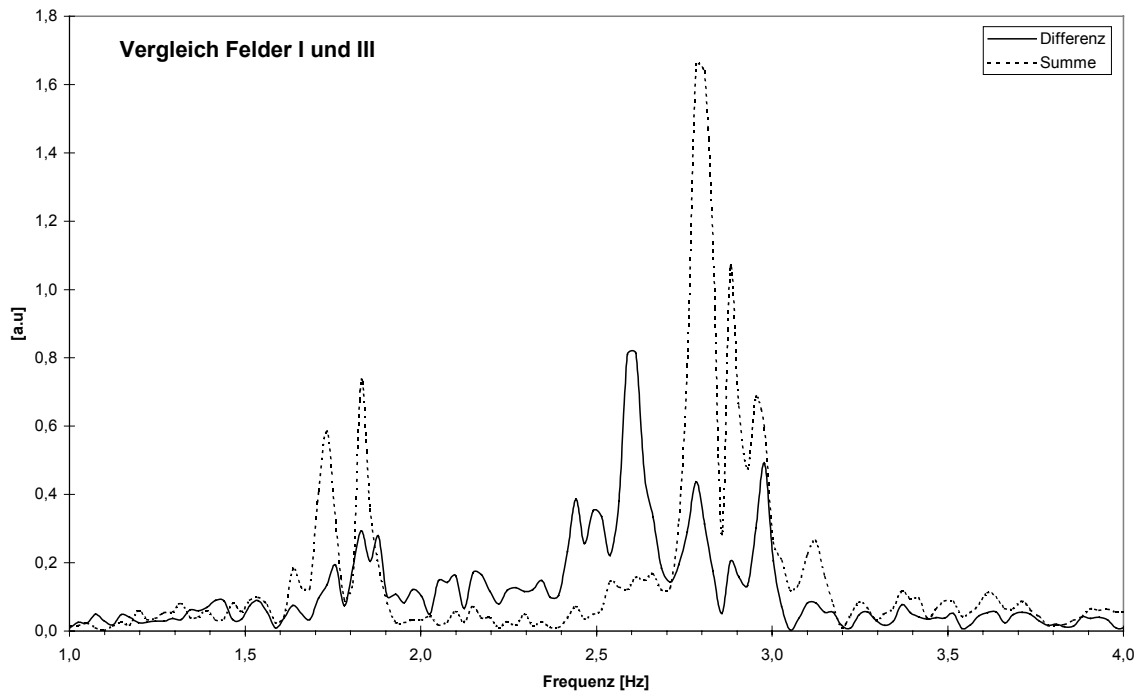


Abbildung 9.17: Spektren der Kombinationssignale aus Feldern I und III bei Anregung in Feld I

Bei den Frequenzen 1,8 Hz und 2,8 Hz sind die Summen größer als die Differenzen, d.h. die Amplituden haben in den Feldern I und III das gleiche Vorzeichen. Bei der Frequenz 2,6 Hz ist die Differenz größer, d.h. die Amplituden haben unterschiedliche Vorzeichen.

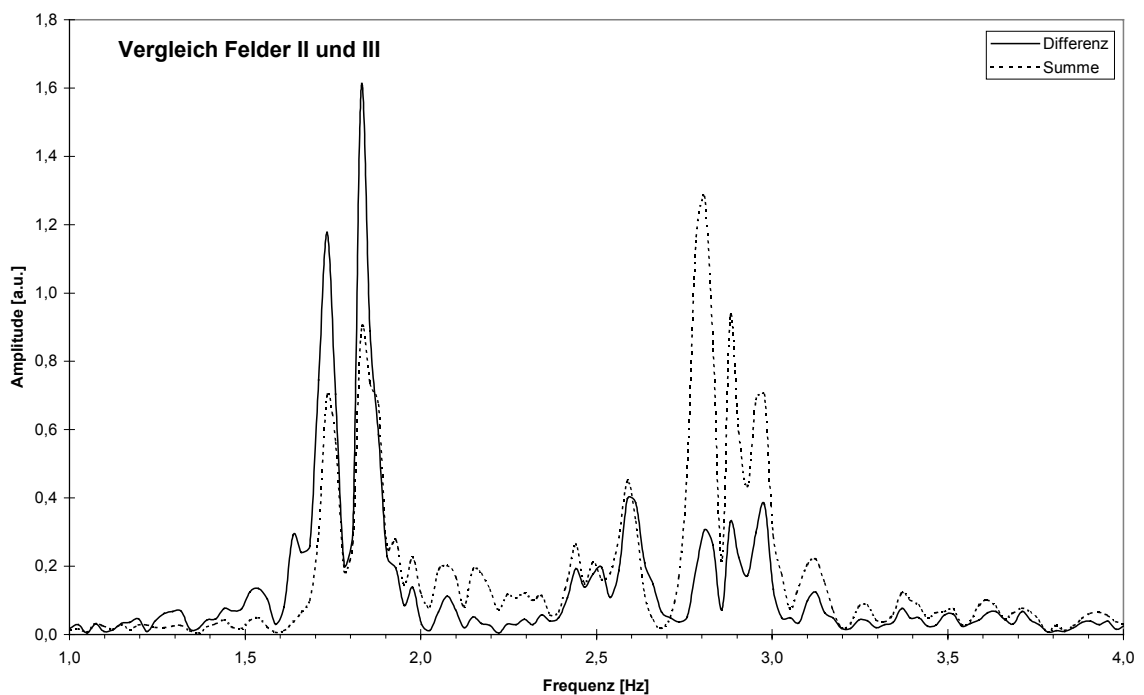


Abbildung 9.18: Spektren der Kombinationssignale aus Feldern II und III bei Anregung in Feld I

Bei der Frequenz 1,8 Hz ist die Differenz größer als die Summe, d.h. die Amplituden haben in den Feldern II und III unterschiedliche Vorzeichen. Bei der Frequenz 2,6 Hz sind Summe und Differenz etwa gleich groß, d.h. eine der Amplituden muß sehr klein sein. Bei der Frequenz 2,8 Hz ist die Summe größer als die Differenz, d.h. die Amplituden haben in den Feldern II und III das gleiche Vorzeichen.

Berücksichtigt man neben den oben gemachten Aussagen auch die Tatsache, daß die Beträge der Amplituden in den Feldern I und III aus Symmetriegründen gleich groß sein müssen, so ergeben sich aus Tabelle 9.15 folgende Amplituden:

	Feld I	Feld II	Feld III
1,8 Hz	+0,35	-1,00	+0,35
2,6 Hz	+1,00	0,00	-1,00
2,8 Hz	+1,00	+0,55	+1,00

Tabelle 9.19: Normierte Amplituden der Biegeschwingung

Dabei wurden die maximalen Amplituden auf 1 normiert und die Amplituden in Feld I positiv gewählt.

9.5.1.2 Anregung in Feld II

Die folgende Abbildung zeigt die Fouriertransformierten der 3 so erhaltenen Signale.

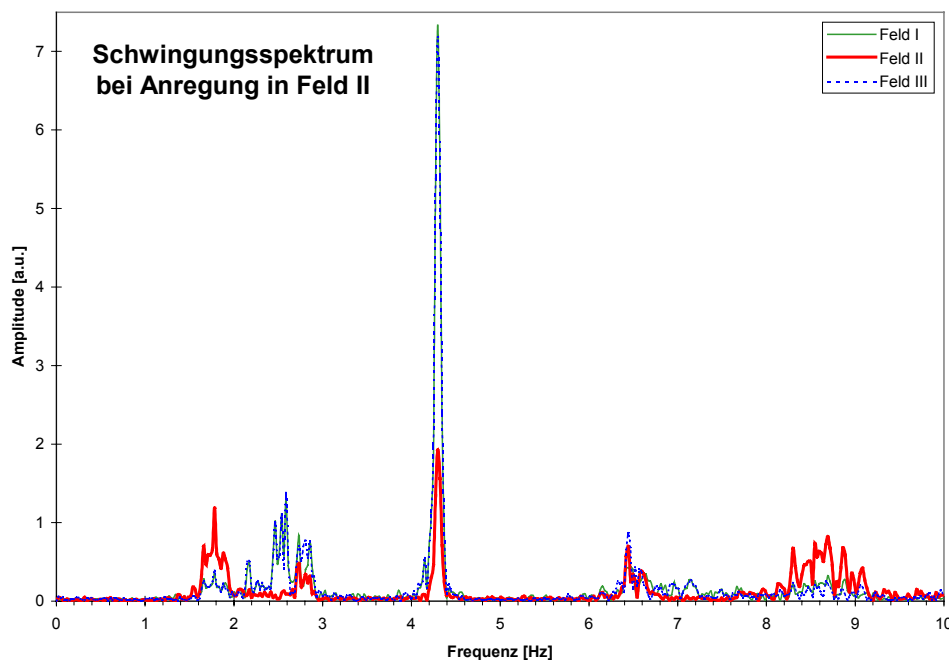


Abbildung 9.20: Amplitudenspektrum der Biegeschwingungen bei Anregung auf Feld II

