

Brückenbewegungen an Stahlbrücken

T 2279

T 2279

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

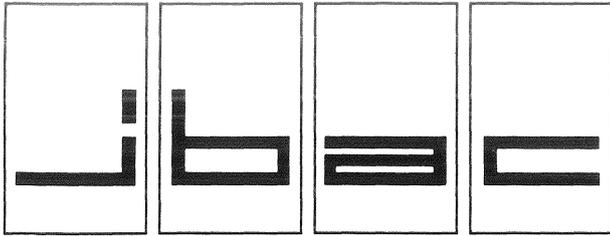
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

16.43



INSTITUT FÜR BAUFORSCHUNG

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Direktoren: Professor Dr.-Ing. H. R. Sasse · Professor Dr.-Ing. P. Schießl

Schinkelstraße 3, D-5100 Aachen

Telefon (02 41) 80-5100 · Telex 832 704 thac d · Telefax (02 41) 80-5120

THEMA

Brückenbewegungen an
Stahlbrücken

ABSCHLUSSBERICHT

Forschungsbericht Nr.

F 1 9 2

Projektleiter

Prof. Dr.-Ing. H. R. Sasse

Sachbearbeiter

Dipl.-Ing. M. Breitbach
Dr.-Ing. M. Fiebrich
Prof. Dr.-Ing. J. Müller-Rochholz
(FH Münster)

Auftraggeber/
Förderer

Institut für Bautechnik
Reichpietschufer 74-76

1000 Berlin 30

Auftragsdatum
Aktenzeichen

06.04.1984

IV/1-5-363/83

Dieser Bericht umfaßt **186** Seiten, davon **141** Textseiten.
Soweit Versuchsmaterial nicht verbraucht ist, wird es nach 4 Wochen vernichtet.
Eine längere Aufbewahrung bedarf einer schriftlichen Vereinbarung.
Die auszugsweise Veröffentlichung dieses Berichtes, seine Verwendung für Werbezwecke sowie die inhaltliche Übernahme in Literaturdatenbanken bedürfen der Genehmigung des ibac.

<u>INHALTSVERZEICHNIS</u>		Seite
0	BEGRIFFE.....	01
0.1	Definitionen und Erläuterungen.....	01
0.2	Formelzeichen.....	08
1	EINFÜHRUNG.....	1
1.1	Problemstellung.....	1
1.2	Ziele.....	2
1.3	Vorgehensweise.....	2
2	KENNTNISSTAND.....	3
2.1	Verschleißkenngrößen von Gleitlagern.....	3
2.1.1	Grundlegende Zusammenhänge zwischen Reibungszahl und Beanspruchungsparametern.....	4
2.1.2	Verschleißmechanismen - Verschleißerscheinungsformen....	6
2.2	Betriebsbeanspruchungen von Brückengleitlagern.....	8
2.2.1	Lagerbewegungen infolge Temperatur.....	10
2.2.2	Lagerbewegungen infolge stochastischer Bauwerksanregung (Verkehr).....	14
3	BRÜCKENBAUWERK FÜR EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN (IN SITU-MESSUNGEN).....	19
3.1	Auswahlkriterien.....	19
3.1.1	Koordination mit anderen Forschungsprojekten.....	19
3.2	Bauwerksbeschreibung und Brückenlager.....	20
4	UNTERSUCHUNGSUMFANG.....	24
4.1	Konzeption der Meßeinrichtung.....	24
4.2	Kalibrierung der Meßeinrichtung.....	26
4.3	Probelauf im Bauwerk.....	26
4.4	Bauwerksuntersuchungen.....	26

	Seite
4.4.1	Dauerbetrieb..... 26
4.4.2	Dokumentation des Lagerzustands..... 26
5	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN..... 27
5.1	Vorversuche..... 27
5.2	Hauptversuche..... 29
5.2.1	Rahmenplan und Versuchsumfang..... 29
5.2.2	Meßeinrichtung..... 30
5.2.2.1	Anforderungskatalog..... 30
5.2.2.2	Wegaufnehmersystem..... 31
5.2.2.3	Temperatursensoren..... 34
5.2.2.4	Meßwerterfassung und -verarbeitung..... 36
5.2.2.5	Kalibrierung..... 41
5.2.2.5.1	Laborversuche..... 41
5.2.2.5.2	In situ-Probelauf..... 42
5.2.2.5.3	Schlußfolgerungen..... 44
5.2.3	Dauermessungen..... 44
5.2.4	Dokumentation des Lagerzustands..... 45
6	MESSERGEBNISSE..... 47
6.1	Lagerbewegungen an Gleitlagern..... 47
6.1.1	Allgemeines zur Auswertung..... 47
6.1.2	Stündlicher Lagersummenweg..... 47
6.1.3	Täglicher Lagersummenweg..... 54
6.1.3.1	Täglicher Lagersummenweg differenziert nach Kalendertagen..... 54
6.1.3.2	Täglicher Lagersummenweg differenziert nach Wochentagen 6.1.3.3 Wochentägliche Lagersummenwege in den Kalendermonaten 1986 und 1987..... 61
6.1.3.4	Wochentäglicher Lagersummenweg in ausgewählten Kalender- wochen des Meßzeitraums..... 67
6.1.3.5	Täglicher Lagersummenweg in ausgewählten Kalender- monaten des Meßzeitraums..... 69
6.1.3.6	Zusammenfassung..... 74
6.1.4	Extrapolation des jährlichen Lagersummenwegs..... 76
6.1.5	Lagerverschiebungen..... 77
6.1.5.1	Statistische Verteilung der Einzelverschiebungen..... 77
6.1.5.2	Jährlicher Lagersummenweg differenziert nach Verschie- bungsklassen..... 81
6.1.6	Gleitgeschwindigkeiten..... 82
6.1.7	Auflagerdrehwinkel..... 87
6.1.8	Winkelgeschwindigkeiten..... 89
6.2	Bauwerkstemperaturen..... 91

	Seite
6.2.1	Allgemeines zur Auswertung..... 91
6.2.2	Bauwerkstemperaturen an ausgewählten Querschnitts- bereichen und Lufttemperatur..... 93
6.2.3	Extreme Bauwerkstemperaturen..... 95
6.2.4	Zusammenfassung..... 98
7	DOKUMENTATION DES LAGERZUSTANDES..... 99
7.1	Gleitplatten..... 99
7.1.1	Visuelle Bemusterung..... 99
7.1.2	Ausgewählte Rauhtiefenprofile..... 104
7.2	PTFE-Scheiben und -Führungsleisten..... 107
7.2.1	Visuelle Bemusterung..... 107
7.2.2	Ausgewählte Rauhtiefenprofile..... 109
7.2.3	Verschleißbetrag..... 111
8	DISKUSSION..... 113
8.1	Einflüsse auf die Lagerverschiebungen..... 113
8.2	Temperatur..... 116
8.3	Lagerverschiebungen..... 118
8.4	Gleitgeschwindigkeiten..... 119
8.5	Auflagerdrehwinkel und Winkelgeschwindigkeiten..... 120
9	BAUPRAKTISCHE SCHLUSSFOLGERUNGEN..... 121
10	ZUSAMMENFASSUNG..... 123
11	LITERATURVERZEICHNIS..... 125

0 BEGRIFFE

Für die in diesem Forschungsbericht zu untersuchenden Zusammenhänge gelten die nachfolgend aufgeführten Abkürzungen (Formelzeichen), Definitionen und Erläuterungen. Die Begriffsbestimmungen sind soweit wie möglich geltenden Regelwerken entnommen.

0.1 Definitionen und Erläuterungen

Anfahrreibung, Anlaufreibung, Haftreibung:

Reibung zu Beginn der Gleitbewegung, die als Schwellenwert zu überwinden ist /42/

Auflagerdrehwinkel, Lagerverdrehung:

Relativverdrehung des Überbaus gegenüber dem Unterbau orthogonal zur Hauptverschieberichtung /2, 15/

Beanspruchungskollektiv:

Die beim Verschleißvorgang wirkende Bewegungsform und der zeitliche Bewegungsablauf sowie die technisch-physikalischen Beanspruchungsparameter (Normalkraft, Gleitgeschwindigkeit, Temperatur, Beanspruchungsdauer) /43/

Dilatationsabschnitt:

Achsabstand zwischen einem Festlager (unverschiebliches Lager) und einem Gleitlager

Direkte Verschleißmeßgröße:

Maße für die Gestalt- oder Masseänderung eines verschleißenden Körpers /44/

Festkörperreibung:

Reibung bei unmittelbarem Kontakt der Reibpartner /42/

Flüssigkeitsreibung:

Reibung in einem die Reibpartner lückenlos trennenden, flüssigen Film, der hydrostatisch oder hydrodynamisch erzeugt werden kann /42/

Grenzreibung:

Reibung, bei der die Oberflächen der Reibpartner mit einem molekularen, von einem Schmierstoff stammenden Film, bedeckt sind /42/

Gleitreibung:

Bewegungsreibung zwischen Bauteilen, die in ihrer Berührungsfläche unterschiedliche translatorische Geschwindigkeiten aufweisen /42/

Gegenkörper:

Das (über andere Bauteile) in der Regel mit dem Überbau verankerte Bauelement, das Relativbewegungen gegenüber dem Grundkörper erfährt /2/

Gegenwerkstoff:

Austenitisches Stahlblech X5CrNiMo 17122 oder früher auch POM (Polyoxymethylen) bzw. Hartchrom für gekrümmte Kalottenflächen /2/

Gleitgeschwindigkeit v (Verschiebegeschwindigkeit):

Geschwindigkeit zweier sich im Gleitzustand berührende Bauteile relativ zueinander

Gleitlager:

Zwischenbauteil aus zwei Festkörpern mit (und ohne) Zwischenschicht, das Zwängungen durch Relativbewegungen dieser Körper abbaut

Gleitverschleiß:

Bei Verschleißvorgängen infolge Gleitreibung wirken die folgenden Verschleißmechanismen einzeln oder kombiniert: Adhäsion, Abrasion, Oberflächenzerrüttung, tribochemische Reaktionen /43/

Gleitweg:

s. Lagerverschiebung

Gleitwerkstoff:

PTFE (Polytetrafluorethylen) bzw. Mehrschichtstoff P1 gemäß DIN 1494 Teil 4 für Führungsflächen /2/

Grundkörper:

Das Bauelement eines Gleitlagers, auf das die Relativbewegungen bezogen werden; bei Brückengleitlagern ist der Grundkörper in der Regel über andere Bauteile mit dem Unterbau verankert /2/.

Gruppenpfeiler (Grunewaldbrücke):

Pfeiler mit hoher Steifigkeit, auf dem jeweils eine rd. 439 m lange Stahl- und eine rd. 577 m lange Spannbetonhohlkastenbrücke anschließen (Bilder 4a und 4b).

Indirekte Verschleißmeßgröße:

Angabe einer verschleißbedingten Gebrauchsdauer /44/

Lager:

Bauelemente (Zwischenbauteile), die eine Lagerung konstruktiv realisieren /15/

Lagerbewegung:

Lagerverschiebungen und Lagerverdrehungen /15/

Lagerlast F_z :

Summe aller Lasten normal zur Lagerebene /15/

Lagerspiel:

Bewegungsmöglichkeit innerhalb des Bauelements, die nicht zur Aufnahme planmäßiger Lagerbewegungen oder als Bewegungsreserve herangezogen werden darf /2/

Lagersummenweg (aufsummierter Gleitweg):

Aufsummierte positive und negative Lagerverschiebungen innerhalb eines Zeitintervalls

Lagerverdrehung (Auflagerdrehwinkel):

Rotationsbewegung des Lagers orthogonal zur Hauptverschieberichtung /15/

Lagerverschiebung, Gleitweg:

Relativbewegung zwischen Gleit- und Gegenwerkstoff in der Hauptverschiebungsrichtung des Bauwerks /13, 15/

- Positive Lagerverschiebung: Relativbewegung des Gegenkörpers im Sinne einer Verlängerung des Überbaus in der Gleitebene
- Negative Lagerverschiebung: Relativbewegung des Gegenkörpers im Sinne einer Verkürzung des Überbaus in der Gleitebene

Lagerwiderstand:

Einer Relativbewegung entgegenwirkende Schnittgröße (Nebenschnittgröße) /13, 15/:

- Verformungswiderstand bei Verformungselementen (Elastomerlager)
- Roll- und Gleitwiderstand (Bewegungswiderstand) bei Bewegungselementen (Gleitlager)

Linkes Lager (Grunewaldbrücke):

Lager unter der linken Fahrspur in Fahrtrichtung Düsseldorf (Bild 46)

Mischreibung:

Reibung, bei der Festkörperreibung und Flüssigkeits- bzw. Gasreibung nebeneinander vorliegen /42/

POM:

Polyoxymethylen

Pressung:

Mittlere Pressung in der Lagerfuge, bezogen auf die geometrische (nominelle) Lagerfläche A /2/

Rechtes Lager (Grunewaldbrücke):

Lager unter der rechten Fahrspur in Fahrtrichtung Duisburg (Bild 46)

Reibung:

Reibung wirkt der Relativbewegung sich bewegender Körper entgegen. (Diese Definition beinhaltet nicht die sogenannte "innere Reibung", bei der eine Relativbewegung von Volumenelementen innerhalb von festen, flüssigen oder gasförmigen Körpern auftritt.) /42/

Reibungsarbeit A_R :

Die zur Überwindung der Reibung notwendige und größtenteils in Wärme (Reibungswärme) umgewandelte Arbeit /42/

Reibungsebene, Lagerebene, Gleitebene:

Geometrischer Ort der Reibungsfläche

Reibungsfläche, Grundfläche der Gleitebene, Tribokontaktfläche:

Geometrische Kontaktfläche zwischen Grundkörper und Gegenkörper ohne Berücksichtigung des Flächenanteils der Schmierstoffspeicher /2, 43/

Reibungskraft F_R :

Kraft, die infolge der Reibung als mechanischer Widerstand gegen eine Relativbewegung auftritt /42/

Reibungsleistung P_R :

Die zur Überwindung der Reibung notwendige Leistung $P_R = F_R \cdot v$ /42/

Reibungszahl f :

Quotient aus Reibungskraft F_R und der Last normal zur Lagerebene F_Z /42, 45/:

$$f = \frac{F_R}{F_Z}$$

Ruhreibung (Haftreibung, statische Reibung, Anfahrreibung):

Reibung zwischen relativ zueinander ruhenden Körpern, bei denen die angreifende Kraft oder das angreifende Moment nicht ausreicht, um eine Relativbewegung hervorzurufen /42/

Schmierstoff (Zwischenstoff):

Siliconfett /2/

Schwingungsverschleiß:

Bei translatorisch oszillierenden Gleitvorgängen wirken die folgenden Verschleißmechanismen einzeln oder kombiniert: Adhäsion, Abrasion, Oberflächenzerrüttung, tribochemische Reaktionen /43/

Stick-slip:

Bewegungsvorgang, der alternierend Ruhen und Gleiten umfaßt

Tribologische Beanspruchung:

Beanspruchung der Oberfläche eines festen Körpers durch Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers /43/

Tribosystem:

Zusammenwirken aller am Verschleißvorgang beteiligten Körper, Stoffe, Medien sowie das Beanspruchungskollektiv und die daraus resultierenden Verschleißkenngrößen /43/

Verschleiß:

Verschleiß ist der fortschreitende Materialverlust an der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d. h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers /43, 44/.

Verschleißarten:

Unterscheidung der Verschleißvorgänge nach der Art der tribologischen Beanspruchung /43/

- Gleitverschleiß
- Schwingungverschleiß

Verschleißbetrag W:

Längen-, Flächen-, Volumen- oder Masseänderung des verschleißenden Körpers (W: Wear) /44/

Verschleißerscheinungsform:

Die sich durch Verschleiß ergebenden Veränderungen der Oberflächenschicht eines Körpers sowie Art und Form der anfallenden Verschleißpartikel /43/

Verschleißkenngröße:

Verschleißerscheinungsformen und Verschleiß-Meßgrößen /43, 44/

Verschleißmechanismus:

Die beim Verschleißvorgang ablaufenden physikalischen und chemischen Prozesse /43/

Verschleiß-Meßgrößen:

Direkte und indirekte Kennzeichnung der Gestalt- und Masseänderung eines Körpers infolge Verschleiß /44/

0.2 Formelzeichen

A	Grundfläche der Gleitebene
A_0	Tribokontaktfläche
A_R	Reibungsarbeit
D_{LP}	Diagonale oder Durchmesser der Gleitplatte
f	Reibungszahl
F_R	Reibungskraft
F_{xy}	Resultierende Last in der Lagerebene
F_Z	Summe aller Lasten normal zur Lagerebene
G	Eigenlast
H	Horizontallast
h	Spalthöhe (Gleitwerkstoffüberstand über die Aufnahme im unbelasteten Zustand einschließlich Farbauftrag)
L	Durchmesser oder Diagonale der PTFE-Scheibe
μ	Reibungsbeiwert (vgl. Reibungszahl)
ω	Winkelgeschwindigkeit
P	Verkehrslast
P_R	Reibungsleistung
R	Spannweite
ΣS	Lagersummenweg
s	Sekunde
σ	Pressung in der Gleitebene
T	Temperatur
t	Dicke des Gleitwerkstoffs im unbelasteten Zustand
t_B	Beanspruchungsdauer
Θ	Auflagerdrehwinkel
u	Verschiebung
V	Vertikallast (vgl. F_Z)
v	Variationskoeffizient
v	Gleitgeschwindigkeit
W	Verschleißbetrag
\bar{x}	Mittelwert
x	Median

1 EINFÜHRUNG

1.1 Problemstellung

Gleitlager für den Brückenbau unterliegen in der Bundesrepublik Deutschland der bauaufsichtlichen Zulassungspflicht durch das Institut für Bautechnik, Berlin (IfBt). Der Nachweis der Brauchbarkeit eines Gleitlagers für den vorgesehenen Verwendungszweck erfolgt im Rahmen von Eignungs- bzw. Zulassungsversuchen, deren Umfang in den "Bedingungen für die bauliche Durchbildung und Überwachung (Güteüberwachung) von PTFE-Gleitlagern" geregelt ist /1/. Eine entsprechende Norm wird derzeit beraten /2/. Die Qualitätssicherung eines zugelassenen Lagerbauteils und deren Baustoffe für Gleitelemente Polytetrafluorethylen (PTFE), austenitisches Stahlblech, Schmierstoff, u. a. ist durch die Güteüberwachung (Eigen- und Fremdüberwachung) gegeben. Art und Umfang der Güteüberwachung sind ebenfalls in /1/ festgelegt.

Trotz aufwendiger Eignungsversuche im Rahmen der bauaufsichtlichen Zulassungsverfahren und kostenintensiver Güteüberwachungsmaßnahmen werden immer wieder Schäden an den Gleitelementen der Lager nach relativ kurzer Betriebsdauer festgestellt, wodurch ein Auswechseln der Lager vor der planmäßigen Betriebsdauer erforderlich wird /3/.