Wird jeweils die größte Amplitude auf 1 normiert, so ergeben sich folgende Amplitudenbeträge:

	Feld I	Feld II	Feld III
1,78 Hz	0,30	1,00	0,33
2,16 Hz	0,96	0,29	1,00
2,6 Hz	0,95	0,07	1,00
2,8 Hz	0,79	0,47	1,00
4,3 Hz	1,00	0,26	0,98
6,5 Hz	0,73	0,85	1,00
7,15 Hz	1,00	0,11	1,00
8,7 Hz	0,40	1,00	0,27

Tabelle 9.21: Normierte Amplitudenbeträge der Biegeschwingung bei Anregung im Feld II

Die relativen Phasenlagen werden wieder wie im vorigen Kapitel aus den Differenz- und Summensignalen bestimmt:

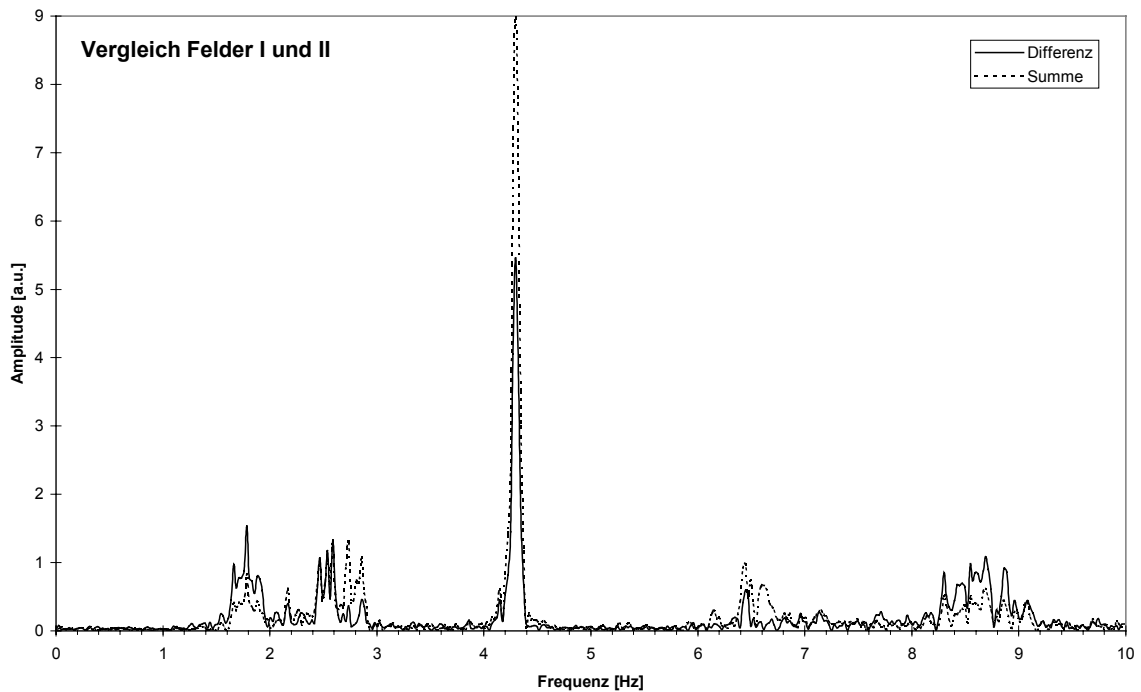


Abbildung 9.22: Kombinationssignale aus Feldern I und II bei Anregung in Feld II

	größere Komponenten	Amplituden in den Feldern I und II
1,78 Hz	Differenz	verschieden
2,16 Hz	gleich	mindestens eine ist Null
2,6 Hz	gleich	mindestens eine ist Null
2,8 Hz	Summe	gleich
4,3 Hz	Summe	gleich
6,5 Hz	Summe	gleich
7,15 Hz	gleich	mindestens eine ist Null
8,7 Hz	Differenz	verschieden

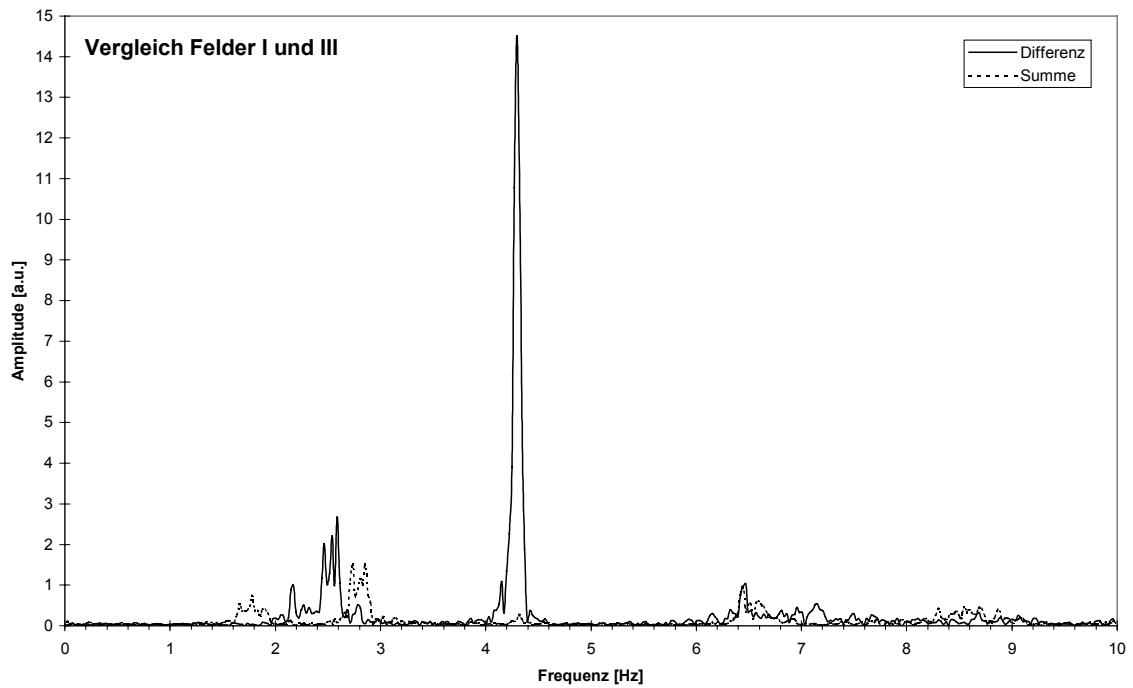


Abbildung 9.23: Kombinationssignale aus Feldern I und III bei Anregung in Feld II

	größere Komponenten	Amplituden in den Feldern I und III
1,78 Hz	Summe	gleich
2,16 Hz	Differenz	verschieden
2,6 Hz	Differenz	verschieden
2,8 Hz	Summe	gleich
4,3 Hz	Differenz	verschieden
6,5 Hz	Summe	gleich
7,15 Hz	Differenz	verschieden
8,7 Hz	Summe	gleich

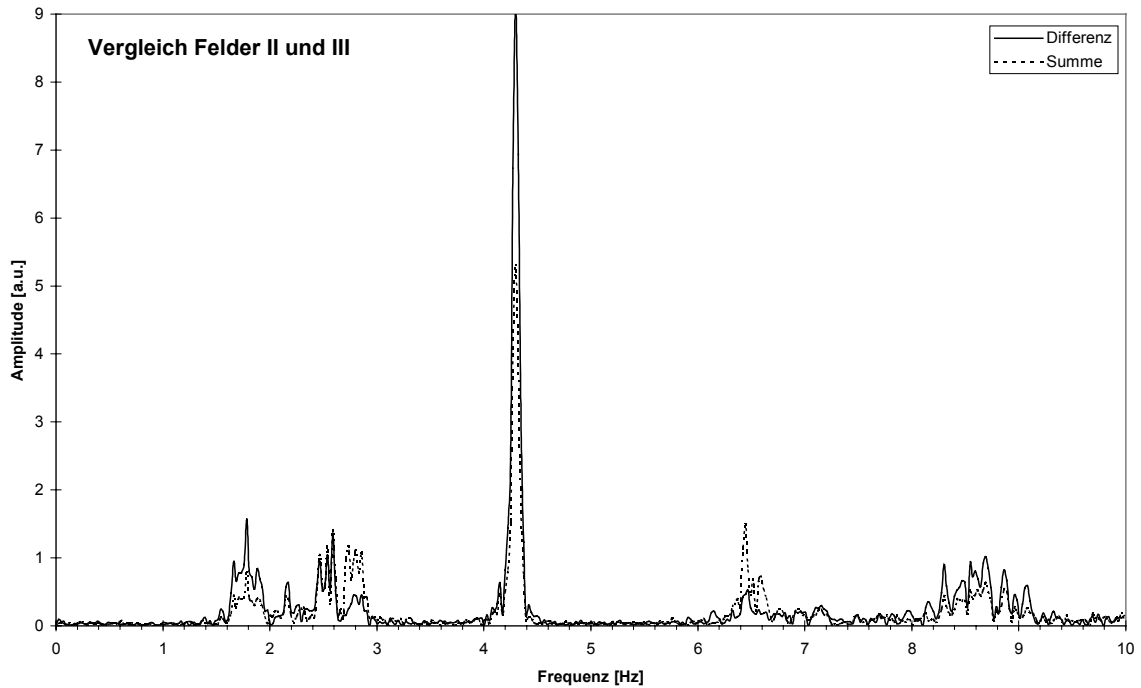


Abbildung 9.24: Kombinationssignale aus Feldern II und III bei Anregung in Feld II

	größere Komponenten	Amplituden in den Feldern II und III
1,78 Hz	Differenz	verschieden
2,16 Hz	gleich	mindestens eine ist Null
2,6 Hz	gleich	mindestens eine ist Null
2,8 Hz	Summe	gleich
4,3 Hz	Differenz	verschieden
6,5 Hz	Summe	gleich
7,15 Hz	gleich	mindestens eine ist Null
8,7 Hz	Differenz	verschieden