Das Gleitreibungsverhalten der Reibpaarungen wird bei den Zulassungsversuchen in sogenannten Modell-Lager-Versuchen ermittelt, als Bewertungskriterien dienen dabei vorrangig die bei definierten Beanspruchungsparameterkombinationen (aus den Faktoren Lagersummenweg, Gleitweg, Gleitgeschwindigkeit, Temperatur, u. a.) gewonnenen Reibungszahlen /1/. Die Größe der Beanspruchungsparameter beruht vorrangig auf empirischen Annahmen, die im Laufe der letzten Jahrzehnte in der Gleitlagertechnologie gewonnen wurden /4/. Sie sind nicht das Ergebnis systematischer experimenteller Untersuchungen an Brückengleitlagern im praktischen Betrieb, die bisher nicht existieren bzw. in der Literatur dokumentiert sind. Die derzeitigen Kenntnisse über die Reibungs- und Verschleißmechanismen im "Tribologischen System Brückengleitlager" erlauben keine gesicherten Aussagen über die zu erwartende Betriebsdauer eines Gleitlagers sowie über die temporär veränderlichen Reibungszahlen im Bauwerk auf der Grundlage der Zulassungsversuchsergebnisse.

1.2 Ziele

Hauptziel des vorliegenden Vorhabens ist die Formulierung der in Brückengleitlagern unter Stahlbrücken tatsächlich auftretenden Beanspruchungsparameter infolge Temperaturänderungen und Verkehrslasten. Durch Messung der Relativverschiebungen des Brückenüberbaus zum Widerlager (Gruppenpfeiler)

- in Höhe der Gleitebene und
- in definiertem vertikalen Abstand von der Lagerebene

am Endquerträger sollen die absoluten Größen sowie die statistischen Verteilungen von

- Einzelverschiebungen und -verdrehungen
- Verschiebegeschwindigkeiten
- Winkelgeschwindigkeiten
- Lagersummenwegen (aufsummierte Gleitwege)

ermittelt werden. Die Größe und Verteilung der Meßgrößen sollen auf ihre mögliche Abhängigkeit von definierten Zeiträumen wie (Tag, Monat, Quartal, u. a.) untersucht werden.

Durch Temperaturmessungen am Bauwerk soll eine Abschätzung des temperaturinduzierten Anteils an den Lagerverschiebungen ermöglicht werden. Es soll geprüft werden, ob und inwieweit die aufgenommenen Temperaturganglinien des Bauwerks mit den zugehörigen Klimadaten korrelierbar sind.

1.3 Vorgehensweise

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden die Lagerbewegungen und Temperaturen an der Grunewaldbrücke, Duisburg, gemessen. Die in situ Messungen umfaßten einen Meßzeitraum von rd. 1 Jahr (rd. 330 d innerhalb von 23 Monaten).

Über vergleichbare Untersuchungen an einer Spannbetonbrücke (Brohltalbrücke) und einer Stahl-Verbundbrücke (Eifeltorbrücke) berichten die Autoren im Rahmen eines vom Bundesminister für Verkehr (BMV) geförderten Vorhabens /5/. An der Brohltalbrücke wurden die Messungen über einen Zeitraum von rd. 1 Jahr durchgeführt, während die Untersuchungen an der Eifeltor-

brücke auf Einzelmessungen an insgesamt 7 ausgewählten Tagen beschränkt waren. Dort konnten neben den Lagerverschiebungen zusätzlich mit Hilfe eines zuvor eingebauten Kraftmeßlagers Vertikallasten im Lager infolge Verkehr registriert werden /5/.

Die Anforderungen an die Meßeinrichtung für den Dauerbetrieb an der Grunewaldbrücke wurden zuvor in Vorversuchen ermittelt. Unter Berücksichtigung der vorgegebenen Zielsetzung ergaben diese Vorversuche, daß die Anforderungen an die Meßwerterfassung von keiner marktüblichen Meßeinrichtung abgedeckt werden. Daher wurden zeitaufwendige Test- und Erprobungsphasen im Labor und am Bauwerk erforderlich, um die von der Industrie entwickelten elektronischen Bauteile einschließlich der zugehörigen, äußerst komplexen Software für die spezifischen Anforderungen des Vorhabens zu optimieren.

2 KENNTNISSTAND

2.1 Verschleißkenngrößen von Gleitlagern

Für die Funktionsfähigkeit und Dauerhaftigkeit eines Gleitlagers im praktischen Betrieb sind die temporären Reibungszahlen (Zeitfunktion der Reibungszahl) und das Verschleißverhalten von vorrangiger Bedeutung. Die Reibungszahl und die das Verschleißverhalten charakterisierenden Merkmale (Verschleißerscheinungsformen und Verschleiß-Meßgrößen, s. Abschn. 0.1) werden von den Beanspruchungen und den Gleitpaarungswerkstoffen des tribologischen Systems Gleitlager beeinflusst. Zu den wichtigsten Beanspruchungsparametern zählen u. a.

- die Gleitgeschwindigkeit
- der Lagersummenweg
- die Lagerpressung
- die Lagertemperatur.

Die bei zugelassenen Gleitteilen von Brückenlagern verwendeten Werkstoffpaarungen umfassen

- Polytetrafluorethylen (PTFE)
- austenitisches Stahlblech (X5CrNiMo 17 122), früher auch Polyoxymethylen (POM)
- Siliconfett.

An dieser Stelle werden lediglich die grundlegenden Funktionalitäten zwischen wichtigen Beanspruchungsparametern und den Reibungszahlen sowie dem Verschleißverhalten zusammenfassend dargestellt. Aufgrund der überwiegenden Verwendung von austenitischem Stahlblech als Reibpartner konzentriert sich der Kenntnisstand über Verschleißkenngrößen wesentlich auf diesen Reibpartner. Die in diesem Bericht beschriebenen Untersuchungen erfolgten an Gleitlagern mit POM als Reibpartner. Die grundlegenden Funktionalitäten dieser Reibpaarung gegenüber solchen mit austenitischem Stahl bleiben jedoch erhalten.

2.1.1 Grundlegende Zusammenhänge zwischen Reibungszahl und Beanspruchungsparametern

Aus umfangreichen Laboruntersuchungen an sogenannten Modell-Lagern ist die Abhängigkeit der Reibungszahl von wichtigen Beanspruchungsparametern für die in Brückengleitlagern verwendete Werkstoffpaarung hinreichend bekannt /4, 6, 7/. Mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit steigt die Reibungszahl an, bei Gleitgeschwindigkeiten oberhalb von 1 mm/s nimmt die Reibungszahl mit steigender Gleitgeschwindigkeit progressiv zu.

Zu Beginn einer Gleitbewegung stellt sich eine relativ große Reibungszahl, die sogenannte Haftreibungszahl (s. Abschn. 0.1), ein. Die Reibungszahl fällt nach kurzer Gleitbewegung rasch auf ein temporäres Minimum ab. Danach steigt die Reibungszahl mit zunehmendem Lagersummenweg (s. Abschn. 0.1) langsam an. Mit zunehmender Pressung sinkt die Reibungszahl. Tiefe Temperaturen führen zu einer Erhöhung der Reibungszahl. Bei dem Temperatureinfluß auf die Reibungszahl spielt die Zusammensetzung des Schmierstoffs eine wesentliche Rolle.

Favre et al berichten über in situ Reibungsversuche an einem Gleitlager der Sihlhochstraße in Zürich /8/. Zum Zeitpunkt der Messungen ist die Brücke bereits 2 Jahre alt, jedoch noch nicht für den Verkehr freigegeben. Über starr mit dem Überbau verbundene Rahmenkonstruktionen werden hydraulisch gesteuerte Pressen beiderseits eines Pfeilers in Brückenlängsrichtung angeordnet. Der Pfeiler wird über die Pressen in Brückenlängsrichtung hin- und herbewegt. Die Auslenkung beträgt bei den Versuchen zwischen ± 4 mm und

± 6 mm, die Verschiebegeschwindigkeit wird konstant jeweils zwischen 0,07 mm/s und 0,20 mm/s aufgebracht. (Die niedrigen Gleitgeschwindigkeiten sollen die langsamen Temperaturdehnungen des Überbaus simulieren.) Nach Erreichen der vorgesehenen Pfeilerkopfauslenkung wird die Horizontalkraft solange konstant gehalten, bis keine Lagerverschiebung mehr registriert werden kann. Die Autoren erklären die Zunahme der Lagerverschiebung mit dem Kriechen des PTFE, die "Kriechdehnungen" erreichten Werte von 1 mm bis 2 mm. Aus den Versuchen werden Reibungszahlen zwischen 0,008 und 0,037 angegeben; die rechnerische Reibungszahl entsprechend den Zulassungsbescheiden des IfBt beträgt für den dort eingebauten Gleitlagertyp bei einer mittleren Pressung von 26 N/mm² rd. 0,036. Die teilweise deutlich niedrigeren Reibungszahlen werden auf das Kriechverhalten des PTFE zurückgeführt. Die Autoren betonen, daß in der Praxis ausreichend lange Ruhephasen zwischen wenigen Minuten und einigen Stunden vorliegen würden und wesentlich langsamere Gleitgeschwindigkeiten infolge Temperaturdehnung zu erwarten sind.

Im Rahmen eines im ibac bearbeiteten Forschungsvorhabens /9/ werden Reibungsversuche an ganzen Brückengleitlagern nach einer Betriebsdauer zwischen 10 und 20 Jahren durchgeführt. Die Lager wurden aus Spannbeton-, Stahlbeton- und Stahlbrücken mit Spannweiten zwischen 25 m und 50 m ausgebaut. Die Reibungsversuche wurden unter der rechnerischen mittleren Pressung infolge Eigenlast und maximaler Verkehrsbelastung gemäß der jeweiligen Lagerstatik durchgeführt. Die mittlere Gleitgeschwindigkeit beträgt in Anlehnung an die Prüfparameter nach /1/ 0,4 mm/s. Fallweise werden Versuche mit variierender Gleitgeschwindigkeit gefahren. Die Belastungszeit vor Beginn der ersten Verschiebung beträgt rd. 20 h, die Versuche werden bei einer Lagertemperatur von +21 °C und -20 °C durchgeführt. Während der Reibungsversuche werden in der Regel keine "Ruhephasen" eingelegt.

Grundsätzlich kann die aus Modell-Lager-Versuchen bekannte Reibungscharakteristik /z. B. 6/ der Gleitlager auch nach langer Betriebsdauer bestätigt werden, dabei liegen alle Reibungszahlen (Haftreibungszahlen) unterhalb der zulässigen Rechenwerte aus den bauaufsichtlichen Zulassungen. Im Mittel sind die Reibungszahlen in Abhängigkeit von der mittleren Pressung nur halb so groß wie die Zulassungswerte. Lediglich bei niedrigen Pressungen und tiefen Temperaturen liegen vereinzelte Versuchsergebnisse im Bereich der

zulässigen Rechenwerte. Bei Temperaturen unterhalb $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ muß daher mit einem Überschreiten der zulässigen Rechenwerte gerechnet werden. Schmiermittelverluste sowie Alterungseinflüsse des Schmiermittels (Verunreinigung, Konsistenzveränderung, u. a.) können als Ursache nicht ausgeschlossen werden, wengleich durch die fallweise durchgeführte Schmierstoff-Analyse nach dem Öffnen der Lager ein Schmierstoffanteil zwischen 57 M.-% und 94 M.-% ermittelt werden konnte (d. h. Verunreinigungen zwischen 6 M.-% und 43 M.-%). Die wesentlichen Anteile am Schmierfett, Lithiumseife und Siliconöl, waren noch vorhanden.

Oberhalb einer Gleitgeschwindigkeit von $0,4\text{ mm/s}$ (Gleitgeschwindigkeit der Zulassungsversuche /1/) steigt die Haftreibungszahl stark an, ein exponentieller Zusammenhang kann vermutet werden. Dynamische Vertikalbelastung während einer Ruhephase führt ebenfalls zur progressiven Zunahme der Haftreibungszahl. Aus den in /9/ erläuterten Versuchsergebnissen kann vermutet werden, daß die von Favre et al /8/ geäußerte Annahme (daß die ermittelten geringen Haftreibungszahlen auf Kriecheinflüsse des PTFE zurückzuführen seien) nicht zutrifft. Die geringeren Reibungszahlen bei ganzen Lagern (auch nach einer Betriebsdauer von 10 bis 20 Jahren) sind vielmehr im veränderten tribologischen Verhalten (u. a. die Pressungsverteilung in der PTFE-Scheibe /9/) der Lager zu vermuten. Dieses für die Baupraxis wichtige Phänomen bedarf noch ausführlicher Untersuchungen.

2.1.2 Verschleißmechanismen – Verschleißerscheinungsformen

Hauptsächlich werden bei PTFE-Gleitlagern zwei Verschleißerscheinungsformen unterschieden /6/. Bei hohen Scherkräften werden größere Kristalleinheiten des Gleitwerkstoffes (meist PTFE, s. Abschn. 0.1) von mehreren Mikrometern Dicke auf den Gegenwerkstoff (meist Stahlblech, s. Abschn. 0.1) übertragen. Geringe Scherkräfte bewirken vermutlich Relativbewegungen dünner plattenförmiger Molekülketten von wenigen Zehntel Nanometer (10^{-9} m) Dicke, wobei ein Film stark orientierter Molekülketten von 10 bis 40 nm Dicke auf den Gegenwerkstoff übertragen wird.

Bei niedrigen Gleitgeschwindigkeiten wird ein Einfluß der Molekülkettenorientierung auf die Reibungszahl registriert. Lagerverschiebungen ortho-

gonal zur Orientierung rufen um rd. 30 % höhere Reibungszahlen gegenüber Verschiebungen parallel zu den Molekülketten hervor.

Zur Erniedrigung der Reibungszahlen werden die Reibpartner (PTFE, austenitisches Stahlblech) mit Siliconfett geschmiert. Um eine möglichst dauerhafte Nachschmierung zu erreichen, sind in der PTFE-Scheibe siliconfettgefüllte Schmiertaschen angeordnet. Die Abmessungen, die Geometrie und die Anordnung der Schmiertaschen ist in den Zulassungen geregelt.

Bei länger andauernden oszillierenden Verschiebungen mit kleinen Amplituden ($\leq 50 \mu\text{m}$) tragen die Schmierstofftaschen aufgrund ihrer Anordnung vermutlich nicht zu einer ausreichenden Nachschmierung bei /10/. In diesem Zustand (vermutlich ungenügender Schmierung) ist dann mit einem verhältnismäßig starken Anstieg der Reibungszahlen und des Verschleißbetrages als Folge eines partiellen Überganges von der Misch- zur Trockenreibung (s. Abschn. 0.1) zu rechnen.

Der jährliche Verschleißbetrag eines Brückengleitlagers kann durch eine der Reibungsleistung ähnelnde Größe $p \cdot v$ (mittlere Pressung in der Gleitebene \cdot Gleitgeschwindigkeit) wesentlich charakterisiert werden /11/. Dieser Zusammenhang geht aus Versuchen mit konstanter translatorischer Verschiebungsamplitude hervor. Der Verschleiß steigt oberhalb eines $p \cdot v$ -Wertes von rd. $10 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{mm/s}$ linear mit dem $p \cdot v$ -Wert an. (Der $p \cdot v$ -Wert der Zulassungsversuche beträgt konstant $12 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{mm/s}$.) In vergleichbaren Versuchen wird eine lineare Zunahme des Verschleißbetrages mit dem aufaddierten Gleitweg (Lagersummenweg) festgestellt /6/.

Der Einfluß der Größe der Verschiebungsamplitude wird fallweise anhand rotatorisch oszillierender Gleitbewegungen mit Amplituden von 4,5 mm und 8,0 mm in /12/ untersucht. Die Gleitgeschwindigkeit wird zwischen 0,25 mm/s und 1,75 mm/s variiert. Mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit nimmt bei den Versuchen mit der Amplitude 4,5 mm der Verschleißbetrag bis zu einer Gleitgeschwindigkeit von rd. 1,0 mm/s ($p \cdot v = 2 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{mm/s}$) stetig ab. Oszillierende Gleitbewegung mit einer Amplitude von rd. 8 mm führt zu einer Abnahme des Verschleißbetrages bis zu einer Geschwindigkeit von rd. 0,5 mm/s ($p \cdot v = 4 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{mm/s}$); höhere Geschwindigkeiten führen dann bei beiden Versuchen zu einer progressiven Zunahme des Verschleißbetrages (Bild 1).

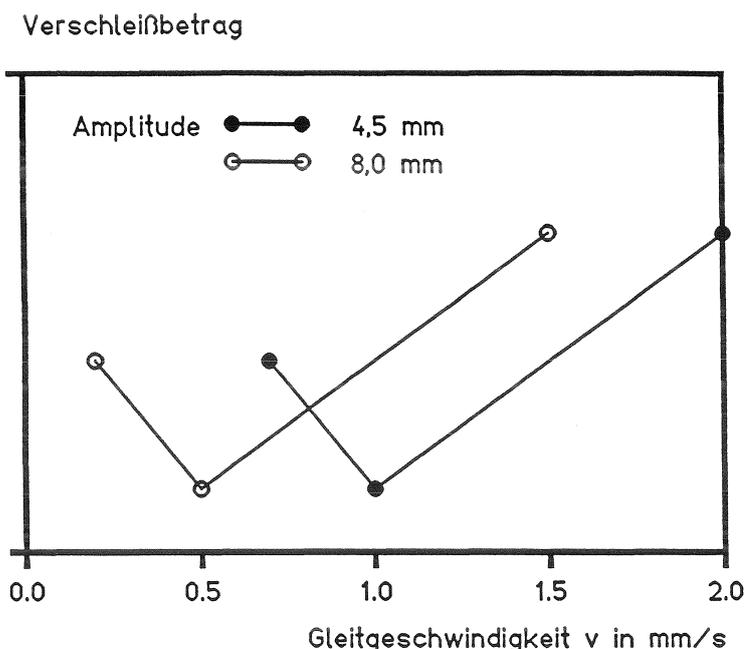


Bild 1: Verschleißbetrag in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit und der Amplitude; Prinzipdarstellung nach /12/

Die Versuchsergebnisse geben Anlaß zu der Vermutung, daß der Verschleiß neben den bekannten Einflußgrößen Lagersummenweg, Lagerpressung und Gleitgeschwindigkeit wesentlich von der Größe der Einzelverschiebungen (Verschiebungsamplitude), der tribologischen Beanspruchung (Gleiten, Oszillieren) sowie von der Fläche der PTFE-Scheibe (Pressungsverteilung) abhängen kann.

2.2 Betriebsbeanspruchungen von Brückengleitlagern

Die unterschiedlichen Beanspruchungen eines Brückenbauwerks verursachen einmalige Lagerbewegungen infolge Vorspannung, Kriechen und Schwinden, Eigengewicht, Stoß und Baugrundbewegung sowie wiederholte Lagerbewegungen infolge Verkehr, Temperaturänderung, Wind und Mikroseismik. Für die Verschleißbetrachtung von Brückengleitlagern sind die einmaligen Lagerbewegungen von untergeordneter Bedeutung, da die Größenordnung der erwartbaren Lagerverschiebung rechnerisch zutreffend erfaßt werden und deren aufsummierter Gleitweg im Vergleich zu den wiederholten Lagerbewegungen als gering vermutet werden kann /13/.

Wiederholte Lagerbewegungen können in

- langwellige oszillierende (positive und negative) Lagerverschiebungen infolge Temperaturänderung und
- stochastisch angeregte Bauwerksschwingungen höherer Frequenz und kleiner Amplitude infolge Verkehr, Wind und Mikroseismik

unterschieden werden.