Berücksichtigt man neben den oben gemachten Aussagen auch die Tatsache, daß die Beträge der Amplituden in den Feldern I und III aus Symmetriegründen gleich groß sein müssen, so ergeben sich aus Tabelle 9.21 folgende Amplituden:

	Feld I	Feld II	Feld III
1,78 Hz	+0,32	-1,00	+0,32
2,16 Hz	+1,00	0,00	-1,00
2,6 Hz	+1,00	0,00	-1,00
2,8 Hz	+1,00	+0,53	1,00
4,3 Hz	+1,00	+0,26	-1,00
6,5 Hz	+1,00	+1,00	+1,00
7,15 Hz	+1,00	0,00	-1,00
8,7 Hz	+0,34	-1,00	+0,34

Tabelle 9.25: Amplituden der Biegeschwingung bei Anregung im Feld II

Dabei wurden die maximalen Amplituden auf 1 normiert und die Amplituden in Feld I positiv gewählt.

Die Genauigkeit der Frequenzangaben wurde aus den Spektren zu $\pm 0,1$ Hz abgeschätzt.

9.5.2 Torsionsschwingung

Um die Torsionsschwingung von der Biegeschwingung zu separieren wurden die Beschleunigungen der beiden Hauptträger analog zu Gleichung (9.2) voneinander subtrahiert.

Wie in Kapitel 8.3 bereits festgestellt, setzt sich die Torsion aus den beiden Anteilen der Hauptträger und der Fahrbahn zusammen. Die Anteile der Hauptträger haben im wesentlichen das gleiche Frequenzverhalten wie das der Biegeschwingung, so daß hier darauf nicht weiter eingegangen wird.

Die Torsionsschwingungen der Fahrbahn sind in den einzelnen Feldern unabhängig voneinander. Aus diesem Grund wird im folgenden nur die Anregung in Feld II betrachtet.

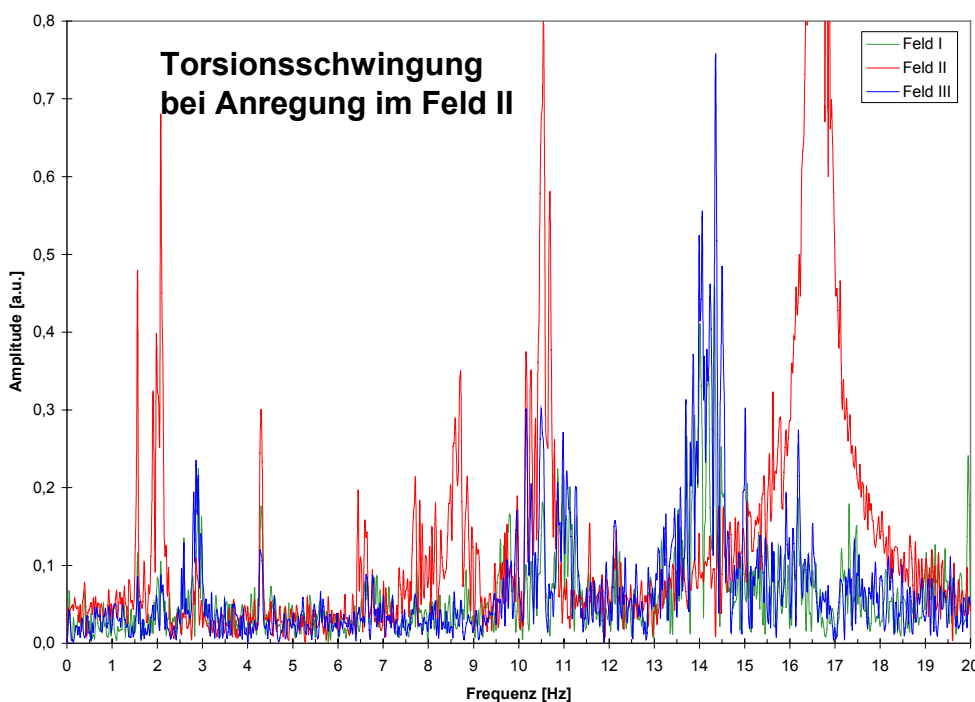


Abbildung 9.26: Amplitudenspektrum der Torsionsschwingung bei Anregung in Feld II

Neben den bereits bei den Biegeschwingungen aufgetretenen Frequenzen treten in der obigen Abbildung noch folgende Frequenzen auf:

10,6 Hz	im Feld II	Torsions-Grundfrequenz der Fahrbahn in Feldes II
14,1 Hz	im Feld I und III	Torsions-Grundfrequenzen der Fahrbahn in den Seitenfeldern I und III
16,6 Hz	im Feld II	Einstreuung aus dem Bahnstromnetz mit $16 \frac{2}{3}$ Hz.

Die Genauigkeit der Frequenzangaben wurde aus den Spektren zu $\pm 0,3$ Hz abgeschätzt.

9.6 Ergebnisse der Schwingungsmessungen und Vergleich mit der Theorie

9.6.1 Biegeschwingungen

Ordnet man den in Tabelle 9.25 erhaltenen gemessenen Eigenschwingungen über die Amplituden die zugehörigen theoretisch berechneten Biegeschwingungen zu, so erhält man folgende Zuordnung:

Frequenz	Messung			Theorie				
	Feld I	Feld II	Feld III	Feld I	Feld II	Feld III	Index	Frequenz
1,78 Hz	+0,32	-1,00	+0,32	0,36	-1,00	0,36	3	1,05 Hz
2,16 Hz	+1,00	0,00	-1,00	+1,00	0,00	-1,00	6/2	1,96 Hz
2,6 Hz	+1,00	0,00	-1,00	+1,00	0,00	-1,00	4	1,96 Hz
2,8 Hz	+1,00	+0,53	+1,00	+1,00	+0,62	+1,00	5	2,30 Hz
4,3 Hz	+1,00	+0,26	-1,00	+1,00	0,00	-1,00	6	3,91 Hz
6,5 Hz	+1,00	+1,00	+1,00	0,02	+1,00	+0,02	7	6,68 Hz
7,15 Hz	+1,00	0,00	-1,00	+1,00	0,00	-1,00	8	7,52 Hz
8,7 Hz	+0,34	-1,00	+0,34	+0,36	-1,00	+0,36	9	8,79 Hz

Tabelle 9.27: Vergleich zwischen Theorie und Messung der Biegeschwingungen

Die Messungen stimmen im wesentlichen sehr gut mit den berechneten Werten überein.

Der gemessenen Frequenz von 2,16 Hz kann direkt keine Eigenschwingung zugeordnet werden. Sie tritt in den Messungen nur dann auf, wenn auch die Schwingung von 4,3 Hz vorhanden ist. Da sie außerdem genau die halbe Frequenz von 4,3 Hz, handelt es sich dabei mit großer Wahrscheinlichkeit um eine Subharmonische mit halber Eigenfrequenz der Eigenschwingung mit Index 6.

Bei der Frequenz 4,3 Hz sollte die Amplitude im Feld II eigentlich Null sein, da die Schwingung mit dem Index 6 in der Mitte einen Knoten besitzt. Die gemessene relative Amplitude rührt daher, daß die Sensoren aus Platzgründen nicht exakt in der Feldmitte montiert waren. Bei einer Montage von 1 m neben der Feldmitte ergibt sich für die Schwingung mit dem Index 6 eine relative Amplitude von 0,27. Bei den anderen Eigenschwingungen sind die Auswirkungen minimal.

Bei der Frequenz 6,5 Hz sollte es sich eigentlich um die Eigenschwingung 7 handeln. Die Frequenz stimmt damit auch gut überein, lediglich die Amplituden sollten in den Außenfeldern fast Null sein. Mit einer Sensormontage außerhalb der Feldmitte kann dieser Effekt nicht erklärt werden, da die Abweichung dann über 10 m betragen müßte.

In der folgenden Abbildung sind die berechneten mit den gemessenen Eigenfrequenzen verglichen.