Nach den derzeit gültigen Lastannahmen zur Bemessung von Straßen- und Wegbrücken, DIN 1072 /14/, wird bei der Dimensionierung der Lager die Verkehrsregellast der Hauptspur mit einem stützweitenabhängigen ("statischen") Schwingbeiwert berücksichtigt. Der "statische" Schwingbeiwert berücksichtigt jedoch keine zeitabhängigen Einflüsse. Als maßgebende zeitabhängige Parameter für die Betriebsfestigkeit von Brückenbauwerken erweisen sich die Eigenfrequenz, die Dämpfung des Überbaus und die Folge der Achslasten /15/. Dynamische Überbauverformungen werden zwangsläufig in die Lager abgeleitet. Sie rufen dort oszillierende Translations- und Rotationsbewegungen in den Gleitteilen hervor, die für die Beurteilung der Betriebsdauer (des Gleitteil) außer acht gelassen werden.

Die Mindestwerte der Bewegungsmöglichkeiten von Brückengleitlagern /16/ werden nach DIN 1072 /14/ mittels fiktiver Temperaturgrenzwerte ermittelt. Für Betonbrücken betragen die fiktiven Temperaturgrenzwerte +50 °C und -40 °C, für Stahl- und Verbundbrücken +75 °C und -50 °C.

Bei den Lastannahmen für Windlasten ist zwischen schwingungsanfälligen und nichtschwingungsanfälligen Überbauten zu differenzieren /14/. Schwingungen durch Windeinwirkung können bei Hängebrücken, seilverspannten Balkenbrücken oder schmalen Balkenbrücken mit großen Spannweiten auftreten. Im Beiblatt 1 zur DIN 1072 /14/ werden als Kriterien für die Schwingungsanfälligkeit von Überbauten u. a. der Einfluß der Höhenlage des Bauwerks (≥ 100 m), der Einfluß von Brückenaufbauten auf den Querschnitt sowie der Einfluß von lokalen Windverhältnissen (Einwirkungsbereich von Windböen) genannt. Die mögliche Schwingungsanfälligkeit muß insbesondere für Bauzustände überprüft werden. Für schwingungsunanfällige Überbauten werden die Windlasten als statisch wirkend angesetzt.

Über die Größenordnung und Verteilung der stochastisch angeregten Lagerbewegungen (Verschiebungen, Verdrehungen) und deren Frequenz (d. h. Gleit- und Winkelgeschwindigkeiten) sowie den jährlichen Lagersummenweg (aufsummierter Gleitweg) werden in den derzeit gültigen Regelwerken keine Angaben gemacht. In der Literatur sind lediglich Ergebnisse von Einzelmessungen an wenigen ausgewählten Brückentypen dokumentiert, über die wesentlichsten Ergebnisse wird im folgenden Abschnitt berichtet.

2.2.1 Lagerbewegungen infolge Temperatur

Temperaturinduzierte Bewegungen des Überbaus hängen in starkem Maße von den örtlichen meteorologischen Bedingungen, von der Bauwerksgeometrie, dem Absorptionsvermögen der Oberfläche sowie dem thermischen Längenänderungskoeffizienten des verwendeten Baustoffs ab /17/. Die Temperaturverteilung über dem Brückenquerschnitt wird von zahlreichen Parametern wie

- geographische Lage
- Sonneneinstrahlung
- Schwankungsbreite der Umgebungstemperatur
- Windgeschwindigkeit

beeinflußt. Aus den bauwerksspezifischen temporären Temperaturverteilungen resultieren

- Längenänderungen (gleichmäßige Temperaturverteilung)
- Krümmungen (lineare Temperaturverteilung)
- Eigenspannungen (nichtlineare Temperaturverteilung).

Die Temperaturverteilung des Überbaus ist bei Stahlbrücken mit orthotroper Fahrbahnplatte u. a. abhängig von der Dicke des Deckblechs und der Temperaturgradienten im Asphalt /18/. Wichtige Einflußparameter für die Bauwerksverformungen sind die Belagssteifigkeit des Asphalts (temperaturabhängiger Elastizitätsmodul) und die Dehnungsverhältnisse im Verbundsystem Belag/Deckblech.

Messungen an einem Fahrbahnbelag /19/ ergeben (abhängig von klimatischen Verhältnissen) bei einer Lufttemperatur von rd. 30 °C 2 cm unterhalb der Fahrbahnoberfläche eine maximale Asphalttemperatur von rd. 43 °C

($\Delta T = 13 \text{ K}$), jedoch rd. 20 cm unterhalb der Fahrbahnoberfläche eine Asphalttemperatur von rd. $32 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\Delta T = 2 \text{ K}$). Das Temperaturmaximum wird in 20 cm Belagstiefe rd. 6 h nach dem Erreichen des Maximums an der Oberfläche registriert. Der verzögerte Wärmeübergang dämpft die Temperaturbewegungen des Überbaus.

Die in der Literatur dokumentierten Meßergebnisse über Lagerbewegungen infolge Temperatur sind in Tabelle 1, Seite 30, zusammengefaßt.

Autobahnbrücke Mosel (Trier)

Über einen Zeitraum von rd. 1,5 Jahren werden die Lagerverschiebungen, die Bauwerkstemperatur und die Umgebungstemperatur mit einfachen meßtechnischen Mitteln an der im Bau befindlichen Spannbeton-Hohlkastenbrücke durchgeführt /20/. Aus den veröffentlichten Meßkurven kann ein maximaler jährlicher Lagersummenweg infolge Temperatur von rd. 5,0 m extrapoliert werden. Die Dilatationslänge beträgt rd. 200 m (Tab. 1, Brücke Nr. 1).

König-Karls-Brücke (Stuttgart)

Die jahreszyklischen Dauermessungen an der König-Karls-Brücke in Stuttgart /10/ werden an einer rd. 185 m langen, vierfeldrigen Stahlbrücke mit einer Breite von rd. 48 m und einer Konstruktionshöhe von rd. 1,90 m ausgeführt. Mittels eines induktiven Wegaufnehmers der Genauigkeit $\pm 0,1 \text{ mm}$ werden die Lagerbewegungen infolge Temperatur registriert und aufgezeichnet. Die Autoren geben einen jährlichen Lagersummenweg infolge Temperatur von rd. 10 m an (Tab. 1, Brücke Nr. 2).

Kent (Großbritannien)

Aus den Messungen der Lager- und Überbauverschiebungen sowie der Lufttemperatur an einer dreifeldrigen, rd. 52 m langen Betonbrücke (Spannweiten: 16 m, 20 m, 16 m) in Großbritannien kann aus den Aufzeichnungen eines rd. 12-tägigen Meßzyklus auf einen maximalen jährlichen Lagersummenweg infolge Temperatur von rd. 8,0 m geschlossen werden /21/. Die Pfeiler der dreifeldrigen Brücke sind starr mit dem Überbau verbunden, an den Widerlagern sind bewehrte Elastomerlager angeordnet. Gemessen wurde die Schubverformung der bewehrten Elastomerlager sowie die Längenänderungen der Fahrbahnplatte am

Widerlager. Eine Temperaturdifferenz von rd. 9 K innerhalb eines halben Tages führt danach zu einer Lagerverschiebung von rd. 2,5 mm, jedoch zu einer Längenänderung des Brückendecks von rd. 5 mm. Aufgrund der Lagerung des Bauwerks (starre Verbindung mit den Pfeilern) führen Temperaturdifferenzen bei diesem Bauwerk zu Überbauverformungen, die nicht ausschließlich in translatorische Lagerverschiebungen umgesetzt werden (Tab. 1, Brücke Nr. 3).

Rheinbrücke Köln-Deutz

Von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch-Gladbach, werden u. a. die Lagerverschiebungen an der Rheinbrücke Köln-Deutz über einen Meßzeitraum von 2,5 Jahren gemessen /22/. Das Bauwerk besteht aus je einem parallel angeordneten dreifeldrigen Stahl- und Spannbetonüberbau mit einer Gesamtlänge von rd. 437 m. Die Messungen erfolgen auf einem der beiden Strompfeiler, die Spannweite beträgt rd. 184 m in Strommitte und rd. 121 m über dem Ufer. Der Überbau ist jeweils als Hohlkasten mit einer maximalen Breite von rd. 16 m ausgebildet, die veränderliche Konstruktionshöhe variiert von rd. 3,30 m bis rd. 7,80 m über den Pfeilern. Aus den Meßergebnissen wird für den Spannbetonüberbau ein maximaler jährlicher Lagersummenweg infolge Temperatur von rd. 28 m (Tab. 1, Brücke Nr. 4), für den Stahlüberbau von rd. 36 m (Tab. 1, Brücke Nr. 5), angegeben /23/.

Brücken in Großbritannien und A

Emerson /24/ berichtet über in situ Messungen unter laufendem Verkehr an fünf verschiedenen Betonbrücken in Großbritannien. Die Brücken besitzen Dilatationsabschnitte zwischen 250 m und 1000 m, die Meßzeiträume erstrecken sich zwischen 1 und 5 Jahren. Ziel der Untersuchungen ist die Messung von Überbaubewegungen infolge Temperatur sowie deren Korrelation mit Bauwerks- und Umgebungstemperaturen. Für die Messungen werden Temperatursensoren mit einer Genauigkeit von ± 1 K, und induktive Wegaufnehmer mit einer Genauigkeit von ± 50 μm verwendet /25/. Die Auswertungen der Messungen an einer rd. 600 m langen Hohlkasten-Spannbetonbrücke /24/ ergeben, daß rd. 65 % aller registrierten Einzelbewegungen infolge Temperatur ≤ 100 μm , 30 % ≤ 200 μm und 5 % ≥ 200 μm betragen. Die Wegaufnehmer sind in der Nähe der neutralen Faser angeordnet. Die Autorin geht davon aus, daß Lagerverschiebungen aus der Verkehrsbelastung nicht registriert werden. Starke dynamische Anregung

des Überbaus sowie Bremsvorgänge können jedoch auch im Bereich der neutralen Faser zu Translationsverschiebungen des Überbaus führen (s. Abschn. 2.2.2), so daß nicht ausgeschlossen werden kann, daß den Meßergebnissen Einflüsse aus der Verkehrsbelastung überlagert sind.

Aus Messungen von Temperaturprofilen über den Querschnitt errechnet Emerson die sogenannte "effektive Bauwerkstemperatur". Der Querschnitt wird in Segmente unterteilt, die Summe der Produkte aus Segmentfläche und Segmenttemperatur, dividiert durch die genannte Querschnittsfläche, liefert eine Bauwerkstemperatur, die Geometrie- und Wärmetransporteinflüsse berücksichtigt.

In /26/ stellt Emerson eine lineare Korrelation zwischen minimaler täglicher "effektiver Bauwerkstemperatur" und der maximalen täglichen Lufttemperatur im Schatten fest. Diese Korrelation ist innerhalb eines engen Streubereiches für Betonbrücken unabhängig von der Bauwerksgeometrie, -konstruktion und -situation.

Shiu et al /27/ registriert ebenfalls an einer rd. 330 m langen Hohlkasten-Spannbetonbrücke in den USA eine gute Übereinstimmung zwischen der Bauwerkstemperatur und der mittleren monatlichen Temperatur im Schatten.

In /28/ weist Emerson darauf hin, daß der lineare Zusammenhang zwischen effektiver Bauwerks- und Lufttemperatur nur innerhalb eines Umgebungstemperaturbereichs zwischen 0 °C und +20 °C zutrifft. Oberhalb und unterhalb dieser Grenztemperaturen ändert sich die "effektive Bauwerkstemperatur" merklich langsamer gegenüber der Umgebungstemperatur.

Autobahnbrücke in Süd-Afrika

An einer rd. 230 m langen Spannbetonbrücke in Süd-Afrika werden Lagerverschiebungen und Umgebungstemperaturen über einen Meßzeitraum von 6 Tagen registriert /29/. Innerhalb eines halben Tages treten Temperaturschwankungen von rd. 15 K auf. Aus den angegebenen Meßergebnissen kann ein maximaler jährlicher Lagersummenweg von rd. 10 m extrapoliert werden. Die Lagerverschiebungen verlaufen jedoch nicht kontinuierlich, sondern es werden permanente stick-slip-Verschiebungen mit "Ruhephasen" zwischen 0,5 h bis 3 h beobachtet (Tab. 1, Brücke Nr. 6).

Brohltalbrücke

Von der Bundesanstalt für Straßenwesen wurden an einer rd. 600 m langen Spannbetonbrücke u. a. temperaturinduzierte Lagerverschiebungen gemessen /30/. Die Dilatationslänge beträgt rd. 137 m. Die Messungen erfolgen über einen Meßzeitraum von rd. 2 Jahren an einem Lager. Aus den Meßergebnissen werden in /5/ zeitabhängige Lagersummenwege ermittelt. Der monatliche Lagersummenweg variiert danach zwischen rd. 0,2 m (Februar) und rd. 0,5 m (Juli) innerhalb des Meßzeitraums. Es kann ein jährlicher Lagersummenweg infolge Temperatur von rd. 4,0 m extrapoliert werden (Tab. 1, Brücke Nr. 7).

2.2.2 Lagerbewegungen infolger stochastischer Bauwerksanregung (Verkehr)

Bei den wenigen in der Literatur beschriebenen Messungen von Überbauverformungen infolge dynamischer Anregung muß zwischen Schwingungsmessungen zur "Systemidentifikation" (Eigenfrequenz, Eigenschwingformen, Dämpfung, Federkonstante) und Messungen von Lagerverschiebungen an Gleitlagern unterschieden werden.

Grundlegende Funktionalitäten zwischen definierter dynamischer Anregung (LKW) und "Systemantwort" des Überbaus werden aus rd. 226 Versuchen an Straßenbrücken in der Schweiz abgeleitet /31/. Die Versuche werden in den Jahren 1958 bis 1981 vornehmlich an Spannbeton-Durchlaufsystemen durchgeführt. Im Mittel beträgt die Spannweite der Brücken rd. 40 m (Maximum: 119 m, Minimum: 11 m). Das dynamische Inkrement, d. h. die prozentuale Zunahme von Bauwerksreaktionen infolge dynamischer Beanspruchung gegenüber identischer statischer Beanspruchung, ist von der Eigenfrequenz des Überbaus abhängig. Für Eigenfrequenzen zwischen rd. 2 Hz und 4 Hz wird ein maximales dynamisches Inkrement von bis zu 70 % registriert (Bild 2).

Die aus der Literatur zu entnehmenden jährlichen Lagersummenwege infolge Verkehrsbeanspruchung sind in Tabelle 1, Seite 30, zusammengefaßt.

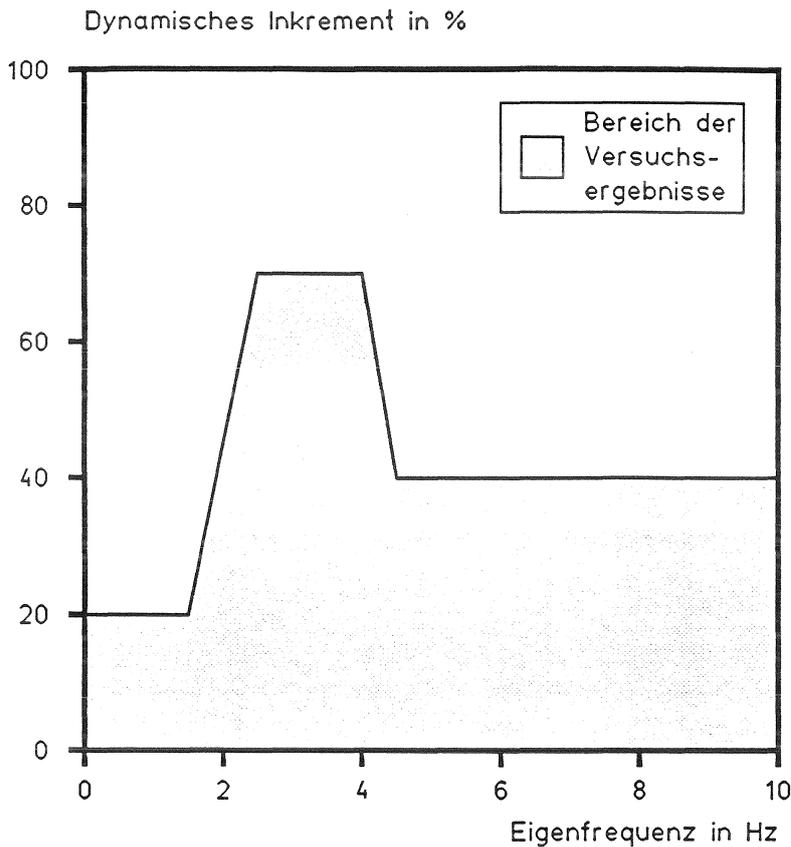


Bild 2: Dynamisches Inkrement in Abhängigkeit von der Eigenfrequenz des Überbaus; Prinzipdarstellung /31/

Shinfield Bridge (Großbritannien)

An einer vierfeldrigen Spannbetonbrücke mit einer Gesamtlänge von rd. 75 m werden dynamische Belastungsversuche mit einem definierten Fahrzeug ($G = 160 \text{ kN}$) durchgeführt /32/. Die Überbauverschiebungen werden mittels eines induktiven Wegaufnehmers in Höhe der neutralen Faser registriert. Während eines Bremsversuchs aus rd. 60 km/h wird eine Lagerverschiebung von rd. 33 μm registriert, wobei infolge der dynamischen Anregung des Durchlaufträgers positive und negative Lagerverschiebungen auftreten. Aus der dargestellten Aufzeichnung kann nicht entnommen werden, ob nach dem Bremsvorgang eine tatsächliche Restverschiebung (Verschiebung der temporären Mittellage des Lagers) im Gleitlager zurückbleibt (Tab. 1, Brücke Nr. 8).

König-Karls-Brücke (Stuttgart)

Bei den Messungen an der König-Karls-Brücke in Stuttgart /10/ werden die verkehrsinduzierten Lagerverschiebungen u. a. mit einem elektrooptischen

Impulszähler über einen Meßzeitraum von einem Jahr registriert. Die kleinste zu registrierende Impulsgröße (Meßgenauigkeit) kann dem Impulszähler vorgegeben werden. Während der Messungen wird die Meßgenauigkeit des Wegaufnehmersystems variiert. Mit zunehmender Genauigkeit steigt der registrierte Lagersummenweg progressiv an, eine Meßgenauigkeit von 0,2 mm liefert einen jährlichen extrapolierten Lagersummenweg infolge Verkehrsbelastung von 60 m, eine Meßgenauigkeit von $\pm 0,10$ mm von rd. 120 m und eine Genauigkeit von $\pm 0,05$ mm von 150 m (Tab. 1, Brücke Nr. 2). In Abhängigkeit von der Tageszeit registrieren die Autoren an der überwiegend durch städtischen Verkehr beanspruchten Brücke in den Mittagsstunden das Maximum der Lagerverschiebungen. Am Wochenende ergibt sich ein rd. fünfmal kleinerer täglicher Lagersummenweg als an Werktagen, der Streubereich an Werktagen ist relativ gering. Ein Einfluß von einzelnen PKW-Überfahrten auf Lagerverschiebungen ist nicht erkennbar.

Rheinbrücke Köln-Deutz

Die Messungen der BAST an der Rheinbrücke Köln-Deutz /22/ beinhalten Messungen der Lagerverschiebungen infolge Verkehrsbeanspruchung, wobei sich die Verkehrsbeanspruchung aus Straßenbahn- und PKW-Verkehr zusammensetzt (kein LKW-Verkehr). Eine Straßenbahnüberfahrt verursacht eine Durchbiegung des Überbaus in der Größenordnung der täglichen Durchbiegung infolge Temperatur. Für den Spannbetonüberbau wird ein jährlicher Lagersummenweg infolge Verkehrsbeanspruchung von rd. 4500 m angegeben, wobei rd. 97 % der Einzelverschiebungen oszillierenden Schwingungsverschiebungen zugewiesen werden /23/ (Tab. 1, Brücke Nr. 4). An der Stahlbrücke wird ein jährlicher Lagersummenweg von rd. 2700 m registriert. Von den Einzelbewegungen werden rd. 72 % oszillierenden Lagerverschiebungen zugewiesen /23/ (Tab. 1, Brücke Nr. 5).

Buller-Bridge (Neuseeland)

An drei Spannbetonbrücken in Neuseeland werden von Moss et al /33/ Schwingungsmessungen vorgenommen. Bei den Überbauten handelte es sich um vorge-spannte Einfeld-Fertigteilträger (Spannweiten rd. 25 m), die durch eine Ort betonplatte zu Durchlaufträgern mit Gesamtlängen zwischen 200 m und 300 m verbunden sind. Die Messungen werden mit definierten Fahrzeugen (ver-

schiedene LKW, laufender Verkehr) sowie im verkehrsfreien Zustand durchgeführt. Die Meßaufzeichnungen werden mittels Fourieranalysen ausgewertet und analytischen Rechnungen gegenübergestellt. Von den registrierten Vertikalschwingungen werden rd. 80 % in Horizontalschwingungen umgesetzt. Die Horizontalschwingungen weisen Frequenzen zwischen 0,9 Hz und 11,25 Hz (= rd. 10^4 bis rd. 10^6 Einzelverschiebungen pro Tag) auf (Tab. 1, Brücke Nr. 9). Angaben über die Schwingungsamplituden liegen nicht vor.

Brohltalbrücke

In den Jahren 1986 und 1987 werden vom ibac Dauermessungen an einer rd. 600 m langen 12-feldrigen Spannbetonbrücke durchgeführt /5/. Es werden die Lagerverschiebungen und -verdrehungen u. a. infolge Temperatur und Verkehr gemessen. Zur Registrierung möglichst kleiner und schneller Einzelbewegungen aus dynamischen Beanspruchungen gelangt nach geeigneten Vorversuchen eine Meßeinrichtung mit einer Meßgenauigkeit von $\pm 2 \mu\text{m}$ und einer Meßfrequenz von 1 kHz zum Einsatz. Aufgrund statistischer Auswertung wird ein jährlicher Lagersummenweg von rd. 1350 m extrapoliert /5/ (Tab. 1, Brücke Nr. 7).

Eifeltorbrücke

An 7 ausgewählten Tagen in den Jahren 1986 und 1987 werden vom ibac Messungen an einem rd. 100 m langen zweifeldrigen Stahl/Beton-Verbund-Behelfsbauwerk (einspurige Verkehrsführung, überwiegend LKW-Verkehr) durchgeführt /5/.

Im Rahmen von Erweiterungsmaßnahmen kann hier ein Kraftmeßlager eingebaut werden, daß die koinzidente Messung von Lagerlast und zugehörigen Lagerverschiebungen erlaubt. Aus den Meßgrößen kann erstmals die "Reibungsleistung" (mittlere Pressung \cdot Gleitgeschwindigkeit = $p \cdot v$) eines Brückengleitlagers unter Betriebsbeanspruchung formuliert werden. Die Meßergebnisse aus zufälligem LKW-Verkehr lassen einen jährlichen Lagersummenweg infolge Verkehrsbeanspruchung von rd. 3200 m erwarten /5/ (Tab. 1, Brücke Nr. 10).

Tabelle 1: Jährlicher Lagersummenweg infolge Temperatur- und Verkehrsbeanspruchung
 Literatursichtung

Brücken-Nr.	Literaturstelle	Lage der Brücke	Brückentyp	Dilatationslänge	Spannweite	max. Breite	max. Höhe	Meßzeitraum	jährlicher Lagersummenweg infolge	
									Temperatur	Verkehr
				m	m	m	m	d	m	m
1	/20/	Mosel(Trier) D	Spannbeton-Hohlkasten	200	40	22.3	2.8	14	5 ¹⁾	2)
2	/10/	König-Karls-Br. (Stuttgart) D	neuzelliger Stahl-Hohlkasten	185	50	48.0	1.9	365	10	150
3	/21/	(Kent) GB	Beton- Plattenbalken	16	16/20	2)	2)	12	8 ¹⁾	2)
4	/22/	Rheinbrücke (Köln-Deutz) D	Spannbeton-Hohlkasten	304	121/184	16.0	3.3-7.8	2)	28	4500
5	/22/	Rheinbrücke (Köln-Deutz) D	Stahl-Hohlkasten	304	121/184	16.0	3.3-7.8	2)	36	2700
6	/29/	Autobahn-Br. ZA	Spannbeton-Hohlkasten	102	34	2)	2)	6	10 ¹⁾	2)
7	/5/	Brohltalbrücke D	Spannbeton-Hohlkasten	137	37/50	15.5	4.2	300	4	1350
8	/32/	Shinfield-Bridge GB	Spannbeton	2)	23	2)	2)	2)	2)	2)
9	/33/	Buller-Bridge NZ	Spannbeton-Einfeldträger mit Durchlaufplatte	10	25	1.7	1.7	2)	2)	2)
10	/5/	Eifeltorbrücke D	Stahl/Beton-Verbundbrücke	96	4.8	5.6	1.9	7	2)	3200

1) aus veröffentlichten Aufzeichnungen extrapoliert

2) keine Angaben

3 BRÜCKENBAUWERK FÜR EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN (IN SITU-MESSUNGEN)

3.1 Auswahlkriterien

Für die Durchführung des Forschungsvorhabens wurde eine in Konstruktion, Bauausführung, Querschnittsabmessungen, Länge, Spannweiten und Verkehrsbeanspruchung repräsentative Stahl-Hohlkastenbrücke ausgewählt, deren Bauart auch in absehbarer Zukunft als üblich angesehen werden kann. Die für die Messungen auszuwählenden Gleitlager sollten möglichst zweiachsig verschiebbar sein, um zwängungsfreie Verhältnisse im Lager zu garantieren. Der Lagerraum sollte ausreichenden Platz zur Installation der Meßeinrichtung bieten, vor Niederschlag und Spritzwasser geschützt und leicht zugänglich sein, sowie das Kriterium der Sicherheit von Zugang und Meßeinrichtung im Lagerbereich erfüllen.

In Abstimmung mit dem Förderer wurde die Grunewald-Brücke in Duisburg ausgewählt, die die obengenannten Kriterien erfüllt.

3.1.1 Koordination mit anderen Forschungsprojekten

Das Vorhaben ist im Rahmen eines Forschungsprogramms des ibac zur Formulierung des Beanspruchungskollektivs von Brückengleitlagern in Stahl-, Spannbeton- und Verbundbrücken angesiedelt. Während der Beantragungsphase dieses Projekts wurde ein vergleichbares Vorhaben mit identischem Forschungsziel unter Förderung des Bundesministers für Verkehr (BMV) an einer Spannbetonbrücke (Brohltalbrücke) und an einer Verbundbrücke (Eifeltorbrücke) konzipiert /5/.

An der Brohltalbrücke projektierten gleichzeitig andere forschende Stellen Untersuchungen der Betriebsbeanspruchungen. Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) konzipierte Messungen der Temperaturprofile des Überbaus, meteorologischer Daten sowie der Überbauverformungen infolge Temperatur /30/. Das Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit (LBF) führte Wägeplattenmessungen zur Beschreibung des Verkehrslast-Kollektivs durch /34/. Durch Messungen der Spannglieddehnungen sollte vom Institut für Massivbau der TH Darmstadt ein Verkehrslastmodell erstellt werden /35/.

3.2 Bauwerksbeschreibung und Brückenlager

Die Grunewaldbrücke überspannt im Zuge der Bundesautobahn A59, Düsseldorf-Duisburg Zentrum, die Gleisanlagen der Deutschen Bundesbahn südlich des Hauptbahnhofs Duisburg. Bild 3 lokalisiert das Bauwerk im Großraum Duisburg.

Das Bauwerk besitzt eine Gesamtlänge von rd. 1016 m und setzt sich aus einem rd. 577 m langen dreizehnfeldrigen Spannbetonüberbau (Bild 4a) und einem rd. 439 m langen dreifeldrigen Stahlüberbau (Bild 4b) zusammen.

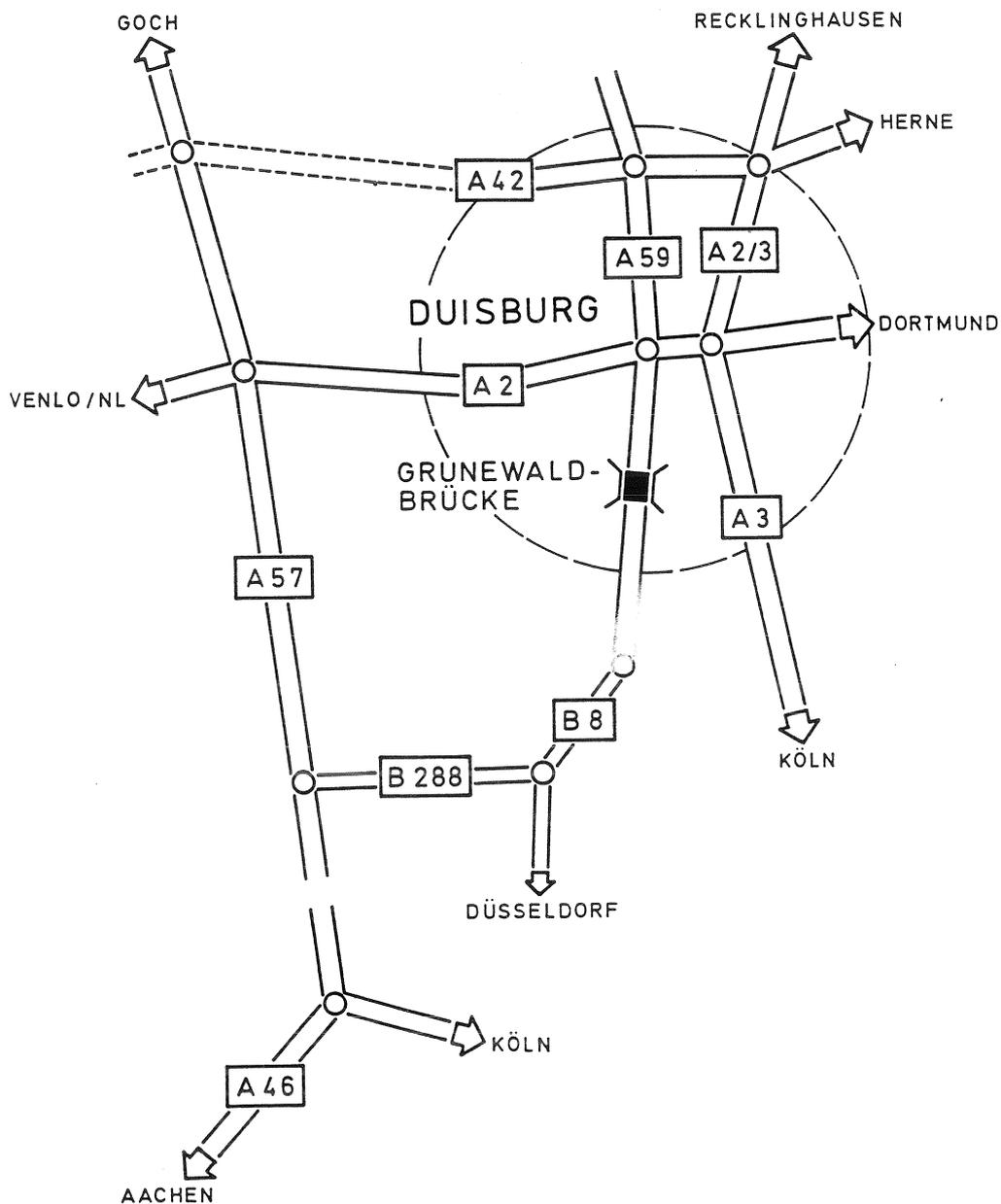


Bild 3: Lage der Grunewaldbrücke

Datenfile: SINUS24

Klassen: [.KLASSEN]VAR01.DAT

Gewicht []: 0.0000

dt [ms]: 10.00

ds [5m]: 0.00

Klassensummen:

1250.		0	0	0	2	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1000.		0	0	0	232	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
750.		0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
500.		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200.		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
175.		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150.		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
125.		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100.		3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50.		35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.		115	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10.		928	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

		1	3	5	20	40	60	90	110	125	140	160	175	190	210	250	290	310
Summe:		1081	0	0	235	2	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Wegsummen:

1250.		0	0	0	25	0	0	0	100	118	0	0	0	0	0	0	0	0
1000.		0	0	0	2900	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
750.		0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
500.		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200.		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
175.		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150.		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
125.		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100.		2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50.		18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.		58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10.		464	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

		1	3	5	20	40	60	90	110	125	140	160	175	190	210	250	290	310
Summe:		541	0	0	2938	60	0	0	100	118	0	0	0	0	0	0	0	0

Gesamtweg gemessen : 4129.61

Gesamtweg gerechnet: 3755.50

Anzahl Einzelwege : 23999

Maximaler Weg : 111.94

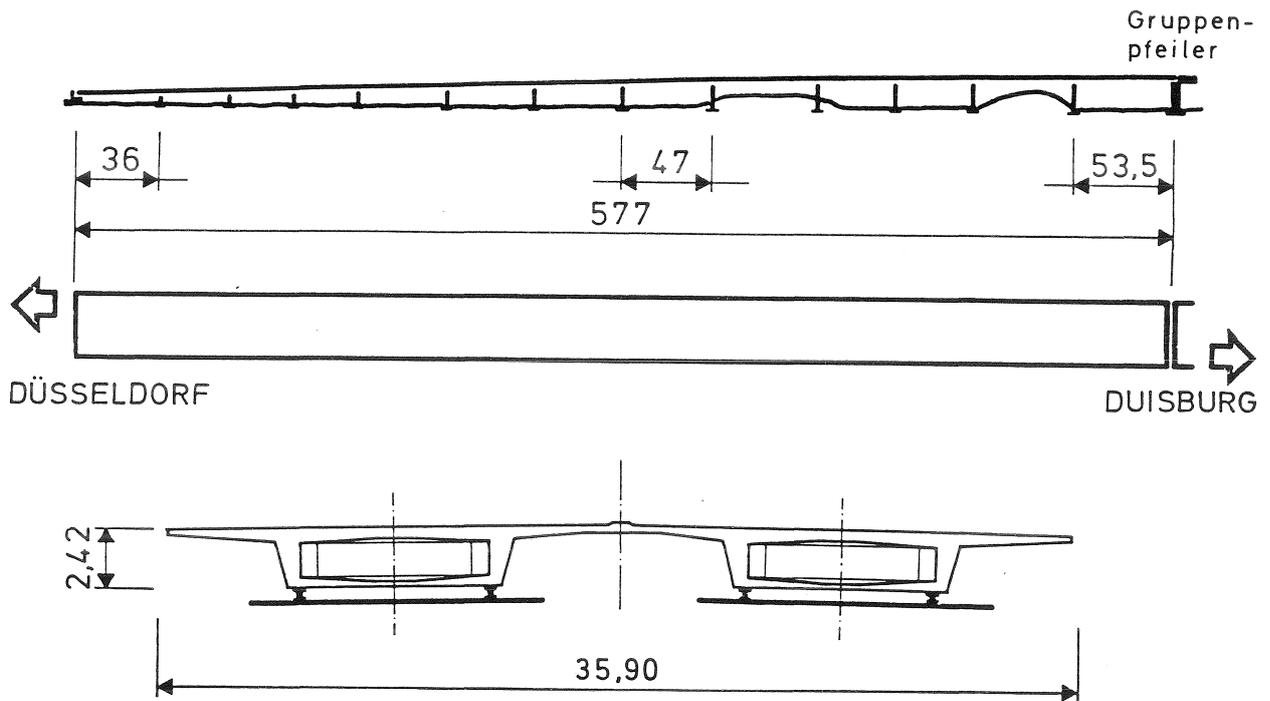


Bild 4a: Ansicht, Draufsicht und Querschnitt des Spannbetonüberbaus
(Maße in m)

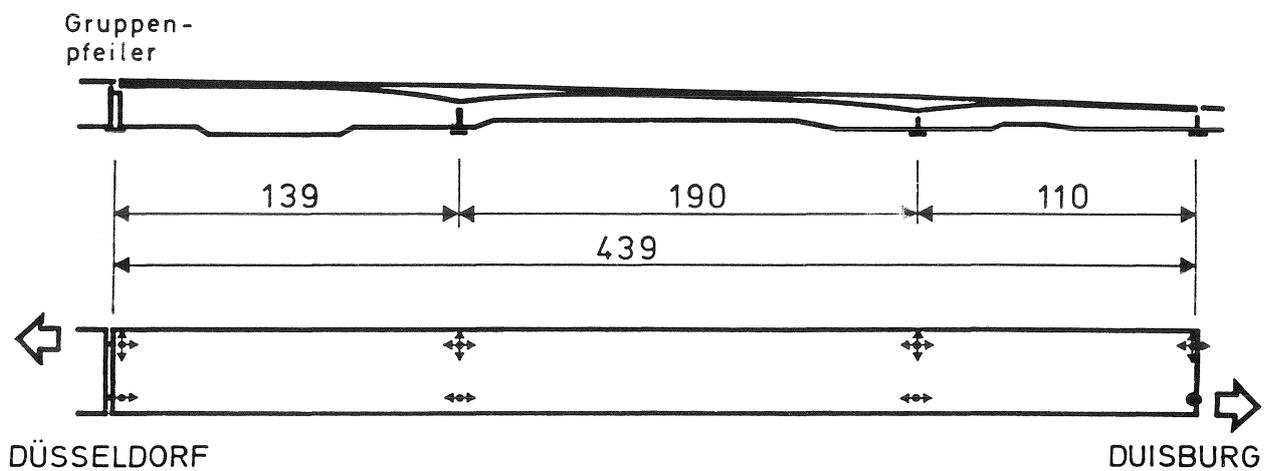


Bild 4b: Ansicht und Draufsicht des Stahlüberbaus
(Maße in m)

Beide Überbauten schließen an einen gemeinsamen Gruppenpfeiler an (Bild A1).

Der Spannbetonüberbau setzt sich aus zwei Hohlkästen mit einer gemeinsamen Fahrbahnplatte zusammen; die übliche Ausbildung zweier getrennter Überbauten für jede Fahrtrichtung liegt nicht vor. Die Konstruktionshöhe beträgt 2,42 m, die Gesamtbreite konstant 35,93 m (Bild 4a).

Die dreifeldrige Stahlbrücke setzt sich aus zwei geschlossenen geschweißten Hohlkästen veränderlicher Bauhöhe sowie einer orthotropen Fahrbahnplatte mit Quer- und Längsträgern zusammen. Bei einer Gesamtlänge von 439 m überspannt das Mittelfeld mit 190 m die Bundesbahnanlagen, während das dem Gruppenpfeiler zugewandte Feld 139 m und das Endfeld in Fahrtrichtung Duisburg 110 m überspannt (Bild 4b, Bild A2).

Der Stahlüberbau weist in Feldmitte und im Endlagerbereich eine Regelkonstruktionshöhe von rd. 4,20 m auf, die Gesamtbreite beträgt konstant 35,93 m (Bild 5). Im Stützbereich hat das Bauwerk eine maximale Konstruktionshöhe von 8,63 m (Bild A3).