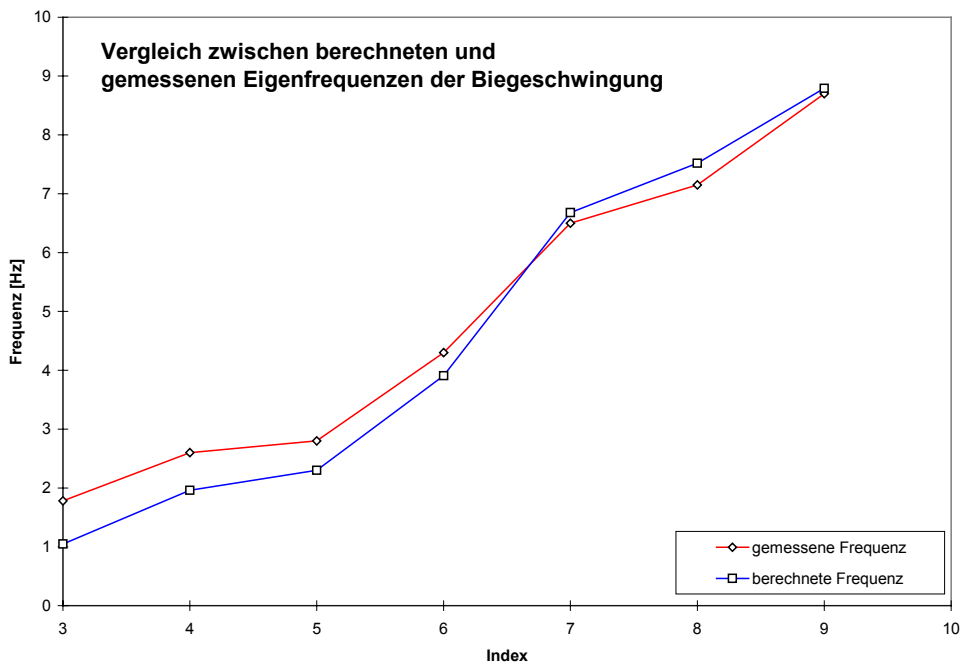


Abbildung 9.28: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Eigenfrequenzen der Biegeschwingung

Die berechneten Frequenzen liegen bei der Grundschiwingung um ca. 0,7 Hz unter den gemessenen. Bei den ersten beiden Oberschwingungen liegt sie noch um 0,6 Hz bzw. 0,5 Hz niedriger. Bei den weiteren Oberschwingungen kann im Rahmen der Meßgenauigkeit keine Aussage gemacht werden, allerdings ist die Abweichung deutlich geringer.

Wie in Speier (1960) beschrieben, verschieben sich die Eigenfrequenzen von stabförmigen Körpern durch die Kopplung von Biege- und Torsionsschwingungen etwas.

9.6.2 Torsionsschwingungen

Die Torsionsschwingungen, die durch die Schwingungen der Hauptträger entstehen, wurden gemessen und stimmen mit den Frequenzen der Biegeschwingungen überein.

Vergleich der gemessenen und der berechneten Torsionseigenfrequenzen der Fahrbahn:

	Feld I	Feld II	Feld III
gemessene Frequenzen	14,1 Hz	10,6 Hz	14,1 Hz
berechnete Frequenzen	16,3 Hz	11,0 Hz	16,3 Hz

Tabelle 9.29: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Eigenfrequenzen der Torsionsschwingungen

Die Frequenzen der Torsionsschwingungen stimmen in etwa mit den berechneten Werten überein. Eine bessere Übereinstimmung kann bei dem stark vereinfachten theoretischen Modell nicht erwartet werden. Ein Grund könnte z.B. die Vernachlässigung der Dämpfung sein, wodurch die berechneten Frequenzen angehoben wurden.

10 Zusammenfassung

Durch die Erweiterung der geodätischen Aufgabengebiete, insbesondere in der Ingenieurvermessung, werden zukünftig vermehrt Lösungen verlangt, die von einer Fachrichtung alleine nicht geliefert werden können, so daß zunehmend eine interdisziplinäre Zusammenarbeit erfolgen muß. Dadurch entstehen zum Teil einfachere, schnellere und trotzdem genaue Methoden, wie am Beispiel des entwickelten Feldkalibrierverfahrens gezeigt wird. Die vorliegende Arbeit ist ein Beispiel für diese fachübergreifende Zusammenarbeit und stellt die neue Vorgehensweise vor.

Zunächst werden die aus den verschiedenen Einzeldisziplinen stammenden Verfahren und Lösungen klassifiziert, z.B. in: statische bzw. kinematische Messungen, kinematische bzw. dynamische Auswertung, Einzel- bzw. Multisensor-Meßsysteme, Modellierung des Meßobjektes und des Meßsystems.

In dieser Arbeit wird ein neu entwickeltes Feldkalibrierverfahren für Inertialnavigationssysteme vorgestellt, welches aus einer interdisziplinären Zusammenarbeit entstand und auf der Messung des Erdschwerevektors und der Erddrehrate in 24 Lagen basiert. Damit können die Kalibrierparameter Offset, Skalenfaktor und Schiefwinkligkeit bestimmt werden. Die Genauigkeit dieser Parameter liegt für die Beschleunigungsmesser in der selben Größenordnung wie bei aufwendigeren Laborkalibrierungen, für die Kreisel ergibt sich, bedingt durch den Vergleich mit der sehr kleinen Erddrehrate, eine um ein bis drei Größenordnungen schlechtere Genauigkeit.

Im zweiten Schwerpunkt der Arbeit wird am Beispiel der Messung der Deformation einer Eisenbahnbrücke während der Überfahrt eines Zuges gezeigt, daß neben der eigentlichen Messung auch die Auswertung der Meßergebnisse von einer Zusammenarbeit verschiedener Fachrichtungen profitiert. Die in den ersten Kapiteln beschriebenen Methoden werden konkret angewandt; ausgehend von der Problembeschreibung wird die Konzeption und Realisierung des Multi-Sensor-Meßsystems entwickelt und die Durchführung und Auswertung der Messungen beschrieben. Die Ergebnisse werden mit dem theoretischen Modell verglichen, wobei trotz der nur parametrischen Zeitabhängigkeit eine sehr gute Übereinstimmung festgestellt wird. Dies zeigt, daß an einem Modell, je nach Art der Fragestellung, viele wohlüberlegte Vereinfachungen vorgenommen werden können, ohne daß es seine Aussagekraft verliert. Für andere Fragestellungen ist dieses Modell dann nicht geeignet. Dies zeigt die in Kapitel 9.4 festgestellte Geschwindigkeitsabhängigkeit der maximalen Deformation, die mit dem in dieser Arbeit entwickelten Modell nicht erklärt werden kann. Um diese Geschwindigkeitsabhängigkeit erklären zu können muß statt dem verwendeten parametrisch zeitabhängigen Modell ein explizit zeitabhängiges dynamisches Brückenmodell verwendet werden. Da der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit im meßtechnischen Bereich liegt, bleiben diese Untersuchungen weiteren Arbeiten vorbehalten.

11 Verzeichnisse

11.1 Literaturverzeichnis

- Achenbach, J.-J. (1993): Analoge und digitale Filter und Systeme; Wissenschaftsverlag.
- Achilles, Dietmar (1985): Die Fourier-Transformation in der Signalverarbeitung; Kontinuierliche und diskrete Verfahren der Praxis.
- Akima, Hiroshi (1970): A New Method of Interpolation and Smooth Curve Fitting Based on Lokal Procedures; Journal of Assc. for Comp. Mach., Vol.17, No 4, Oct. 1970, pp. 589-602.
- Axelsson, K.; Yu, Y.; Johansson, L. (1992): Finite element analysis of an excavated slope, in BELL, D. (Ed.): Landslides, Vol 1; Christchurch; pp. 295-300.
- Baumann, Heinrich (1976): Fehleranalyse und Simulation eines Trägheits-Navigationssystems mit fahrzeugfesten Sensoren, Dissertation TU Braunschweig.
- Bäumker, M.; Fitzen, H.P. (1995): Kinematic Positioning with Combined Inertial and GPS Measurements; in: High Precision Navigation 95; Proceedings of the 3rd International Workshop on High Precision Navigation; Apr. 1995; Stuttgart; Dümmler Verlag, Bonn.
- Bauer, H.-J. (1981): Einführung in die rechnergestützte Meßtechnik; Physikalisches Institut der Universität Stuttgart, Skript zur Vorlesung.
- Bellanger, Maurice (1984): Digital Processing of Signals, Theory and Practice; John Wiley & Sons.
- Bergander, B. (1977): Rechnerische Untersuchung des Schwingverhaltens von Schienenfahrzeugen in senkrechter Richtung; Archiv für Eisenbahntechnik AET 32; Seite 46-52.
- Bergander, B. (1982): Das Schwingverhalten von Fahrzeugen in senkrechter Richtung bei der Fahrt über Brückenreihen; ZEV Glasers Annalen 106; Heft 11, Seite 355-362.
- Bergmann, Schäfer (1993): Lehrbuch der Experimentalphysik; Band 3, Optik.
- Best, Roland (1991): Digitale Meßwertverarbeitung; Oldenbourg Verlag.
- Best, Roland (1991a): Digitale Signalverarbeitung und -simulation, Anwendung der digitalen Signalverarbeitung; Band II; AT Verlag, Aarau, Schweiz.
- Beyer, Jürgen (1993): Nichtlineare Schätzung inertialer Navigationsgrößen durch die fehlertolerante Verarbeitung zusätzlicher Stützinformationen; Dissertation an der TH Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau.
- Birkle, M. (1986): Meßnetze für Umwelt und Anlagenüberwachung, in: Signalverarbeitung in Multi-Sensor-Systemen, Aussprachetag am 18-19.2.1986 in Karlsruhe, Hrsg. F. Mesch.
- Böse, Herbert (1965): Einführung in die Ausgleichsrechnung; Oldenbourg.
- Bojen, J. (1983): Ein dynamisches Modell zur Analyse und Interpretation von Deformationen; Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover; Nr. 122.
- Bonfig, K.W. (1993): Sensoren und Mikroelektronik; Sensorik Bd. 3; expert Verlag.
- Brammer, K.; Siffling, G. (1989): Kalman-Brucy-Filter, Deterministische Beobachtungen und stochastische Filterung.
- Brigham, E. Oran (1982): FFT; Schnelle Fourier-Transformation; Oldenbourg Verlag.
- Britting, Kenneth R. (1971): Inertial Navigation Systems Analysis; Wiley-Interscience, New York.