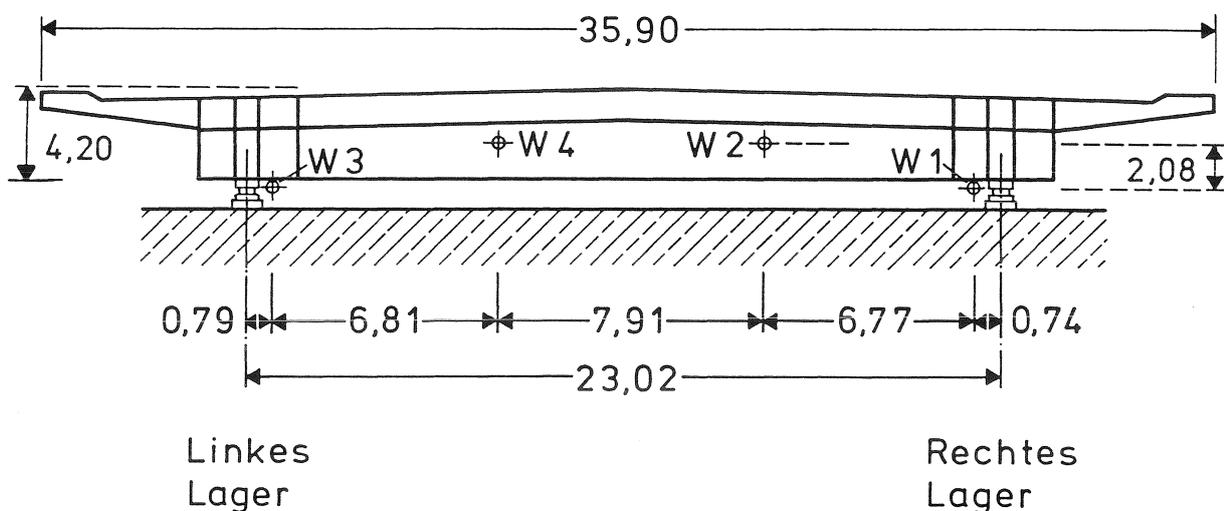


Bild 5: Endquerträger des Stahlüberbaus am Gruppenpfeiler und Anordnung der Wegaufnehmer W1 bis W4 (Maße in m); Ansicht in Fahrtrichtung Duisburg

In Fahrtrichtung Düsseldorf sind an allen Lagerungspunkten zweiachsig verschiebbare Punktkipp-Gleitlager angeordnet; in Fahrtrichtung Duisburg befinden sich am Gruppenpfeiler und an den Mittelpfeilern einachsig verschiebbare Punktkipp-Gleitlager und am Widerlager Duisburg ein Punktkipp-Festlager (Bild 4b).

Die in diesem Bericht beschriebenen Untersuchungen erfolgten an den Gleitlagern des Stahlüberbaus am Gruppenpfeiler. Bei den Punktkipp-Gleitlagern handelt es sich um Lager der Firma Kreuz, Erkrath, gemäß allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung durch das IfBt /36/. Gemäß der Lagerstatik /37/ wird das rechte Lager mit PKLe, Typ 11103 und das linke Lager mit PKLa, Typ 12103, bezeichnet.

Die bauliche Durchbildung und die Hauptmaße des linken Lagers (zweiachsig verschiebbar) sind gemäß der Ausführungszeichnung Nr. A-49877, Fa. Kreuz, auf Bild 6, die des rechten Lagers (einachsig verschiebbar) gemäß der Ausführungszeichnung Nr. A-49878, Fa. Kreuz, auf Bild A4 wiedergegeben.

Das linke Lager hat einen PTFE-Durchmesser von 610 mm. Gemäß der Lagerstatik /37/ beträgt die rechnerische mittlere Pressung in der Gleitebene für den Lastfall Eigengewicht $\sigma_g = 15,7 \text{ N/mm}^2$, für den Lastfall Eigengewicht und Verkehr $\sigma_{g+p} = 29,5 \text{ N/mm}^2$.

Das rechte Lager hat einen PTFE-Durchmesser von 620 mm. Gemäß der Lagerstatik /37/ beträgt die rechnerische mittlere Pressung für den Lastfall Eigengewicht $\sigma_g = 15,2 \text{ N/mm}^2$ für den Lastfall Eigengewicht und Verkehr $\sigma_{g+p} = 28,5 \text{ N/mm}^2$.

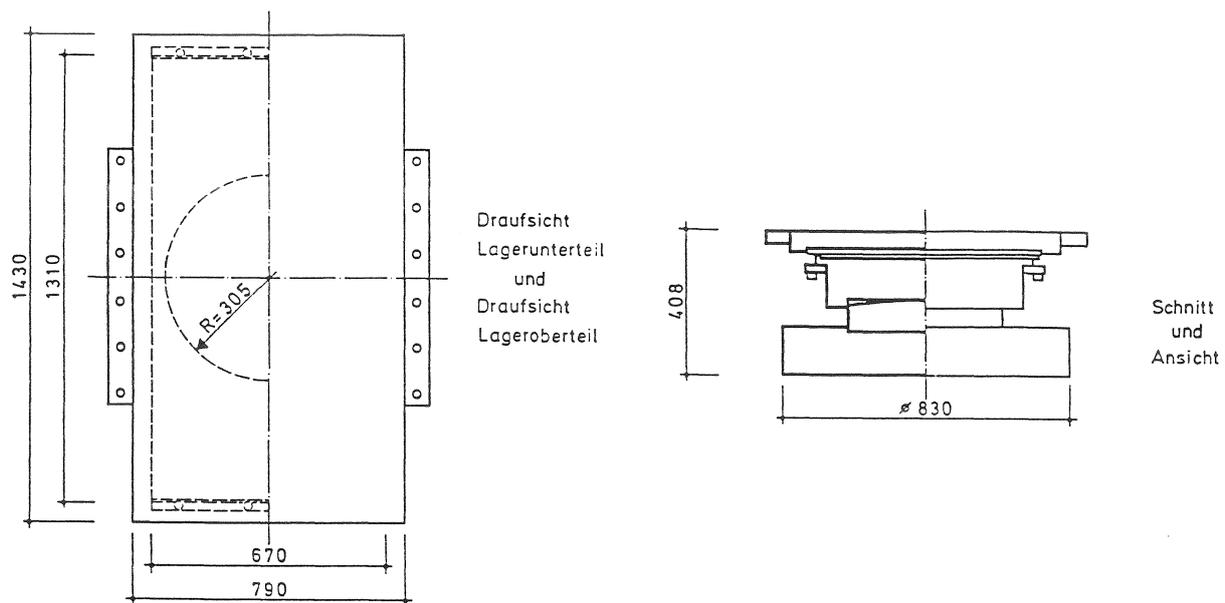


Bild 6: Zweiachsig verschiebbares Punktkipp-Gleitlager Fa. Kreuz, PKLa, Typ 121 03 (Maße in mm)

4 UNTERSUCHUNGSUMFANG

4.1 Konzeption der Meßeinrichtung

Wegaufnehmer

Zur Präzisierung des Anforderungskataloges an die Meßeinrichtung wurden Vorversuche mit einer konventionellen Meßeinrichtung (induktiver Wegaufnehmer, Magnetband-PCM-Anlage) durchgeführt. Es waren die Größenordnung der Einzelverschiebungen sowie deren Frequenz abzuschätzen, um die Meßgenauigkeit und Meßfrequenz des zu beschaffenden Wegaufnehmersystems festzulegen. Aufgrund der Konfiguration von zwei Überbauten aus verschiedenen Baustoffen und mit unterschiedlichen Steifigkeiten wurden Lagerverschiebungs-Zeitverläufe (Ganglinien) an je einem Gleitlager des Stahl- und Spannbetonüberbaus infolge Verkehrsbeanspruchung (zufälliger LKW-Verkehr) aufgezeichnet.

Aus den Ganglinien war

- die Größenordnung der Einzelverschiebungen
- die Größenordnung der Verschiebungsdauer der Einzelverschiebungen abzuschätzen.

Temperatursensoren

"Zur rechnerischen Abschätzung der Temperaturdehnungen wurde ein Temperaturprofil des Bauwerks und die Umgebungstemperatur in Bauwerksnähe (im La-

gerbereich des Gruppenpeilers) registriert. Die effektive Bauwerkstemperatur /24/ konnte aufgrund der Wärmeleitfähigkeit des Stahls vereinfacht segmentweise gleichverteilt über den Querschnitt angenommen werden. Zur Minimierung des Meßaufwands für die Dauermessungen wurden die Meßstellen auf signifikante Meßorte reduziert.

Meßwerterfassungseinrichtung

Die Konzeption der Hard- und Software der Meßwerterfassungseinrichtung war im Hinblick auf die schnellen Prozesse zur Realisierung der angestrebten Frequenz der Meßwertverarbeitung zu optimieren. Die Ergebnisse der Messungen an der König-Karls-Brücke /10/ sowie an anderen Brücken /23, 33/ ließen eine Vielzahl kleiner höherfrequenter Lagerverschiebungen infolge Verkehr erwarten, die aufsummiert einen wesentlichen Anteil am Lagersummenweg ausmachen. Diese kleinen Schwingungsverschiebungen sind längerwelligen Lager-verschiebungen aus Temperatur- und Überbauverformungen infolge Verkehr überlagert. Zur Erfassung möglichst kleiner Einzelverschiebungen ist daher eine hohe Frequenz der Meßwerterfassung erforderlich. Bei einer angestrebten Abtastrate von 1 kHz fallen rd. $9 \cdot 10^7$ Meßwerte pro Tag und Wegaufnehmer an. Eine Abtastrate von 1 kHz kann auch mit herkömmlichen Meßeinrichtungen realisiert werden (z. B. Magnetband-PCM-Anlage), jedoch reicht die Speicherkapazität für den Dauerbetrieb bei weitem nicht aus. Daher mußte ein Meßwertverarbeitungssystem konzipiert werden, daß unmittelbar im Bauwerk den Verschiebungs-Zeit-Verlauf in Einzelverschiebungen nach den Kriterien

- Größe
- Dauer
- Verschiebungsrichtung (positiv, negativ)

differenziert. Wegen der Speicherkapazität üblicher Disketten waren die Einzelverschiebungen nach den zuvor genannten Kriterien zu klassieren und als Häufigkeits-Matrix abzulegen. Dadurch entfällt eine zeitliche Zuordnung von Einzelereignissen. Zur Formulierung statistischer Aussagen (vgl. Abschn. 1.2) sind Einzelereignisse jedoch nicht von Interesse.

Eine entsprechende Hardware war als Prototyp zu entwickeln, wobei ein möglichst störungsfreier Dauerbetrieb durch Einsatz hochwertiger Bauteile gewährleistet werden sollte. Dem Auswertalgorithmus entsprechend mußte ein spezielles Betriebssystem (Software) implementiert werden, daß den perma-

nent anfallenden Datenstrom über gestaffelte Subsysteme verwaltet, um während der Klassierung und Abspeicherung eine kontinuierliche Meßwerterfassung zu ermöglichen.

4.2 Kalibrierung der Meßeinrichtung

Die Tauglichkeit und Genauigkeit der Meßeinrichtung wurde vor dem Einbau in die Brücke durch statische und dynamische Laborversuche sowie synthetisch mit einem Rechner generierter Verschiebungs-Zeit-Funktionen überprüft. Nach dem Einbau in die Brücke wurden Kalibrierfahrten mit definierten LKW vorgenommen.

4.3 Probelauf im Bauwerk

Zunächst wurde die Meßeinrichtung einem 3-monatigen Probelauf unter Betriebsbeanspruchung ausgesetzt. Während der Probephase war die Hard- und Software der Meßeinrichtung in der Grunewaldbrücke zu optimieren und eine Auswertesoftware für die Auswertung mit dem Institutsrechner im ibac zu erstellen.

4.4 Bauwerksuntersuchungen

4.4.1 Dauerbetrieb

Nachdem die Meßeinrichtung den Bauwerksbedingungen angepaßt war, konnte die jahreszyklische Dauermessung begonnen werden (s. Abschn. 5.2.3).

4.4.2 Dokumentation des Lagerzustandes

Nach Abschluß der Dauermessungen wurden die Gleitteile (Gleitwerkstoff (PTFE) und Gegenwerkstoff (POM) im Rahmen von planmäßigen Instandsetzungsarbeiten an den Brückenüberbauten ausgewechselt. Der Zustand der Reibpartner wurde untersucht und fotografisch dokumentiert. Damit wurde eine Korrelation zwischen dem Beanspruchungskollektiv und dem Lagerzustand nach rd. 15-jähriger Betriebsbeanspruchung möglich.

5 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

5.1 Vorversuche

Aufgrund der Literaturlauswertung konnte vermutet werden, daß eine Vielzahl kleiner Verschiebungen den jährlichen Lagersummenweg wesentlich beeinflusst /10, 23, 33/. Die Meßeinrichtung sollte daher einen Meßbereich aufweisen, der die jährlichen Temperaturdehnungen des Überbaus abdeckt als auch über diesen Meßbereich eine ausreichende Meßgenauigkeit aufweist, um kleine Lagerverschiebungen zu registrieren (vgl. Tab. 1).

Zur Formulierung des Anforderungsprofils an die Wegaufnehmer wurden Vorversuche unter zufälligem Verkehr mit der nachfolgend aufgeführten, im ibac vorhandenen Meßeinrichtung durchgeführt:

- induktiver Wegaufnehmer HBM-W1E
Meßbereich: $\pm 1,0$ mm
Genauigkeit: $\pm 0,004$ mm
- Meßverstärker HBM-KWS II/5
- Magnetband-PCM-System J+R 3K 12.

Die Vorversuche erfolgten am linken Lager (Bild 5) der Stahlbrücke und am gegenüberliegenden Lager des Spannbetonüberbaus auf dem Gruppenpfeiler.

PKW-Verkehr und Kleintransporter verursachten an der Spannbetonbrücke infolge der Endquerträgerverdrehung beim Überqueren des ersten Feldes einseitige positive Lagerverschiebungen aus der temporären Mittellage der PTFE-Scheibe von ≤ 20 μm (Bild 7a, Meßzeitraum 0 bis 7 s). Ein nachfolgender LKW bewirkte eine Lagerverschiebung von rd. 50 μm , die temporäre Mittellage wurde nach dieser dynamischen Anregung um diesen Betrag verschoben. Ein ausgeprägtes Nachschwingen des Überbaus war nicht zu beobachten.

Am Stahlüberbau verursachten PKW-Verkehr und Kleintransporter ebenfalls nur Lagerverschiebungen in einer Größenordnung $\ll 20$ μm (Bild 7b, Meßzeitraum 0 bis 15 s). Ein LKW rief dagegen Lagerverschiebungen von bis zu 1500 μm (1,5 mm), der Überbau reagierte auf die dynamische Anregung mit starkem Nachschwingen. Dem langwelligen Verschiebungsvorgang war eine höherfrequente Schwingung mit kleiner Amplitude ($\ll 20$ μm) überlagert.

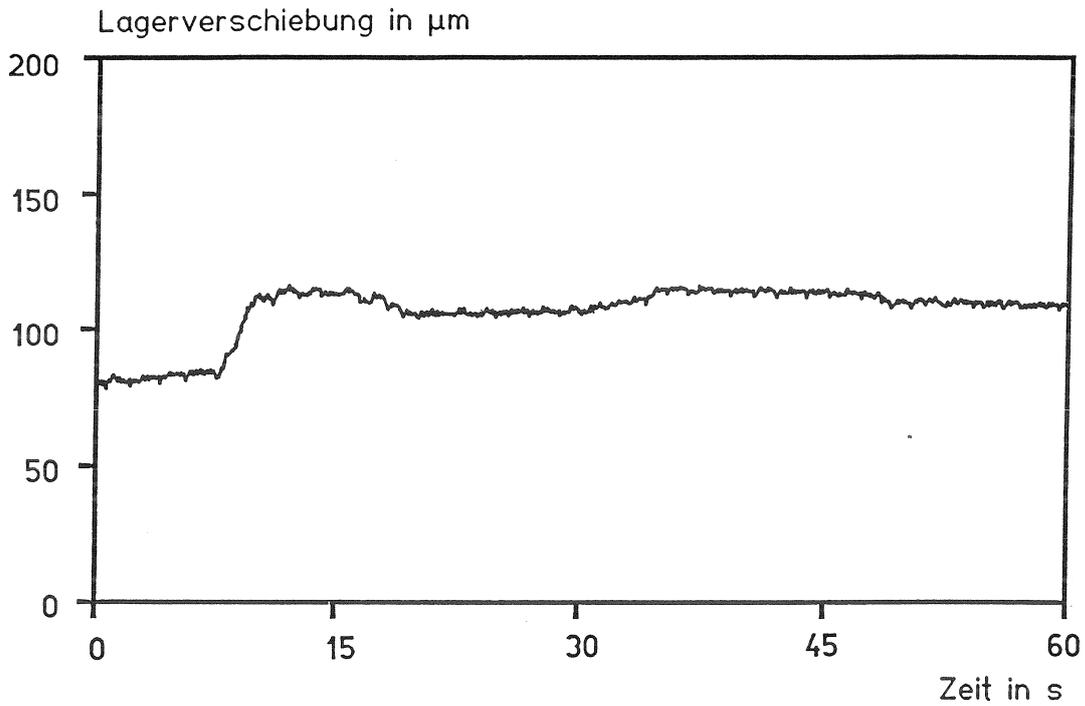


Bild 7a: Lagerverschiebung des Spannbetonüberbaus infolge einer LKW-Überfahrt (Vorversuche)

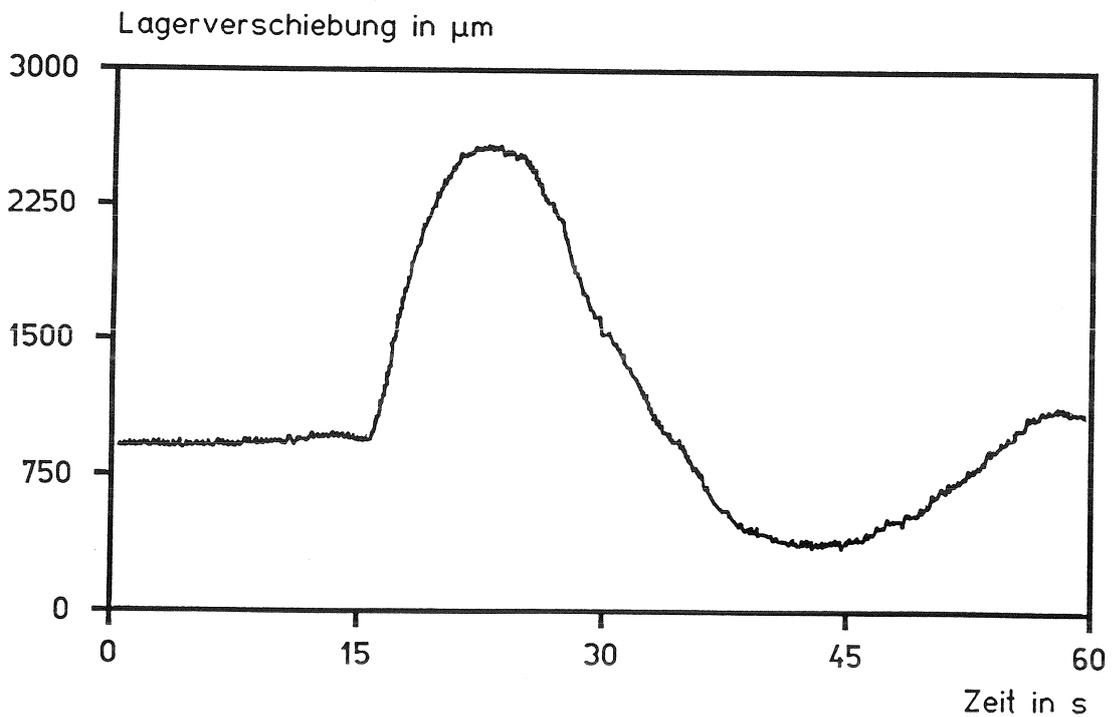


Bild 7b: Lagerverschiebung des Stahlüberbaus infolge einer LKW-Überfahrt (Vorversuche)

Aus den Vorversuchen konnten zur Formulierung des Anforderungskataloges an die Wegaufnehmer und zur Konzeption der Meßwerterfassung folgende Zusammenhänge abgeleitet werden:

- PKW- und leichter LKW-Verkehr erzeugten im Vergleich zum (schweren) LKW-Verkehr deutlich kleinere Lagerverschiebungen aus der "temporären Mittellage"
- den Lagerverschiebungen sind permanente Oberschwingungen mit Amplituden bis zu 30 μm und Frequenzen bis zu 10 Hz überlagert
- die kleinen zahlreichen Lagerverschiebungen aus PKW-Verkehr können unter Umständen infolge ihrer Häufigkeit den Lagersummenweg stärker beeinflussen als LKW-Verkehr; betrachtet man ausschließlich die Oberschwingung, so ist bei hochauflösender Meßeinrichtung kein wesentlicher Unterschied zwischen PKW- und LKW-Verkehrsbeanspruchung zu erwarten
- die Verschiebung der "temporären Mittellage" nach vergleichsweise starker dynamischer Anregung kann mit temperaturinduzierten Zwängungen im Überbau erklärt werden, die im Verlauf vergleichsweise großer Lagerverschiebungen freigesetzt werden
- ein wirklicher Ruhezustand kann aufgrund der Verkehrsbeanspruchung, der Anregung aus der entgegengesetzten Fahrtrichtung und aus Baugrunderregungen (Bundesbahnverkehr) nicht erwartet werden
- entsprechend der Meßgenauigkeit der verwendeten Versuchseinrichtung kann ein minimaler jährlicher Lagersummenweg von rd. 500 m extrapoliert werden (mittlere Amplitude: 10 μm , mittlere Frequenz: 2 Hz).