- Brünger, H.; Kayser, D.; Martens, D.; Bitzer, M.; Schürmann, M. (1995): Sensor Integration for Airborne Meteorological Measurements; in: High Precision Navigation 95; Proceedings of the 3rd International Workshop on High Precision Navigation; Apr. 1995; Stuttgart; Dümmler Verlag, Bonn.
- Camberlein, L. ; Mazzanti, F.(1985): Calibration Technique for Laser Gyro Strapdown Inertial Navigation Systems ; Symposium Gyro Technology 1985, Stuttgart, Germany.
- Candy James V. (1986): Signal processing - The model-based approach; McGraw-Hill Book Company.
- Desai, C.S.; Abel, J.F. (1972): Introduction to the finite element method; Van Nostrand Reinhold Company.
- Deutsche Reichsbahn (1933): Mechanische Schwingungen der Brücken; Leitfaden zum Verständnis und zur Beobachtung der dynamischen Wirkungen der Verkehrslast; Verlag der Verkehrswissenschaftlichen Lehrmittelgesellschaft mbH bei der Deutschen Reichsbahn, Berlin.
- Ellmer, W. (1987): Untersuchung temperaturinduzierter Höhenänderungen eines Großturbinentisches. Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen; Universität der Bundeswehr, München; Heft 26.
- Ewert, Sven (1992): Die Auswirkungen der Gleislagefehler am Übergang zur Brücke auf den dynamischen Beanspruchungszustand des Rad - Schiene - Systems und der Brücke; Dissertation Universität Bochum.
- Farkas-Jandl, T.(1986): Einführung in die Inertialvermessung; Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1986.
- Flesch, Rainer (1993): Baudynamik praxisgerecht; Bauverlag GmbH.
- Gallagher, R.H. (1976): Finite-Element-Analysis; Springer Verlag.
- Garus, Dieter (1985): Brillouin-Ringlaserkreisler; Fortschritt-Berichte des VDI: Reihe 8, Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik.
- Geiger, Axel (1982): Entwurf und Erprobung eines Präzisionsneigungstisches zur Kalibrierung geodätischer Instrumente; Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen; Universität der Bundeswehr, München.
- Gotthardt, Ernst (1968): Einführung in die Ausgleichsrechnung; Wichmann.
- Hagg, Ernst (1993): Realisierung von Multisensoranwendungen mit vernetzten Logischen Sensoren und Aktoren; Shaker Verlag, Reihe Informatik.
- Hall, David L. (1992): Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion; Artech House Boston, London.
- Heck, Ulrich; Fritschi, Jochen; Mönicke, Hans-Joachim; Petzoldt, Rainer (1996): „Kinematische Messungen zur Kontrolle der Dynamik von Brückenbauwerken“ in Mönicke, H-J.: Kinematische Meßmethoden in der Ingenieur- und Industrievermessung; Beiträge zum 39. DVW-Seminar am 19. und 20. Juni 1995 am Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen der Universität Stuttgart.
- Heister, Hansbert (1987): Zur automatischen Kalibrierung geodätischer Längenmeßinstrumente; Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen; Universität der Bundeswehr, München, H27.
- Hess, W. (1989): Digitale Filter; Teubner.
- Heunecke, Otto (1994): Deformationsanalyse mittels KALMAN-Filter – Möglichkeiten und Perspektiven; XX FIG Congress, Melbourne, 1994, Com. 6, Paper 602.3

- Heunecke, Otto (1995): Zur Identifikation und Verifikation von Deformationsprozessen mittels adaptiver KALMAN-Filterung (Hannoversches Filter), Wissenschaftliche Arbeiten der Universität Hannover, Nr. 208.
- Hilberg, Dirk (1989): Akima-Interpolation; in c't 1989, Heft 6, Seite 206-214.
- Hinüber, E.v.; Janocha, H. (1992): Strapdown Inertial Measurement System for Industrial Robots; Symposium Gyro Technology, Stuttgart, Germany.
- Hinüber, E.v.; Janocha, H. (1994): 24 Bit mit 1 ppm bei 4 kHz; Artikel in Design&Elektronik 6 vom 22.3.1994
- Höpcke, Walter (1980): Fehlerlehre und Ausgleichsrechnung; DeGruyter-Lehrbuch.
- Hollmann, R.; Lang, M.; Welsch, W. (1994): Geodetic Surveillance and the Dynamic Behaviour of a Bridge; Perelmuter Workshop on Dynamic Deformation Models; Proceedings; The Technion, Haifa, Israel.
- Holzmann, G.; Meyer; Schumpich (1975): Technische Mechanik; B.G. Teubner, Stuttgart.
- Huddle, James R.(1988): Advances in Strapdown Systems for Geodetic Applications; in: High Precision Navigation 88; Proceedings of the 1st International Workshop on High Precision Navigation; 1988; Dümmeler Verlag, Bonn.
- Huggenberger, A.U. (1951): Talsperren-Meßtechnik; Springer-Verlag.
- HÜTTE (1989): Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften; Czichos,H.; Springer Verlag.
Herausgeber:
- IABSE (1987): Monitoring of Large Structures and Assessment of their Safety; Colloquium Bergamo 1987.
- iMAR (1994): Datenblätter zum iMAR NAV-CONTINT-A2 24 Bit Measurement A/D Converter; iMAR GmbH, Saarbrücken.
- Joeckel, Rainer; Stober, Manfred (1995): Elektronische Entfernung- und Richtungsmessungen.
- Jörg, Klaus-Werner (1994): Echtzeitfähige Multisensorintegration für autonome mobile Roboter; Reihe Informatik, BI Wissenschaftsverlag.
- Juckenack, Dietrich (1990): Handbuch der Sensortechnik: Messen mechanischer Größen; Verlag Moderne Industrie.
- Kahmen, H. (1977): Elektronische Meßverfahren in der Geodäsie; Grundlagen und Anwendungen; Wichman Verlag.
- Kammeyer, Karl D.; Kroschel, Kristian (1998): Digitale Signalverarbeitung: Filterung und Spektralanalyse; Teubner.
- Kegel, Gunther (1990): Erhöhung der Autonomie von Robotersystemen durch multisensorielle Informationen und Nutzung einer Wissensbasis; Dissertation an der TH Darmstadt, Fachbereich 19.
- Keller, Dieter (1991): Aufbau eines geodätischen Strapdown Inertialsystem zur Punktbestimmung, DGK-Reihe C Heft 367, München, 1991.
- Knickmeyer, Elfriede T.; Knickmeyer, Ernst H.; Nitschke, Martin (1996): „Zur Auswertung kinematischer Messungen mit dem Kalmanfilter“ in Mönicke, H-J.: Kinematische Meßmethoden in der Ingenieur- und Industrievermessung; Beiträge zum 39. DVW-Seminar am 19. und 20. Juni 1995 am Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen der Universität Stuttgart.

- Knöferle, A.; Petzoldt, R. (1991): An experimental inertial navigation system; in: High Precision Navigation 91; Proceedings of the 2nd International Workshop on High Precision Navigation; Nov. 1991; Stuttgart and Freudenstadt; Dümmler Verlag, Bonn.
- Knöferle, A.; Petzoldt, R. (1992): Inertialmeßtechnik im Nahbereich; in: Arbeits- und Ergebnisbericht 1990 - 1992 des Sonderforschungsbereichs 228: Hochgenaue Navigation - Integration navigatorischer und geodätischer Methoden; Universität Stuttgart.
- Krämer, Stephan (1995): Simulation des nichtlinearen Tragverhaltens der Fußgängerbrücke über den Allmandring, Diplomarbeit am Institut für Baustatik, Universität Stuttgart.
- Kröner, E. (1971): Skript zur Vorlesung über klassische Mechanik, Universität Stuttgart.
- Kuhlmann, Heiner (1996): Ein Beitrag zur Überwachung von Brückenbauwerken mit kontinuierlich registrierenden Messungen; Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover; Dissertation Nr.218.
- Kuhlmann, H.; Pelzer, H. (1997): Models of Deformation Analysis; in Altan; Gründig (Eds): Second Turkish - German Joint Geodetic Days; 27. - 29. Mai 1997; Berlin.
- Lacroix, Arild (1985): Digitale Filter - Eine Einführung in zeitdiskrete Signale und Systeme; Oldenbourg..
- Lechner, W.; Lohmann, P. (1995): Airborne Photogrammetry Based on Integrated DGPS/INS Navigation; in: High Precision Navigation 95; Proceedings of the 3rd International Workshop on High Precision Navigation; Apr. 1995; Stuttgart; Dümmler-Verlag, Bonn.
- Link, M. (1989): Finite Elemente in Statik und Dynamik; Stuttgart.
- Linkwitz, Klaus (1991): Vermessungskunde I und II; Manuskript zur Vorlesung.
- Lingel, A. (1993): Bestimmung von Position und Lage der Sensoren in einem Inertialnavigationssystem; Diplomarbeit am Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen der Universität Stuttgart.
- Litef: Datenblätter der Kreisel K273 von Litef
- Lorenzini, Dino A.: Testing of Precision Inertial Gyroscopes; AGARDograph No. 192.
- Luz, Eberhard (1992): Schwingungsprobleme im Bauwesen: Einführung in die Schwingungsberechnung von Baukonstruktionen; Kontakt&Studium.
- Luz, Eberhard; Gurr-Beyer, Christa; Stöcklin, Walter (1983): Schwingungsmessungen an Bauwerken: Abschlußbericht Frühjahr 83 = Vibration Measurements at buildings; Universität Stuttgart, Institut für Mechanik.
- Magnus, Kurt (1971): Kreisel: Theorie und Anwendung; Springer.
- Magnus, K.; Müller, H.H.(1974): Grundlagen der Technischen Mechanik; B.G. Teubner, Stuttgart.
- Manolis, George D. (1997): Earthquake Resistant Engineering Structures; Proceedings from International Conference on Earthquake Resistant Engineering Structures.
- Marguerre, K. (1967): Technische Mechanik; Springer-Verlag.
- Mark, John; Tzartas, Daniel; Hilby, Timothy (1986): "Fast Orthogonal Calibration Of A Ring Laser Strapdown System"; Litton Industries; Symposium Gyro Technology, Stuttgart, Germany.
- Marks, Robert (1991): Introduction to Shannon sampling and interpolation theory; Springer.
- Mesch, F. (1986): Signalverarbeitung in Multi-Sensor-Systemen, Aussprachetag am 18-19.2.1986 in Karlsruhe.

- Möhlenbrink, Wolfgang (1981): Messung von Biegeliniendeformationen mit elektronischen Libellen; in: Conzett, Matthias; Schmid (Hrsg.): Ingenieurvermessung 80; Beiträge zum VIII. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung; Bd. 2, Nr. C11; Dümmler, Bonn.
- Möhlenbrink, Wolfgang (1984): Zur Entwicklung eines Meßverfahrens für die Bestimmung von Bauwerksverformungen aus Neigungs- und Beschleunigungsmessungen; Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 307; München.
- Möhlenbrink, Wolfgang; Krystek, P. (1984): Messungen windinduzierter Bewegungen an Hochbauten - Erfahrungen und neue Erkenntnisse; in Rinner, K.; Schelling, G.; Brandstätter, G.: Ingenieurvermessung 84; Beiträge zum IX. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung, Graz 1984, Kap. C7.
- Möhlenbrink, Wolfgang; Welsch, Dieter. (1984): Aktions-Reaktions-Analyse thermischer Verformungen an Ingenieurbauten; in Rinner, K.; Schelling, G.; Brandstätter, G.: Ingenieurvermessung 84; Beiträge zum IX. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung, Graz 1984, Kap. E2.
- Möhlenbrink, Wolfgang (1985): Verformungsmessungen mit nicht stationären elektronischen Neigungsmessern, in 6. Nationales Felsmechanik Symposium, Aachen, April 1994; Hrsg. W. Wittke.
- Mönicke, H.-J. (1991a): Optoelectronic sensors for measuring moving objects in surveying; in: High Precision Navigation 91; Proceedings of the 2nd International Workshop on High Precision Navigation; Nov. 1991; Stuttgart and Freudenstadt; Dümmler-Verlag, Bonn.
- Mönicke, H.-J.; Heck, U. (1992): „Zur Messung von kleinen, kurzperiodischen, dynamischen Deformationen mit optoelektronischen Sensoren“ Contributed paper to the 6th International FIG-Symposium on Deformation Measurements, 24-28 February 1992, Hannover, Federal Republic of Germany.
- Mönicke, Hans-Joachim (1996): „Kinematik im Vermessungswesen - Meßtechnik und Abgrenzung zu statischen Verfahren“ in Mönicke, H.-J.: Kinematische Meßmethoden in der Ingenieur- und Industrievermessung; Beiträge zum 39. DVW-Seminar am 19. und 20. Juni 1995 am Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen der Universität Stuttgart.
- Näbauer, Martha (1961): Mathematische Grundlagen, Ausgleichsrechnung und Rechenhilfsmittel; Handbuch der Vermessungskunde.
- Natke, H.G. (1983): Einführung in die Theorie und Praxis der Zeitreihen- und Modalanalyse; Braunschweig.
- Niebuhr, J. (1996): Physikalische Meßtechnik; Oldenbourg Verlag.
- Niederstrasser, Helmut (1986): Ermittlung von Fehlern mechanischer Kreisel in Navigationssystemen mit körperfesten Sensoren; Dissertation Universität Braunschweig.
- Nowacki, Witold (1974): Baudynamik; Springer-Verlag.
- Obrebski, J.B. (1996): State-of-the-Art in conceptual Design of lightweight Structures; in: Proceedings of the International Symposium Conceptual Design of Structures; 7. - 11. Okt. 1996; Universität Stuttgart.
- Pahnke U. (1991): „Special measurement methods to determination of the dynamic parameters in bridge systems“ in Applications of Geodesy to Engineering; Editors: Linkwitz, Eisele, Mönicke; IAG Symposium No. 108, Stuttgart.
- Pelzer, Hans (1987): Ingenieurvermessung; Deformationsmessungen, Massenberechnungen; Ergebnis des Arbeitskreises 6 des Deutschen Vereins für Vermessungswesen (DVW) e.V.; Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart.

- Pelzer, H. (1987a): Deformationsuntersuchungen auf der Basis kinematischer Bewegungsmodelle; Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 94.
- Penman, A.D.M.; Charles, J.A. (1971): Measuring movements of engineering structures; Building Research Station Current Paper 32/71.
- Petzoldt, R.. (1995): Calibration of a Strapdown INS by Measurements in 24 faces; in: High Precision Navigation 95; Proceedings of the 3rd International Workshop on High Precision Navigation; Apr. 1995; Stuttgart; Dümmler-Verlag, Bonn.
- Petzoldt, R. (1996): „Physikalische Grundlagen der Kinematik“ in Mönicke, H-J.: Kinematische Meßmethoden in der Ingenieur- und Industrievermessung; Beiträge zum 39. DVW-Seminar am 19. und 20. Juni 1995 am Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen der Universität Stuttgart.
- Pfeufer, Andreas (1993): Analyse und Interpretation von Überwachungsmessungen – Terminologie und Klassifikation; in ZfV Heft 8/9 Seite 470ff.
- Plapper, Peter (1993): Echtzeit-Analyse der Signale von Multisensorsystemen, Shaker-Verlag.
- Preuss; Linkwitz, K.: COSAD-Handbuch; Forschungsgesellschaft für Geodätische Meß- und Rechentechnik; Leonberg.
- Profos, P.; Pfeifer, T. (1992): Grundlagen der Meßtechnik, Oldenbourg Verlag, München Wien.
- Rackzowsky, Jörg (1991): Multisensordatenverarbeitung in der Robotik; Springer-Verlag.
- Reissig, P.D. (1996): Lightweight Structures in Architecture; in: Proceedings of the International Symposium Conceptual Design of Structures; 7. - 11. Okt. 1996; Universität Stuttgart.
- Savagne, P.G.(1978): Strapdown Sensors, AGARD Lecture Series No 95; Strapdown Inertial Systems, 1978.
- Savagne, P.G.(1984): Strapdown System Algorithmus, AGARD Lecture Series No. 133; Advances in Strapdown Inertial Systems, 1984.
- Schiessle, Edmund (1992): Sensortechnik und Meßwertaufnahme; Vogel Buchverlag.
- Schlemmer, Harald (1991): Sensor integration for measurements in civil engineering and industry; in: High Precision Navigation 91; Proceedings of the 2nd International Workshop on High Precision Navigation; Nov. 1991; Stuttgart and Freudenstadt; Dümmler-Verlag, Bonn.
- Schlemmer, Harald (1996): Grundlagen der Sensorik.
- Schrück, Karl-Wilhelm (1977): Anwendung der Kalman-Filter-Technik, Anleitung und Beispiele; Oldenbourg Verlag.
- Schröder, Dietrich (1992): Genauigkeitsanalyse inertialer Vermessungssysteme mit fahrzeugfesten Sensoren, DGK Reihe C Nr. 391.
- Schrüfer, G. (1990): Signalverarbeitung - Numerische Verarbeitung digitaler Signale; Carl Hanser-Verlag.
- Schütz, Karl Georg (1988): Untersuchung des gekoppelten Schwingungssystems Brücke - Fahrzeug - Tilger unter besonderer Berücksichtigung von Fahrbahnunebenheiten; Mitteilungen aus dem Lehrstuhl für Stahlbau; Dissertation TU München.
- Schwarz, K.P. (1986): The Error Modell of inertial Geodesy – a study in dynamic system analysis in Sünkel,H.:Mathematical and Numerical Techniques in physical Geodesy Springer Verlag, Berlin.
- Schwarz, Willfried (1991): Inertial techniques in geodesy - State of the art and trends; in: High Precision Navigation 91; Proceedings of the 2nd International Workshop on High Precision Navigation; Nov. 1991; Stuttgart and Freudenstadt; Dümmler-Verlag, Bonn.