5.2 Hauptversuche

5.2.1 Rahmenplan für den Versuchsumfang

Untersucht wurden die

- Lagerverschiebungen
- Auflagerverdrehungen

infolge Verkehr und Temperatur an zwei Punkt-Kipp-Gleitlagern. Über einen Meßzeitraum von rd. 2 Kalenderjahren (mit einem effektiven Meßzeitraum von rd. 330 Tagen) wurden die Einflußgrößen

- Jahreszeit (Quartal, Monat)
- Wochentag
- Tageszeit
- Fahrspur (rechtes Lager, linkes Lager)

auf die interessierenden Beanspruchungsparameter der Gleitlager

- Lagersummenweg
- Gleitgeschwindigkeit
- Auflagerdrehwinkel
- Winkelgeschwindigkeit

betrachtet.

Aus der Messung des Temperaturprofils im Auflagerbereich des Gruppenpeilers wurde

- der Lagersummenweg infolge Temperatur
- die Korrelation zu lokalen Klimadaten

betrachtet.

5.2.2 Meßeinrichtung

5.2.2.1 Anforderungskatalog

Wegaufnehmer

Zum Zeitpunkt der Initiierung des Forschungsvorhabens mußte aufgrund des in der Literatur beschriebenen Kenntnisstandes mit einer Vielzahl von Lagerverschiebungen $\leq 50 \mu\text{m}$ und Frequenzen bis 10 Hz gerechnet werden. Aufgrund der Vorversuche (vgl. Abschn. 5.1) konnten die Anforderungen an den Wegaufnehmer infolge der bauwerksspezifischen Verhältnisse wie folgt präzisiert werden:

- Genauigkeit: $\pm 4 \mu\text{m}$
- Meßfrequenz: $\geq 1 \text{ kHz}$.

Bei den kleinen Lagerverschiebungen handelt es sich um stochastische Schwingungen mit Umkehr- und Wendepunkten. Die Forderungen der Genauigkeit und Meßfrequenz (Anzahl der Meßwerte pro Sekunde) wurden angestrebt, um den Beginn und das Ende einer kleinen Einzelverschiebung möglichst exakt definieren zu können.

Temperatursensoren

Die Temperatursensoren sollten

- einen Temperaturbereich von -30 °C bis $+70\text{ °C}$ /14/
- eine hohe Linearität über den Temperaturbereich ($\pm 1\text{ K}$)
- eine kurze Reaktionszeit bei Temperaturänderungen ($\ll 1\text{ Minute/K}$)
- Unempfindlichkeit gegen Schwingungs- und Witterungsbeanspruchungen

aufweisen.

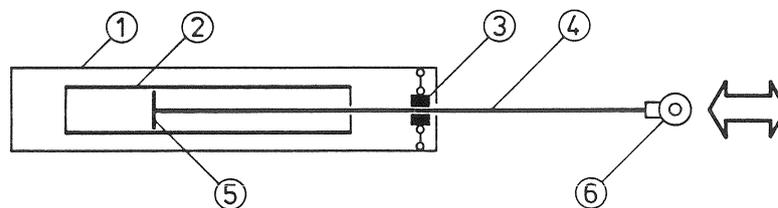
5.2.2.2 Wegaufnehmersystem

Funktionsprinzip

Für die Meßaufgabe kamen Potentiometer-Wegaufnehmer der Fa. Novotechnik KG, Ostfildern, mit der Typenbezeichnung LWH 450 zum Einsatz /38/. Aufgrund der möglichen Wärmedehnungen des Stahlüberbaus wurde ein Meßbereich von $\pm 225\text{ mm}$ gewählt.

Der Wegaufnehmer besteht aus einem Aluminium-Gehäuse (1) innerhalb dessen ein Widerstandselement (2) aus leitendem Kunststoff mit Leitsilber-Nebenschluß angeordnet ist (Bild 8). Über pendelnd befestigten reibungsarmen Gleitlagern (3) wird eine Schubstange (4) aus nichtrostendem Stahl drehbar im Widerstandselement geführt. Am Ende des Tauchankers ist ein schwingungsgedämpfter Kollektor als Schleifer (5) angeordnet. Der elastomergedämpfte Schleifer erlaubt einwandfreie Signalauflösung bei Erschütterungen und hohen Gleitgeschwindigkeiten. Bei einem Meßbereich von 450 mm ($\pm 225\text{ mm}$) weist der Wegaufnehmer nach Herstellerangaben eine Linearität von $\pm 0,05\%$ auf. Die Lebensdauer wird vom Hersteller mit $\geq 10 \cdot 10^6$ Verschiebungsereignissen angegeben.

Der Tauchanker ist über ein reibungsarmes ($\mu \leq 0,0005$) Kugelgelenk (6) (verchromte Kugel in Kunststoffführung, Radialspiel $\ll 2,8 \mu\text{m}$) mit dem Überbau verbunden.



- ① Gehäuse
- ② Widerstandselement
- ③ Gleitlager
- ④ Schubstange
- ⑤ Schleifer
- ⑥ Kugelgelenk

Bild 8: Prinzipieller Aufbau der Wegaufnehmer

Anordnung der Wegaufnehmer im Bauwerk

An jedem Gleitlager (rechtes und linkes Lager) wurde ein Wegaufnehmer seitlich in Höhe der Gleitebene rd. 70 mm unterhalb der Überbauunterkante positioniert (Bild 9). Der seitliche Abstand der Wegaufnehmer zur Lagerachse (W1, W3 gemäß Bild 5) beträgt für das rechte Lager 0,74 m, für das linke Lager 0,79 m.

Im seitlichen Abstand von rd. 7,51 m (rechtes Lager) bzw. rd. 7,60 m (linkes Lager) von der Lagerachse wurde jeweils ein weiterer Wegaufnehmer angeordnet (W2, W4, Bild 10). Diese Wegaufnehmer befanden sich in einem Abstand von rd. 2,08 m oberhalb der Mittelachse der Wegaufnehmer an den Gleitebenen (W1 und W3).

Zur möglichst verrückungs- und erschütterungsfreien Halterung wurden stabile Stahlkonstruktionen mit Justiervorrichtungen für den orthogonalen Einbau auf den unebenen Ortbetonflächen im Lagerraum verwendet (Bilder 9 und 10).

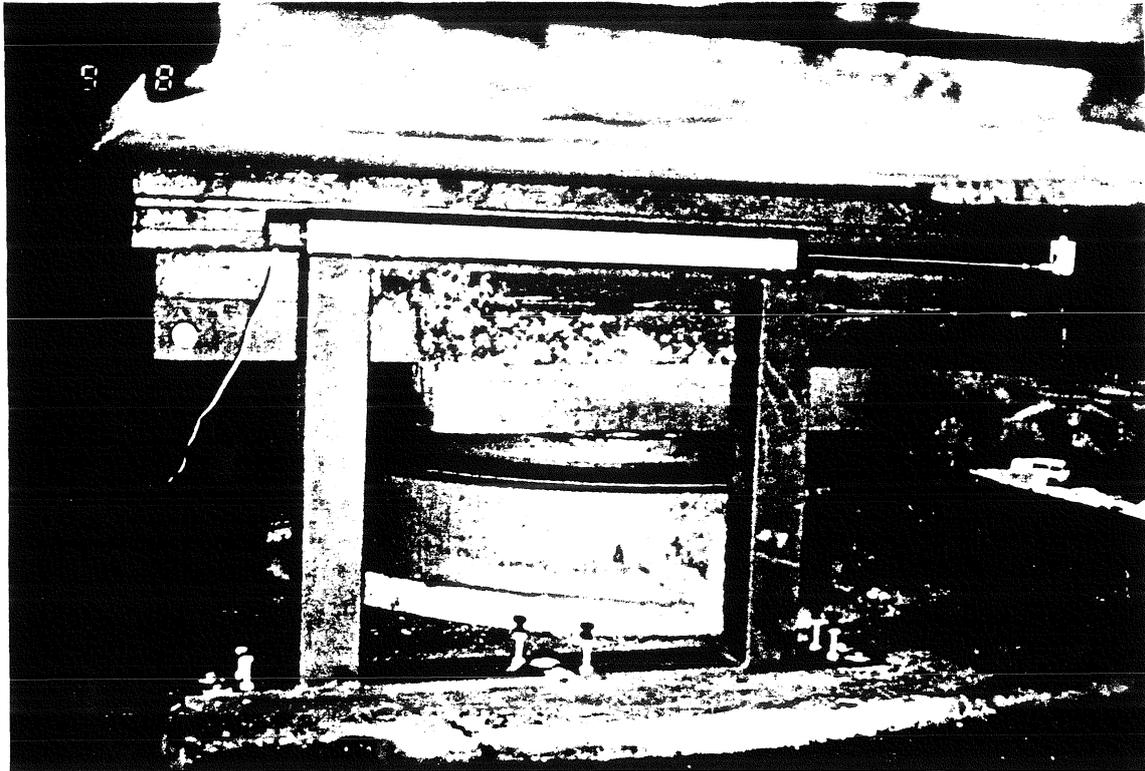


Bild 9: Anordnung des Wegaufnehmers in Höhe der Gleitebene, linkes Lager

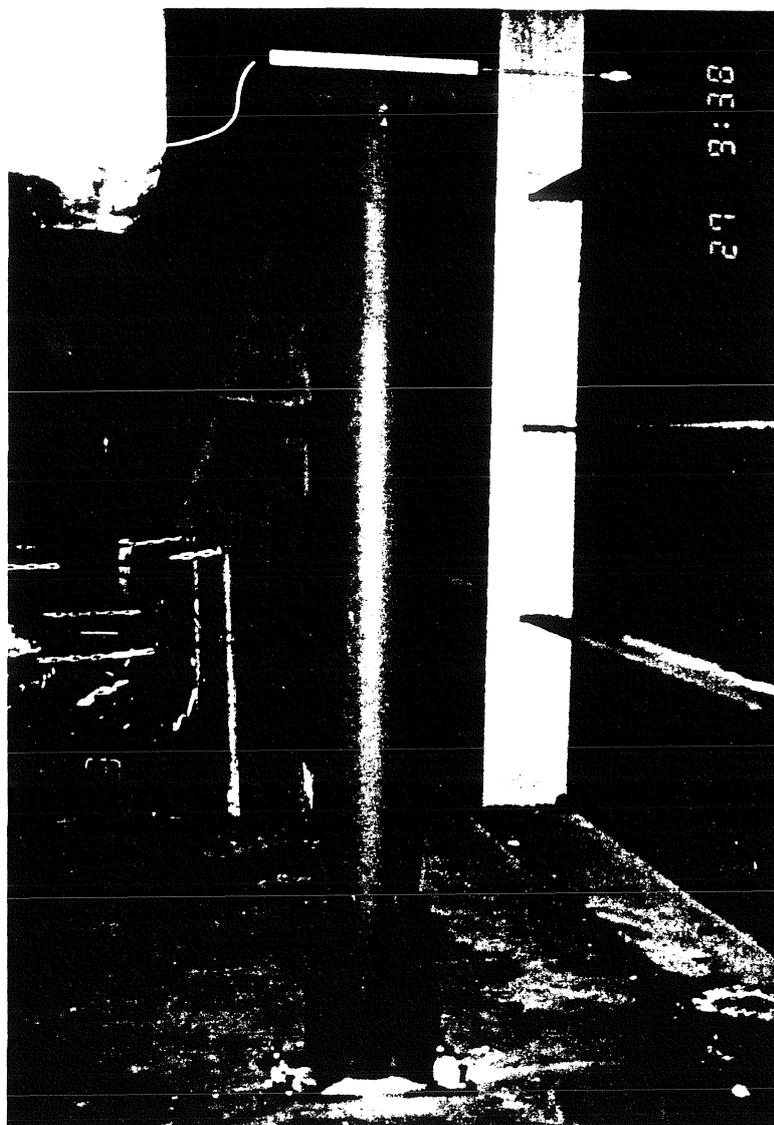


Bild 10: Anordnung des Wegaufnehmers am Endquerschnitt der Stahlbrücke, linkes Lager

5.2.2.3 Temperatursensoren

Funktionsprinzip

Auf eine Aluminiumplatte mit den Maßen 50 x 50 x 10 mm ist ein Halbleiter-Temperatursensor appliziert, der innerhalb eines Temperaturbereiches von -30 °C bis +70 °C eine Linearität von ± 1 K aufweist.

Nachdem Gewittereinflüsse bereits installierte Sensoren durch Überladung zerstörten (09./10.08.1985), wurden baugleiche Sensoren mit nichtleitendem Kunststoff auf die Aluminiumplatten appliziert. Die Isolierschicht verzögert den Temperaturübergang Aluminiumplatte/Sensor um rd. 1 Minute/K.

Der Temperatursensor ist durch ein Kunststoffgehäuse oberhalb der Aluminiumplatte geschützt; gegen eindringende Feuchtigkeit wurden Kunststoffgehäuse und Aluminiumplatte luft- und wasserdicht vergossen.

Anordnung der Temperatursensoren im Bauwerk

Über 4 Schrauben M6 wurde die Aluminiumplatte kraftschlüssig mit dem Stahlüberbau verbunden, zum verbesserten Wärmeübergang wurde Wärmeleitpaste (Fa. Fischer-Elektronik) zwischen den Kontaktflächen aufgebracht (Bild 11).



Bild 11: Temperatursensor; Anordnung unterhalb des Deckblechs der orthotropen Fahrbahnplatte

An den Innenseiten der beiden Außenstege und an der Unterseite des Deckblechs der orthotropen Fahrbahnplatte wurde ein Abstand von rd. 4,0 m vom Gruppenpfeiler je ein Temperatursensor angeordnet. Ein weiterer Temperatursensor wurde im Lagerbereich zur Messung der Umgebungslufttemperatur im Schatten installiert (Bild 12).

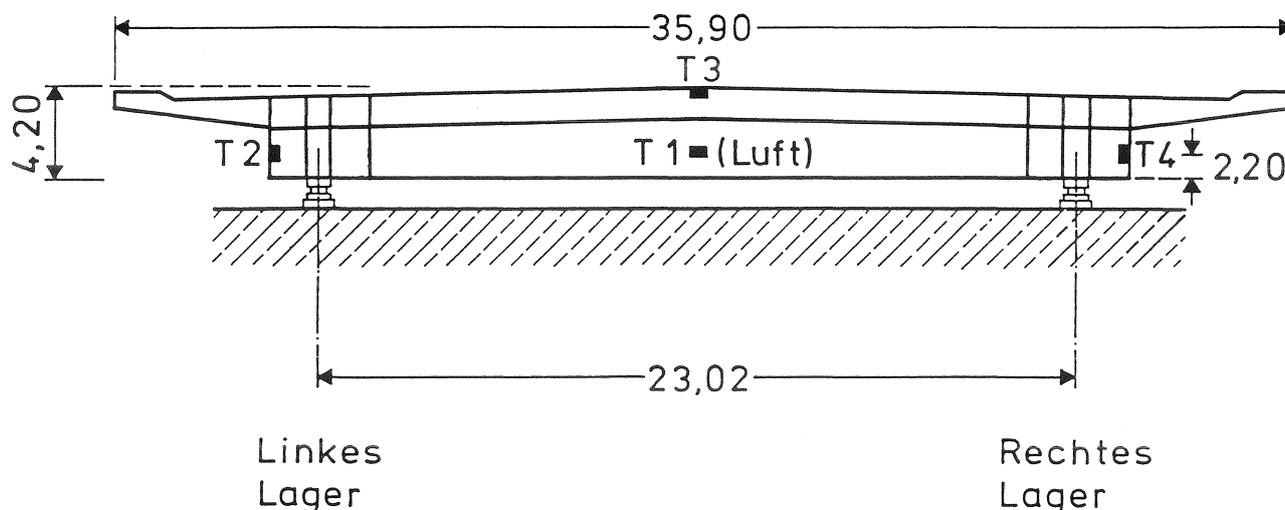


Bild 12: Anordnung der Temperatursensoren (Maße in m)

5.2.2.4 Meßwerterfassung und -verarbeitung

Funktionsprinzip

Ein Rechner wurde permanent im Bauwerk stationiert, um die Meßwerte der Wegaufnehmer zu registrieren und zu verarbeiten (Bild 13). Zum Schutz gegen unbefugten Zugriff, Feuchtigkeit und Verschmutzung, insbesondere Staubeinwirkung auf die Diskettenlaufwerke, war der Rechner in einem bis auf die Unterseite (Durchlässe für Kabel) dichten Schutzgehäuse untergebracht. Über Ventilatoren und im Winter zusätzlich durch Glühbirnen wurde eine relativ gleichmäßige Temperierung des Gehäuses erzielt.

Das Funktionsprinzip der Meßwerterfassungs- und Verarbeitungseinrichtung ist schematisch in Bild 14 dargestellt. Die Meßwerte werden analog mit einer Frequenz von 1 kHz über ein abgeschirmtes Kabel von den Wegaufnehmern an die Meßwerterfassungseinrichtung geliefert. Zur Abstimmung auf die Datenverarbeitungssequenzen der Meßwertverarbeitung wird aus jeweils 10 Meßwerten hardwaremäßig ein Mittelwert gebildet. Die Frequenz der Meßwerte für die Datenverarbeitung wird dadurch auf 0,1 kHz reduziert.

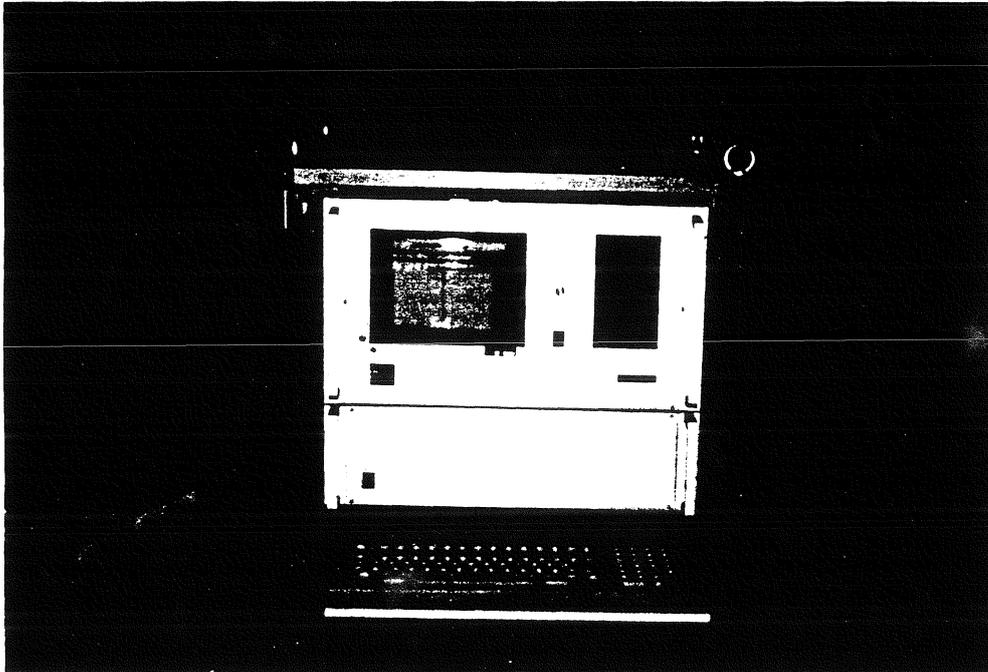


Bild 13: Meßwerterfassungseinrichtung im Brückenbauwerk

Durch die Mittelwertbildung wird eine mathematische Glättung der Verschiebungs-Zeit-Funktion in Kauf genommen, der Meßfehler ist jedoch in Anbetracht der Meßfrequenz und der Anzahl der Ereignisse gering.

Über drei Zwischenspeicher werden die Daten so gepuffert, daß eine kontinuierliche Verarbeitung gewährleistet wird. Die Meßwerte werden durch einen Verschiebungs-Zeit-Algorithmus nach Einzelverschiebungen (Größe, Dauer) differenziert. Ein Auswertealgorithmus klassiert die Einzelverschiebungen in einer Häufigkeitsmatrix.

Die gestaffelten Speicher, der Verschiebungs-Zeit- und der Auswerte-Algorithmus werden von einem Front-Prozessor verwaltet. Der Front-Prozessor steuert die Datenübergabe in Abhängigkeit von den jeweiligen Modi der Algorithmen so, daß keine Meßausfälle entstehen.

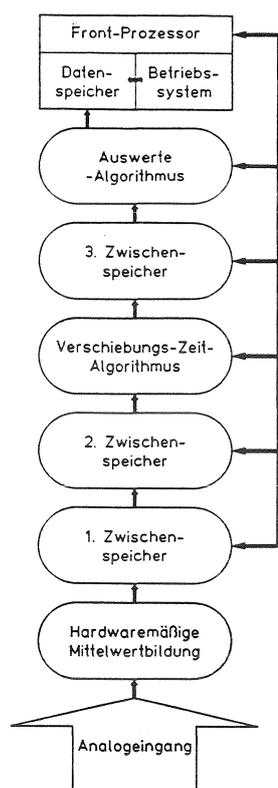


Bild 14: Schematische Darstellung der Meßwerterfassung

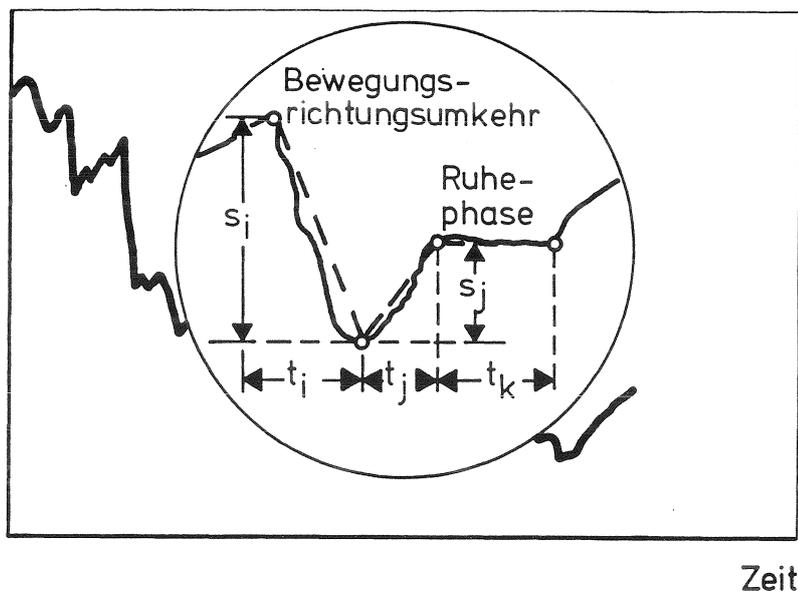
In frei wählbaren Intervallen (5 Minuten bis 1 Stunde) wird die Häufigkeitsmatrix auf Diskette abgelegt. Nach ebenfalls frei wählbaren Speicherintervallen (1 Stunde bis 24 Stunden) werden die innerhalb dieses Meßzeitraums abgelegten Unterdateien in das Betriebssystem zurückgeführt und zu einer Enddatei aufsummiert. Durch eine höhere Programmiersprache konnten die erforderlichen schnellen Rechenvorgänge nicht realisiert werden, das Betriebssystem wurde als Assembler-Programm (Z80 Maschinensprache) programmiert. Die maximale Betriebsdauer bis zum Überschreiten der Speicherkapazität der Diskette beträgt rd. 20 Tage. Zur Übertragung der in Assembler abgelegten Daten auf IBM-kompatible Rechnersysteme im ibac war ein systemgleicher Rechner erforderlich.

Durch das Zusammenfassen der Daten in eine Enddatei gehen alle Echtwerte sowie eine zeitliche Zuordnung (realtime) verloren.

Verschiebungs-Zeit-Algorithmus

Der Front-Prozessor differenziert die Einzelverschiebungen nach den Kriterien Verschiebungsrichtungsumkehr und Verschiebungsruhe (Bild 15).

Verschiebung



— Meßkurve
 --- generierte Funktion

Bild 15: Verschiebungs-Zeit-Algorithmus

Dazu werden die Daten aus dem Zwischenspeicher des Anpassersystems als Meßwertfolge abgefragt. Zu Beginn eines jeden Verschiebungsvorgangs wird der Algorithmus neu gestartet. Zunächst wird festgelegt, ob eine positive oder negative Verschiebung vorliegt. Der Rechner vergleicht jeweils den aktuellen Meßwert mit dem vorhergehenden und schreibt den Verschiebungsvorgang so lange fort, bis der aktuelle Meßwert kleiner oder gleich dem vorhergehenden ist.

Zur Gewährleistung reproduzierbarer Ergebnisse wurde (entsprechend der Genauigkeit des Wegaufnehmers) eine Verschiebungstoleranz von $4 \mu\text{m}$ festgelegt; das bedeutet, daß bei einer Differenz zwischen aktuellem und vorhergehendem Meßwert von $\geq 4 \mu\text{m}$ das Kriterium Verschiebungsumkehr ignoriert wird. Dadurch wird eine Zergliederung von Verschiebungsvorgängen in unendlich viele meßtechnisch nicht definierte Einzelverschiebungen unterdrückt.

Das gleiche geschieht für das Kriterium Verschiebungsruhe. Zur eindeutigen Definition des Verschiebungsendes bei Bewegungsruhe wird nach einer Zeittoleranz (timeout) von 20 ms das Ende der Einzelverschiebung festgesetzt.

Aus der Anzahl der Meßwerte innerhalb einer erkannten Einzelverschiebung ergibt sich die Verschiebungsdauer, aus der Differenz zwischen Endwert und Anfangswert die Verschiebungsgröße. Beide Werte werden in einem weiteren Zwischenspeicher als Wertepaar temporär abgelegt.

Entsprechend den Vorversuchen wurde angestrebt, möglichst kleine und schnelle Verschiebungen der Oberschwingungen sowie langwellige Verschiebungen zu registrieren. Es sollten jedoch die kleinen Lagerverschiebungen möglichst differenziert betrachtet werden können. Dazu wurden die Klassen mit nichtlinearen Klassengrenzen nach dem folgenden Zusammenhang belegt:

Verschiebungsgröße: $u_k = 2 \cdot u_{k-1}$
 mit $u_1 = 4 \mu\text{m}$

Verschiebungsdauer: $t_k = 2 \cdot t_{k-1}$
 mit $t_1 = 10 \text{ ms}$.

Daraus ergibt sich als kleinstes Klassierinkrement $4 \mu\text{m}$ in 10 ms und als größtes Klassierinkrement 65 mm in rd. 6 Minuten (Bild 16). Die einzelnen Klassen werden als halboffene Intervalle betrachtet, wobei immer die obere Grenze geschlossen ist. Lediglich das kleinste Klassierinkrement wurde aus meßtechnischen Gründen als feste Größe (kein Intervall) festgelegt.

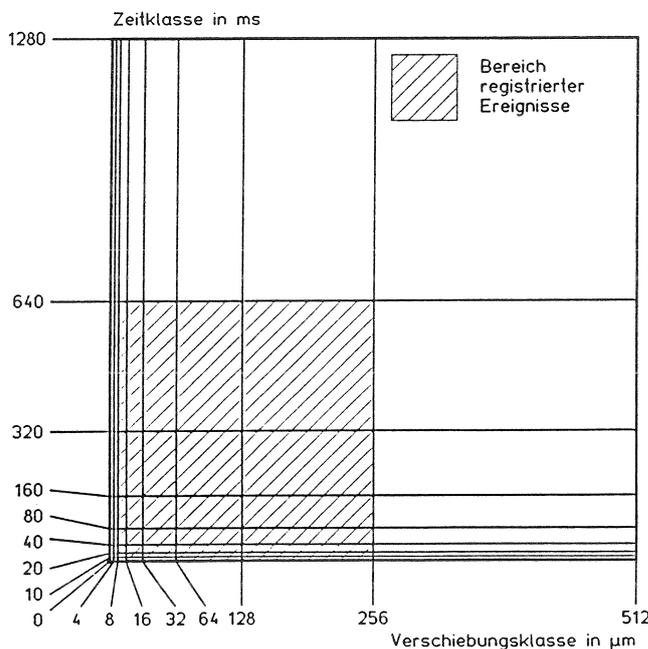


Bild 16: Klassiermatrix

5.2.2.5 Kalibrierung

5.2.2.5.1 Laborversuche

Die Meßgenauigkeit der Meßeinrichtung (Wegaufnehmer, Anpasser, Prozessoren) wurde mittels einer elektrohydraulischen Universalprüfmaschine, Fabrikat Instron 8034, Genauigkeitsklasse 1, überprüft. Über starre Halterungen wurden alle vier Wegaufnehmer am oberen Querhaupt befestigt. Im statischen Versuch (Verfahren des Kolbens und Arretieren) wurden exakt die Wegangaben des integrierten Wegmeßsystems der Prüfmaschine erreicht. Bei dynamischen Versuchen erwies sich die Meßeinrichtung als so präzise, daß stick-slip-Bewegungen aus dem Impulsgenerator der Prüfmaschine registriert wurden. Wegen des gestaffelten Speichersystems und der anschließenden Meßwertverarbeitung (Bild 14) ist die Zeit zwischen der Meßwertregistrierung und der Ausgabe der Einzelverschiebung auf dem Monitor (oder auf einem externen Drucker) für einzelne Ereignisse unterschiedlich. Es kann daher einer bestimmten Verschiebung nicht die exakte Zeit (realtime) zugeordnet werden. Systematische Einflüsse (z. B. aus dem Impulsgenerator) können nicht berücksichtigt werden, so daß mit der Prüfmaschine nur eine größenordnungsmäßige Kalibrierung vorgenommen werden konnte. Kalibrierversuche mit elektromechanischen Prüfmaschinen führten zu vergleichbaren Effekten infolge ruckartiger Bewegungen im Spindelbetrieb.

Der Wegaufnehmer ist aufgrund seines Meßprinzips (berührungsarme schwingungsgedämpfte Kollektoren, lineare Wegmessung nach einfachem elektrotechnischem Prinzip) für hochfrequente Wegmessung geeignet. Es mußte überprüft werden, ob die Auswertelektronik und die anschließende Meßwertverarbeitung für die schnellen Vorgänge tauglich ist. Dazu wurden mit einem schnellen Prozessor (MINC-Modular-Instrumental Computer PDP 11-34) synthetisch generierte Signale in Form von Sägezahn- und Integerfunktionen in die Schnittstelle Wegaufnehmer-/Anpassersystem eingeleitet. Über ein Digital-Modul konnte die gleiche Datenstruktur für Wegsignale erzeugt werden, wie sie von dem Wegaufnehmersystem analog angeboten wird. Nach der Verarbeitung dieser Signale durch den Verschiebungs-Zeit-Algorithmus (Bild 15) konnten die zuvor eingegebenen Daten differenziert nach Größe und Zeit exakt wiedergefunden werden.

5.2.2.5.2 In situ-Probelauf und -Kalibrierung

Die Meßeinrichtung wurde im Mai 1985 für den Probelauf in der Grunewaldbrücke installiert. Erste Auswertungen ergaben jedoch, daß die 4 Wegaufnehmer derart differierende Bewegungen registrierten, die mit der Bauwerksmechanik nicht korreliert werden konnten.

Zur selben Zeit wurde eine baugleiche Meßwerterfassungseinrichtung, jedoch mit anderem Wegaufnehmersystem, in eine Spannbetonbrücke installiert und auf Funktionstüchtigkeit getestet /5/. Beim Auftreten von Störungen oder Fehlfunktionen an einer der beiden Systeme wurde der Mangel an der Software oder die entsprechende Komponente der Hardware prinzipiell an beiden Anlagen behoben oder ausgetauscht.

Nach Rücksprache mit den an der Entwicklung beteiligten Firmen wurden zunächst Anstrengungen unternommen, die Meßeinrichtung in der Brücke zu reparieren, um den Zeitplan des Forschungsvorhabens einhalten zu können. Dazu waren Überlegungen bei den einzelnen Unternehmen, Kontakte einzelner Beteiligter sowie Besprechungen aller notwendig, da sowohl Wegaufnehmersystem, Datenerfassung und Software spezielle Neuentwicklungen darstellen, die wegen der hohen Meßrate präzise aufeinander abgestimmt werden mußten. Dabei stellte sich heraus, daß die Software bei der Datenübergabe an den Schnittstellen der Rechnerkomponenten die Abspeichersequenzen nicht exakt erfaßte.

Bei der Erstellung der Software für die Wegklassierung (Auswerte-Algorithmus) wurden die Intervallgrenzen für beide Verschiebungsrichtungen gleichgesetzt. Dieser Softwarefehler führte zu einer ungleichmäßigen Registrierung in eine Verschiebungsrichtung.

Marktübliche Bausteine konnten durch den Service des Wegaufnehmer-Herstellers im Bauwerk erneuert werden. Verschiedene Bauteile mußten jedoch in den USA bestellt werden, die Beschaffung erforderte größeren Zeitaufwand. Bei neuerlichen Brückenbesuchen zeigte sich teilweise der Defekt der gleichen zuvor ausgetauschten Bausteine. Da hier eine systematische Überbeanspruchung einzelner Bauteile unterstellt werden mußte, wurden alle Teile, die dieser Gefährdung unterlagen, durch überdimensionierte Bausteine ersetzt.

Das Netzteil der Anlage war wegen der extremen Beanspruchung wechselnder Spannung im Stromsystem der Brücke und insbesondere wegen der empfindlichen Spannungen im Meßsystem besonders sorgfältig ausgewählt worden (sog. NATO-Ausführung). Es zeigte sich bei den Kontrollen, daß Teile des Netzteils zweimal verschmort waren, die Störungen führten zur Drift der Meßwerte. Die zweifache Beschaffung dieses Netzteils führte zu erheblichen Zeitverlusten.

Aufgrund der besonderen Umgebungsbedingungen (Atmosphärien) mußten nach relativ kurzer Betriebsdauer starke Korrosionserscheinungen am Meßsystem registriert werden. Die bereits in sogenannter "NATO-Ausführung" installierten Stahlverbindungen mußten teilweise erneuert werden, freiliegende Metallteile wurden, soweit technisch möglich, mit einem speziellen Ölspray geschützt. Das Schutzgehäuse der Meßwerterfassungseinrichtung wurde weiter abgedichtet, die Zuluft mit einem Filter versehen und der Innenraum mittels Kieselgur trocken gehalten. Trotzdem gelangten Staubpartikel in die Diskettenlaufwerke, die wiederholt gereinigt und einmal durch neue ersetzt werden mußten.

Nachdem diese Reparaturen durchgeführt waren, konnte die eigentliche Meßphase im August 1985 begonnen werden. Die nun registrierten Wege erlaubten eine erste Interpretation der Meßwerte. Diese Vorauswertung ergab, daß die Größenordnung der Einzelbewegungen weit unterschätzt worden war. Die Mehrzahl der erkannten Einzelbewegungen lag im Bereich $< 16 \mu\text{m}$.

Nach Rücksprache mit dem Hersteller der Meßwerterfassungsanlage wurde das System an den Hersteller zurückgeschickt, um dort den Versuch zu unternehmen, das elektronische Rauschen weiter zu unterdrücken. Es wurden erneut Bausteine getauscht und Filter zwischengeschaltet. Das Rauschen konnte minimiert, jedoch nicht eliminiert werden. Die Größenordnung muß mit entsprechenden Wegsignalen $< 8 \mu\text{m}$ angenommen werden.

Zur Erfassung von Einflüssen aus dem elektronischen Rauschen wurden Sondermessungen im Bauwerk durchgeführt, wobei die Wegaufnehmer aus ihren Haltekonstruktionen am Endquerträger abgebaut wurden. Für die Dauer der Sondermessungen wurden die Wegaufnehmer in eine starre Rahmenkonstruktion eingebaut, die einen definierten Abstand garantierte. Außer den Temperaturdehnungen der Rahmenkonstruktion konnte keine Relativverschiebung stattfinden.