- Schwarz, Willfried (1996): „Kinematische Sensoren - Klassifizierung und Leistungsfähigkeit“ in Mönicke, H-J.: Kinematische Meßmethoden in der Ingenieur- und Industrievermessung; Beiträge zum 39. DVW-Seminar am 19. und 20. Juni 1995 am Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen der Universität Stuttgart.
- Söhne, W.; Heinze, O. (1995): Precise Positioning with INS and GPS in Land Vehicle and Flight Applications; in: High Precision Navigation 95; Proceedings of the 3rd International Workshop on High Precision Navigation; Apr. 1995; Stuttgart; Dümmler-Verlag, Bonn.
- Späth, Helmuth (1978): Spline-Algorithmen zur Konstruktion glatter Kurven und Flächen; Oldenbourg.
- Späth, Helmuth (1990): Eindimensionale Spline-Interpolations-Algorithmen; Oldenbourg.
- Speier, Helmut (1960): Gekoppelte Biege- und Torsionsschwingungen von beliebigen stabförmigen Körpern; Mitteilungen des Instituts für Statik der TH Hannover Nr.4, 1960.
- Sternberg, Harald; Caspary, Wilhelm; Heister, Hans; Hock, Christian; Klemm, Jochen (1996): „Kinematische Anwendungen von INS/GPS“ in Mönicke, H-J.: Kinematische Meßmethoden in der Ingenieur- und Industrievermessung; Beiträge zum 39. DVW-Seminar am 19. und 20. Juni 1995 am Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen der Universität Stuttgart.
- Stieler, Bernhard; Ye Shipin (1984): Simulation on Gyroscopic Alignment and Calibration of Strapdown Inertial Navigation System in a Swaying Vehicle; DFVLR-Mitt.84-20. INS:Stieler, Bernhard (1992): Vorlesungsmanuskript zur Vorlesung: Inertiale Meßtechnik und Navigation, Universität Stuttgart.
- Sundstrand: Datenblätter der Beschleunigungsmesser Serie QFLEX von Sundstrand.
- Synold, Georg (1995): Einfluß von Brückenschwingungen auf das Wohlbefinden von Menschen, Diplomarbeit am Institut für Tragwerksentwurf und -konstruktion, Universität Stuttgart.
- Szabó, István (1977): Höhere Technische Mechanik; Springer-Verlag.
- Theuwissen, Albert (1996): Solid-state imaging with charge coupled devices; Dordrecht: Kluwer Academic Publ.
- Vorbrich, K. (1995): The Real-Time Positioning with DGPS/IMU for Navigation Applications in Poland; in: High Precision Navigation 95; Proceedings of the 3rd International Workshop on High Precision Navigation; Apr. 1995; Stuttgart; Dümmler-Verlag, Bonn.
- Wagner, Walter; Erhof, Gerhard (1984): Praktische Baustatik; B. G. Teubner.
- Welsch, Dieter; Möhlenbrink, Wolfgang; Krzystek, Peter (1985): „Aktions-Reaktions-Analyse an Bauwerken“ in Proceedings zum 3. Internationalen Symposium Weitgespannte Flächentragwerke (SFB 64), Stuttgart, 1985.
- Welsch, Walter (1981): Gegenwärtiger Stand der geodätischen Analyse und Interpretation geometrischer Deformationen; Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 88.
- Welsch, Walter (1996): Geodetic analysis of Dynamic Processes: Classification and Terminology; paper submitted to the 8th International FIG-Symposium on Deformation Measurements; 25. - 28.6.1996, Honkong.
- Werner, H. (1966): Beitrag zur Talsperrenmeßtechnik, insbesondere zur Schachtlotung; Habilitationsschrift; Technische Universität Dresden.
- Wetzig, Volker; Zhuge, Hao (1984): Simulation of Strapdown Systems Errors and Error Compensation Methods; DFVLR-Mitt.84-22.
- Zeilfelder, Frank (1996): Interpolation und beste Approximation mit periodischen Splinefunktionen; Dissertation, Universität Mannheim.

Zunker, Lothar (1993): Transputerbasierter Lichtschnittsensor als Baustein eines Multisensor-Steuerungskonzeptes zur Echtzeit-Schweißprozeßführung und seine Integration in ein Roboterschweißsystem; Dissertation RWTH Aachen.

11.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Verwendete Teilwissenschaften bei Deformationsmessungen.....	10
Abbildung 2.2:	Bauwerk als dynamisches System.....	12
Abbildung 2.3:	Verbreitete Klassifizierung von Deformationsmodellen, nach (Pfeufer, 1993) und Heunecke (1994)	13
Abbildung 2.4:	Klassifizierung der Meßsysteme	14
Abbildung 2.5:	Vorgehensweise zur Messung und Auswertung von kinematischen Bauwerksdeformationen.....	17
Abbildung 2.6:	Einfache Meßkette zur Erfassung von Meßdaten mit digitalen Sensorsystemen.....	20
Abbildung 2.7:	Einfache Meßkette zur Erfassung von Meßdaten mit analogen Sensorsystemen	20
Abbildung 2.8:	Einfache Meßkette zur Erfassung von Meßdaten mit analogen Sensorsystemen durch integrierenden ADC.	21
Abbildung 2.9:	Funktionsschaubild eines digitalen Sensorsystems	22
Abbildung 3.1:	Verletzung des Abtasttheorems	25
Abbildung 3.2:	Zeit- und Wertediskretisierung.....	26
Abbildung 3.3:	Beispielsignal am Sensorausgang	27
Abbildung 3.4:	Tiefpaßgefiltertes Beispielsignal.....	27
Abbildung 3.5:	Zeitdiskretisiertes Beispielsignal.....	28
Abbildung 3.6:	Zeit- und wertediskretisiertes Beispielsignal.....	28
Abbildung 3.7:	Auswertung der Meßsignale.....	29
Abbildung 3.8:	Signalflußschema des FIR-Filters	30
Abbildung 3.9:	Signalflußschema des IIR-Filters	31
Abbildung 4.1:	Mechanisches Prinzipschaltbild eines induktiven Wegaufnehmers	33
Abbildung 4.2:	Durchlaßcharakteristik eines Tiefpasses	37
Abbildung 4.3:	Funktionsweise eines S&H-Gliedes	38
Abbildung 4.4:	Multiplexer	38
Abbildung 4.5:	Prinzip eines inkrementellen Wandler.....	39
Abbildung 4.6:	Binäre und Gray-Codierung für absolute direkte Wandler	39
Abbildung 4.7:	Funktionsprinzip eines Spannungs-Frequenz-Wandler	40
Abbildung 4.8:	Funktionsweise eines Singel-Slope A/D-Wandler.....	40
Abbildung 4.9:	Funktionsweise eines Dual-Slope A/D-Wandler	41
Abbildung 4.10:	a) Signal eines abtastenden ADC b) Signal eines integrierenden ADC	42
Abbildung 4.11:	Funktionsweise des echt integrierenden ADCs	42
Abbildung 4.12:	Funktionsweise eines parallelen A/D-Wandler	43
Abbildung 4.13:	A/D-Wandler aus D/A-Wandler mit Nachlaufverfahren.....	44
Abbildung 5.1:	Funktionsschaubild eines dezentralen Datenerfassungssystems mit Synchronisation über ein gemeinsames Triggersignal	46
Abbildung 5.2:	Funktionsschaubild eines dezentralen Datenerfassungssystems mit Synchronisation über ein gemeinsames Zeitsignal.....	47
Abbildung 5.3:	Funktionsschaubild eines dezentralen Datenerfassungssystems mit Synchronisation über die Korrelation der Daten	47
Abbildung 5.4:	Funktionsschaubild eines zentralen Datenerfassungssystems	48
Abbildung 6.1:	Typische Übertragungskennlinie einer Meßkette bei einer Temperatur, einem Druck,	50
Abbildung 6.2:	Gehäuseform des am IAGB verwendeten ESINS	58
Abbildung 6.3:	Das am IAGB verwendeten INS mit Anschlagtisch	58
Abbildung 6.4:	Skizze des Anschlagtisches	59
Tabelle 6.5:	Liste der Bestimmungsgleichungen	59
Abbildung 6.6:	Skizze der gemessenen Beschleunigungskomponente ${}^L_{bx}a$	61
Abbildung 6.7:	Skizze der gemessenen Drehratenkomponente ${}^L_{kx}k$	65
Abbildung 6.8:	Zusammenhang zwischen den Drehraten im Anschlagtischkoordinatensystem	68