Die Rahmenkonstruktion wurde möglichst schwingungsgedämpft auf Gummi-Metall-Dämpfungselementen im Widerlagerbereich gelagert. Die Anordnung und Kabelführung der übrigen Meßeinrichtung wurde nicht verändert. Um eventuelle zeitliche oder temperaturbedingte Einflüsse erfassen zu können, wurden diese Messungen in bestimmten Zeitintervallen (2 Monate) über jeweils einen Zeitraum von 24 h wiederholt, wobei die Abspeicherintervalle 1 betragen. Signifikante Einflüsse aus Temperatur und Tageszeit konnten nicht registriert werden, die gemessenen Rauschsignale wurden aufgezeichnet und später statistisch in die Auswertung eingerechnet.

5.2.2.5.3 Schlußfolgerungen

Die beschriebenen Voruntersuchungen bestätigten die Eignung des Wegaufnehmersystems, schnelle und höherfrequente Schwingungsverschiebungen zu registrieren. Wegen des gestaffelten Speichersystems und der besonderen Auswertung durch den Prozessor im Bauwerk konnten Einzelereignisse nicht differenziert ausgewertet werden. Das jeweils neue Festlegen des Bezugspunktes für den Verschiebungs-Zeit-Algorithmus führte dazu, daß wesentlich die Oberschwingungen der Lagerverschiebungen registriert wurden. Konventionelle Meßeinrichtungen sind nur bedingt geeignet, solche Verschiebungen zu registrieren. Wegaufnehmer mit vergleichbarer Genauigkeit weisen jedoch einen vergleichsweise geringen Gesamtmeßbereich auf, der die jahreszeitlich bedingten Temperaturdehnungen nicht abdeckt.

5.2.3 Dauermessungen

Die Meßeinrichtung wurde im August 1985 für den Dauerbetrieb in der Grunewaldbrücke installiert. Bis zum Juni 1987 war die Einrichtung bis auf wenige Unterbrechungen permanent im Einsatz (rd. 8300 h). Als Ursachen für Meßunterbrechungen erwiesen sich das Überschreiten der Diskettenspeicherkapazität (bei 24 h Abspeicherintervallen nach rd. 20 d) oder Stromausfälle. Die Abspeichersoftware beinhaltete ein automatisches Register, das die Unterbrechung der Stromzufuhr nach den Kriterien Stromausfall oder kontrollierte Versorgungsunterbrechung über den Geräteschalter bzw. die Eingabestatur dokumentierte. Danach ergaben sich über die gesamte Betriebsdauer zahlreiche Stromausfälle von wenigen Sekunden und vereinzelte Ausfälle über

mehrere Tage (max. 4 d). Die kurzen Stromausfälle wurden über eine Stromausfallsicherung gepuffert und das Betriebssystem wurde planmäßig über Autostart reaktiviert. Dagegen konnte nach längeren Stromausfallzeiten das Autostart-System nicht immer aktiviert werden. Die Betriebszeiten der Meßeinrichtung sind in der Tabelle 2 für die Jahre 1985, 1986 und 1987 aufgeführt.

Der Einbau eines neuen Fahrbahnüberganges am Gruppenfeiler zwang im März 1986 zum Ausbau der Meßeinrichtung. Durch die Baumaßnahmen war der Zugang zur Meßeinrichtung nicht mehr gesichert und die Gefahr der Wegaufnehmerbeschädigung durch die Bauarbeiten sowie der Verschmutzung für die Rechnerelektronik durch Strahlarbeiten war gegeben.

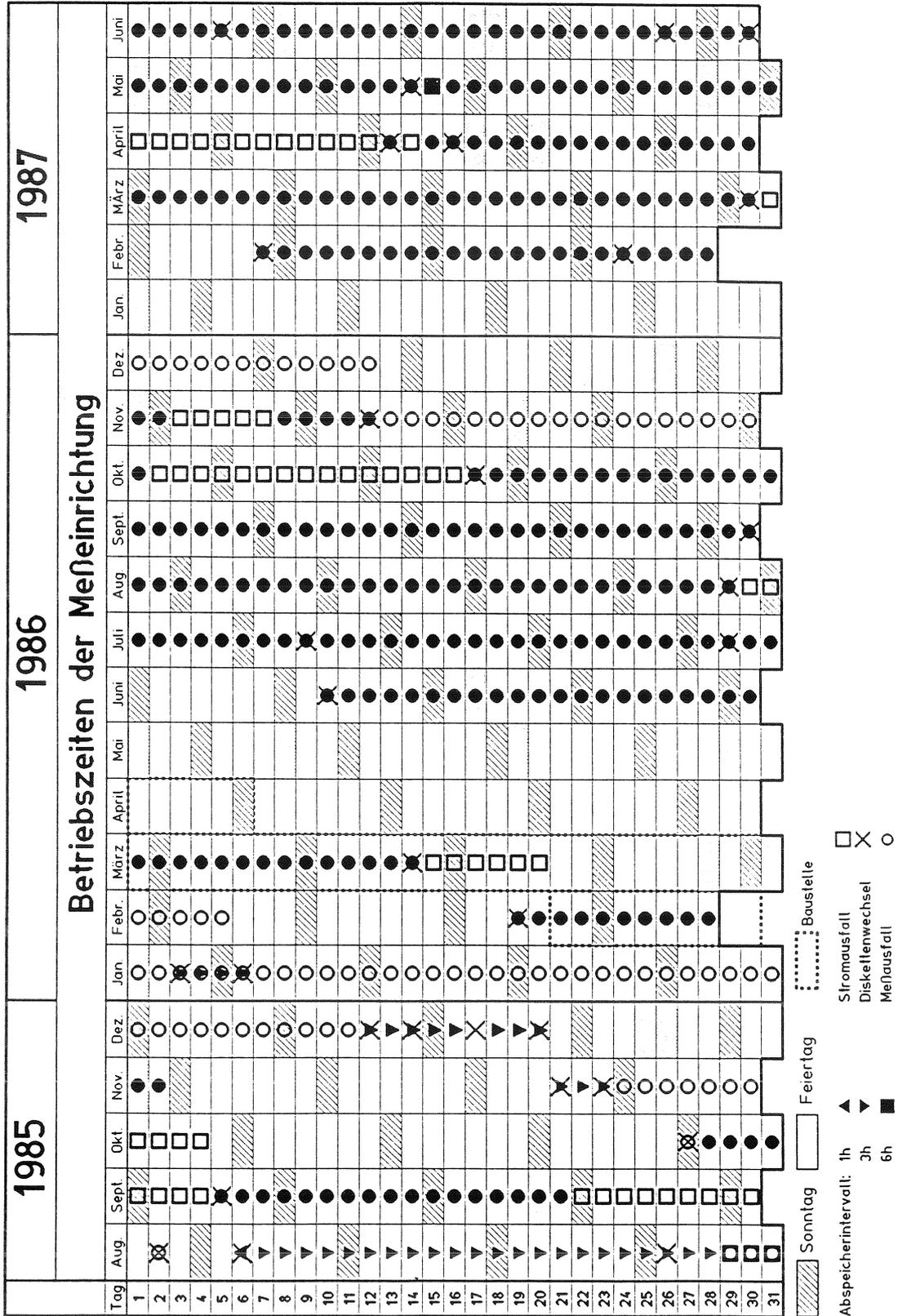
Nach dem Ausbau der Meßeinrichtung wurde diese zunächst im ibac gewartet, d. h. die Diskettenlaufwerke und die Elektronik waren zu reinigen. Anschließend wurde die Elektronik des Anpassersystems auf korrekte elektrische Signale überprüft. Die Bauarbeiten dauerten planmäßig rd. 8 Wochen, die Meßeinrichtung wurde nach Abschluß der Wartungsarbeiten im Juni 1986 erneut installiert.

Insgesamt war die Meßeinrichtung während der Dauerbetriebsphase im Bauwerk rd. 8300 h im Einsatz. Während dieses Meßzeitraums wurden rd. $1,2 \cdot 10^{11}$ Verschiebungs-Meßwerte (Meßfrequenz 1 kHz, 4 Wegaufnehmer) und rd. $1,0 \cdot 10^5$ Temperatur-Meßwerte registriert. Infolge der hardwaremäßigen Meßwertreduzierung (Meßfrequenz 0,1 kHz) wurden $1,2 \cdot 10^{10}$ Meßwerte verarbeitet, rd. $1,9 \cdot 10^9$ Meßwerte abgespeichert und für diesen Bericht ausgewertet.

5.2.4 Dokumentation des Lagerzustands

Am 01.07.1987 wurde mit Bauarbeiten zum Austausch der Reibpartner an allen Gleitlagern der Grunewaldbrücke (Stahl- und Spannbetonüberbau) begonnen. Wegen der Baumaßnahmen am Gruppenfeiler wurde die Meßeinrichtung am 30.06.1987 ausgebaut. Am 06.07.1987 wurde die PTFE-Scheibe und die zugehörige POM-Platte des linken Lagers, am 07.07.1987 die Reibpartner des rechten Lagers ausgebaut. Der Zustand der Reibpartner wurde im Bauwerk unmittelbar nach dem Ausbau dokumentiert, anschließend wurden die Bauteile ins ibac eingeliefert.

Tabelle 2 : Betriebszeiten der Meßeinrichtung



■ Sonntag
 ▲ Abspeicherintervall: 1h
 ▼ Abspeicherintervall: 3h
 ■ Abspeicherintervall: 6h
 □ Baustelle
 × Stromausfall
 ○ Diskettenwechsel
 ○ Meißenausfall

6 MESSERGEBNISSE

6.1 Lagerbewegungen an Gleitlagern

6.1.1 Allgemeines zur Auswertung

Die auf Disketten im Bauwerk abgespeicherten Daten wurden im ibac in den Institutsrechner (VAX) eingelesen. Zunächst wurden die durch Sondermessungen im Bauwerk ermittelten Rauschsignale (vgl. Abschn. 5.2.2.5.2) für jede Verschiebungs- bzw. Zeitklasse gesondert abgezogen. Dabei beschränkte sich das Rauschen im wesentlichen auf die Verschiebungsklassen $4\ \mu\text{m}$ und zugehörigen Zeitklassen $< 40\ \text{ms}$, wobei rd. 75 % der Rauschwerte in der Verschiebungs-Zeit-Klasse $4\ \mu\text{m}/10\ \text{ms}$ (kleinstes Klassier-Inkrement) entfielen. Der abzuziehende Rauschanteil betrug bis zu rd. 15 % der Meßwerte pro Tag.

Der Lagersummenweg wurde durch Multiplikation der Anzahl der Einzelverschiebungen in jeder Verschiebungsklasse mit dem Wert der Klassenmitte errechnet (die Meßwerte wurden innerhalb einer Klasse als symmetrisch normalverteilt angenommen). Für die Verschiebungsklasse $4\ \mu\text{m}$ wurde die Anzahl der Ereignisse mit der oberen Klassengrenze ($4\ \mu\text{m}$) multipliziert, da aus meßtechnischen Gründen in dieser Klasse nur Verschiebungen = $4\ \mu\text{m}$ erkannt wurden.

6.1.2 Stündlicher Lagersummenweg

An ausgewählten Tagen erfolgten Messungen mit stündlichen Abspeicherintervallen der Meßwerterfassungseinrichtung, um tageszeitliche Einflüsse auf die Lagerverschiebung feststellen zu können. In den Tabellen 3.1 und 3.2 sind für die 51. Kalenderwoche 1985 die stündlichen Lagersummenwege für das rechte und linke Lager aufgeführt (Meßausfall am Dienstag, den 17.12.1985). Zur näheren Differenzierung von Verkehrseinflüssen wurden die Meßwerte nach Tageszeit-Intervallen statistisch ausgewertet (Tab. A1 und A2). Zusätzlich wurden die Meßwerte nach

- Wochentagen (Montag bis Samstag)
- Werktagen (Montag bis Freitag)
- Wochenende (Samstag und Sonntag)

unterschieden (Tab. 4.1 und 4.2).

Tabelle 3.1: Stündlicher Lagersummenweg, differenziert nach Wochentagen; rechtes Lager

Stündlicher Lagersummenweg ΣS_h in m Rechtes Lager						
Stunde	Mo	Mi	Do	Fr	Sa	So
	16.12.85	18.12.85	19.12.85	13.12.85	14.12.85	15.12.85
1	0,651	0,506	0,648	0,581	0,565	0,317
2	0,751	0,499	0,578	0,580	0,527	0,386
3	0,693	0,495	0,624	0,570	0,523	0,530
4	0,593	0,564	0,657	0,465	0,534	0,578
5	0,611	0,543	0,698	0,535	0,604	0,623
6	0,575	0,602	0,619	0,451	0,589	0,654
7	0,551	0,566	0,513	0,373	0,545	0,688
8	0,589	0,607	0,535	0,406	0,573	0,669
9	0,658	0,570	0,423	0,597	0,590	0,564
10	0,651	0,669	0,409	0,552	0,590	0,532
11	0,727	0,613	0,374	0,442	0,382	0,453
12	0,618	0,611	0,428	0,395	0,544	0,360
13	0,622	0,614	0,482	0,507	0,581	0,352
14	0,637	0,558	0,523	0,530	0,654	0,342
15	0,569	0,471	0,492	0,418	0,446	0,363
16	0,550	0,436	0,546	0,663	0,572	0,448
17	0,517	0,483	0,489	0,856	0,624	0,484
18	0,429	0,431	0,532	0,895	0,776	0,512
19	0,352	0,526	0,650	0,756	0,585	0,577
20	0,387	0,492	0,900	0,737	0,597	0,690
21	0,330	0,528	0,765	0,745	0,574	0,721
22	0,332	0,580	0,587	0,685	0,555	0,731
23	0,332	0,573	0,520	0,546	0,463	0,788
24	0,332	0,532	0,464	0,387	0,397	0,777

**Tabelle 3.2: Stündlicher Lagersummenweg, differenziert nach Wochentagen;
linkes Lager**

Stündlicher Lagersummenweg ΣS_h in m Linkes Lager						
Stunde	Mo	Mi	Do	Fr	Sa	So
	16.12.85	18.12.85	19.12.85	13.12.85	14.12.85	15.12.85
1	0.652	0.530	0.531	0.577	0.544	0.343
2	0.660	0.464	0.489	0.650	0.554	0.400
3	0.677	0.481	0.504	0.580	0.577	0.465
4	0.623	0.609	0.567	0.490	0.605	0.535
5	0.635	0.579	0.582	0.538	0.641	0.583
6	0.651	0.584	0.692	0.508	0.593	0.609
7	0.554	0.600	0.633	0.441	0.617	0.647
8	0.546	0.637	0.552	0.440	0.609	0.628
9	0.668	0.612	0.465	0.562	0.616	0.554
10	0.647	0.679	0.392	0.492	0.581	0.537
11	0.704	0.625	0.392	0.442	0.355	0.443
12	0.659	0.620	0.462	0.444	0.529	0.368
13	0.637	0.616	0.521	0.532	0.570	0.380
14	0.584	0.500	0.583	0.535	0.574	0.373
15	0.591	0.443	0.547	0.457	0.447	0.380
16	0.554	0.401	0.572	0.530	0.600	0.454
17	0.501	0.481	0.550	0.684	0.662	0.473
18	0.486	0.484	0.577	0.647	0.670	0.505
19	0.423	0.563	0.723	0.680	0.477	0.552
20	0.438	0.495	0.782	0.640	0.466	0.588
21	0.417	0.502	0.753	0.661	0.478	0.668
22	0.390	0.569	0.717	0.489	0.426	0.727
23	0.390	0.546	0.584	0.445	0.396	0.740
24	0.390	0.518	0.515	0.398	0.351	0.719

Tabelle 4.1: statistische Daten des stündlichen Lagersummenwegs, differenziert nach Zeitintervallen Woche, Arbeitstagen und Wochenende; rechtes Lager

Wochenzeitraum	Tageszeit	Absolute Häufigkeit	Median	Spannweite	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
		n	x	R	\bar{x}	s	v
			m	m	m	m	
Woche Mo - So	0-6	36	0.578	0.398	0.569	0.083	0.007
	6-9	18	0.568	0.315	0.558	0.085	0.007
	9-11	12	0.542	0.353	0.533	0.120	0.014
	11-13	12	0.525	0.269	0.509	0.104	0.011
	13-16	18	0.527	0.321	0.512	0.093	0.009
	16-20	24	0.555	0.548	0.595	0.157	0.025
	20-24	24	0.550	0.458	0.552	0.152	0.023
Arbeitstage Mo - Fr	0-6	24	0.581	0.264	0.586	0.072	0.005
	6-9	12	0.558	0.284	0.534	0.088	0.008
	9-11	8	0.583	0.353	0.555	0.132	0.017
	11-13	8	0.559	0.226	0.535	0.093	0.009
	13-16	12	0.538	0.245	0.533	0.073	0.005
	16-20	16	0.522	0.548	0.590	0.184	0.034
	20-24	16	0.530	0.435	0.515	0.144	0.021
Wochenende Sa - So	0-6	12	0.549	0.336	0.536	0.096	0.009
	6-9	6	0.581	0.143	0.605	0.059	0.004
	9-11	4	0.493	0.208	0.489	0.091	0.008
	11-13	4	0.452	0.229	0.459	0.120	0.014
	13-16	6	0.447	0.312	0.471	0.121	0.015
	16-20	8	0.591	0.292	0.606	0.094	0.009
	20-24	8	0.648	0.390	0.626	0.149	0.022

Tabelle 4.2: Statistische Daten des stündlichen Lagersummenwegs, differenziert nach Zeitintervallen Woche, Arbeitstagen und Wochenende; linkes Lager

Wochenzeitraum	Tageszeit	Absolute Häufigkeit n	Median x	Spannweite R	Mittelwert \bar{x}	Standardabweichung s	Variationskoeffizient v
			m	m	m	m	
Woche Mo - So	0-6	36	0,578	0,350	0,564	0,077	0,006
	6-9	18	0,605	0,228	0,577	0,069	0,005
	9-11	12	0,514	0,348	0,524	0,122	0,015
	11-13	12	0,531	0,291	0,528	0,098	0,010
	13-16	18	0,533	0,227	0,507	0,076	0,006
	16-20	24	0,551	0,359	0,565	0,100	0,010
Arbeits- tage Mo - Fr	20-24	24	0,509	0,402	0,533	0,133	0,018
	0-6	24	0,580	0,228	0,577	0,068	0,005
	6-9	12	0,558	0,228	0,559	0,077	0,006
	9-11	8	0,558	0,312	0,546	0,131	0,017
	11-13	8	0,574	0,215	0,561	0,083	0,007
	13-16	12	0,541	0,189	0,525	0,062	0,004
Wochen- ende Sa - So	16-20	16	0,556	0,359	0,572	0,108	0,012
	20-24	16	0,509	0,363	0,518	0,116	0,014
	0-6	12	0,566	0,298	0,537	0,090	0,008
	6-9	6	0,616	0,093	0,612	0,031	0,001
	9-11	4	0,490	0,226	0,479	0,101	0,010
	11-13	4	0,455	0,202	0,462	0,103	0,011
	13-16	6	0,451	0,227	0,471	0,096	0,009
	16-20	8	0,528	0,205	0,549	0,084	0,007
	20-24	8	0,573	0,388	0,563	0,166	0,027

Innerhalb von Werktagen beträgt der mittlere stündliche Lagersummenweg rd. 0,55 m, die Standardabweichung beträgt rd. 0,02 m, d. h. es treten keine signifikanten Einflüsse während dieser Meßphase auf. Am Wochenende ergibt sich ein vergleichbarer Lagersummenweg (0,53 m), die Standardabweichung ergibt sich zu 0,07 m. Der Minimalwert des stündlichen Lagersummenwegs wird während dieser Meßphase am Sonntag zwischen 11.00 und 13.00 Uhr registriert