Tabelle 6.9:	Wiederholbarkeit der 24-Lagen Kalibrierung (IAGB) und Genauigkeit der Kalibrierung bei SAGEM.....	76
Abbildung 7.1:	Überblick über die gesamte Brücke	78
Abbildung 7.2:	Längsschnitt der Brücke ca. im Maßstab 1:1400	79
Abbildung 7.3:	Querschnitt der Brücke ca. im Maßstab 1:100	79
Abbildung 7.4:	Meßbus mit zentraler Datenerfassung.....	80
Abbildung 7.5:	Skizze der an der Brücke angebrachten Sensoren (Längsansicht)	81
Abbildung 7.6:	Skizze der an der Brücke angebrachten Sensoren (Queransicht).....	81
Abbildung 7.7:	Befestigung der Wegaufnehmer an den Hauptträgern der Brücke.....	82
Abbildung 7.8:	a) Ansicht einer Zieltafel b) Blick der Kameras auf die Zieltafeln	83
Abbildung 7.9:	Anbringung des Beschleunigungsmessers, darunter die Zieltafel.....	84
Abbildung 7.10:	Signal des Dehnungsmeßstreifens während der Überfahrt des Meßzuges	84
Abbildung 7.11:	Beispiel für das Zeitsynchronsignal am 26.10. um 11:50:41 Uhr	85
Abbildung 7.12:	Bild der Kontrollkamera und Standpunkt des Theodolits	86
Abbildung 7.13:	Schema der Datenerfassung	86
Abbildung 7.14:	Deformation der Brücke im Feld I, Hauptträger 2 durch Belastungszug.....	88
Abbildung 7.15:	Überfahrt des Meßzuges.....	88
Abbildung 8.1:	Definition des Koordinatensystems an der Vennebeckbrücke	90
Abbildung 8.2:	theoretisch bestimmte Eigenschwingungen der Biegungen der Vennebeckbrücke	94
Tabelle 8.3:	Relative Amplituden der Eigenschwingungen in den Feldmitten.....	94
Abbildung 8.4:	Durch das Eigengewicht verursachte Biegelinie der Vennebeckbrücke	95
Abbildung 8.5:	Deformation der Vennebeckbrücke durch eine Einzellast bei $x_L = 28$ m	97
Abbildung 8.6:	Achslasten und Positionen der Achsen im Meßzug	97
Abbildung 8.7:	Deformation der Brücke bei Belastung durch den Meßzug an der Position $x_L = 28$ m.....	98
Abbildung 8.8:	Simulation der Meßwerte bei einer Zugüberfahrt mit $v = 200$ km/h.....	99
Abbildung 8.9:	Simulation der Meßwerte bei der Überfahrt einer Lok mit $v = 200$ km/h in den 3 Feldmitten.....	99
Abbildung 8.10:	Querschnittsmodell für Torsionsberechnung	100
Abbildung 8.11:	Torsion der Fahrbahn in Feldmitte durch eine Torsionslast an der Stelle x_L	104
Abbildung 8.12:	Torsion der Vennebeckbrücke durch eine Torsionslast bei $x_L = 28$ m.....	104
Abbildung 8.13:	Torsion durch Meßzug, Lok bei $x = 28$ m.....	105
Abbildung 8.14:	Berechnete Torsion in Feld I bei der Überfahrt einer Einzellast mit $v = 200$ km/h.....	105
Abbildung 8.15:	Berechnete Torsion in Feld I bei der Überfahrt des Meßzuges mit $v = 200$ km/h ..	106
Abbildung 8.16:	Berechnete Torsion in Feld II bei der Überfahrt des Meßzuges mit $v = 200$ km/h.	106
Abbildung 8.17:	Berechnete Torsion in Feld III bei der Überfahrt des Meßzuges mit $v = 200$ km/h.....	107
Abbildung 9.1:	Auswertung der Videobilder	108
Abbildung 9.2:	Gemessene Deformation der beiden Hauptträger in Feld II während der Überfahrt des Meßzuges mit $v = 200$ km/h bei unbelastetem Nebengleis	109
Abbildung 9.3:	Gemessene Deformation der beiden Hauptträger in Feld I während der Überfahrt des Meßzuges mit $v = 200$ km/h bei unbelastetem Nebengleis	110
Abbildung 9.4:	Gemessene Deformation der beiden Hauptträger in Feld III während der Überfahrt des Meßzuges mit $v = 200$ km/h bei unbelastetem Nebengleis	111
Abbildung 9.5:	Bestimmung der Biegung und Torsion aus den Hauptträgerbiegungen.....	111
Abbildung 9.6:	Biegung der Brücke in Feld I bei Überfahrt des Meßzuges mit 200 km/h und unbelastetem Nebengleis.....	113
Abbildung 9.7:	Biegung der Brücke in Feld II bei Überfahrt des Meßzuges mit 200 km/h und unbelastetem Nebengleis.....	113
Abbildung 9.8:	Biegung der Brücke in Feld III bei Überfahrt des Meßzuges mit 200 km/h und unbelastetem Nebengleis.....	114

Abbildung 9.9:	Torsion der Brücke in Feld I bei Überfahrt des Meßzuges mit 200 km/h und unbelastetem Nebengleis.....	114
Abbildung 9.10:	Torsion der Brücke in Feld II bei Überfahrt des Meßzuges mit 200 km/h und unbelastetem Nebengleis.....	115
Abbildung 9.11:	Torsion der Brücke in Feld III bei Überfahrt des Meßzuges mit 200 km/h und unbelastetem Nebengleis.....	115
Tabelle 9.12:	Abhängigkeit der maximalen Deformation von der Überfahrtgeschwindigkeit des Zuges.....	116
Abbildung 9.13:	Abhängigkeit der Deformation von der Überfahrtgeschwindigkeit.....	116
Abbildung 9.14:	Amplitudenspektrum der Biegeschwingungen bei Anregung auf Feld I.....	117
Tabelle 9.15:	Normierte Amplitudenbeträge der Biegeschwingung bei Anregung im Feld I.....	118
Abbildung 9.16:	Spektren der Kombinationssignale aus Feldern I und II bei Anregung in Feld I....	118
Abbildung 9.17:	Spektren der Kombinationssignale aus Feldern I und III bei Anregung in Feld I..	119
Abbildung 9.18:	Spektren der Kombinationssignale aus Feldern II und III bei Anregung in Feld I.	119
Tabelle 9.19:	Normierte Amplituden der Biegeschwingung.....	120
Abbildung 9.20:	Amplitudenspektrum der Biegeschwingungen bei Anregung auf Feld II.....	120
Tabelle 9.21:	Normierte Amplitudenbeträge der Biegeschwingung bei Anregung im Feld II.....	121
Abbildung 9.22:	Kombinationssignale aus Feldern I und II bei Anregung in Feld II.....	121
Abbildung 9.23:	Kombinationssignale aus Feldern I und III bei Anregung in Feld II.....	122
Abbildung 9.24:	Kombinationssignale aus Feldern II und III bei Anregung in Feld II.....	123
Tabelle 9.25:	Amplituden der Biegeschwingung bei Anregung im Feld II.....	123
Abbildung 9.26:	Amplitudenspektrum der Torsionsschwingung bei Anregung in Feld II.....	124
Tabelle 9.27:	Vergleich zwischen Theorie und Messung der Biegeschwingungen.....	125
Abbildung 9.28:	Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Eigenfrequenzen der Biegeschwingung.....	126
Tabelle 9.29:	Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Eigenfrequenzen der Torsionsschwingungen.....	126

Danksagung

All denen, die beim Zustandekommen der vorliegenden Dissertation in vielfältiger Art und Weise Anteil gehabt haben, gilt mein aufrichtiger und herzlicher Dank.

Dies gilt insbesondere an Herr em. Prof. Dr.-Ing. Dr. sc. Techn. h.c. Dr. h.c. Klaus Linkwitz für die Übernahme des Hauptberichtes sowie für die Unterstützung, die zum Anfertigen einer solchen Arbeit notwendige Voraussetzung ist.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Prof. i. R. Eberhard Luz und bei Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Möhlenbrink für die Übernahme des Mitberichtes herzlich bedanken.

Meiner Schwester Christine und ihrem Mann Udo danke ich für die Durchsicht des Manuskriptes.

Nicht zuletzt danke ich meiner Frau Gabriela und meinen Kindern Pascal und Sandra für die Rücksichtnahme und die Geduld in den zurückliegenden Jahren, ohne die die Fertigstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre.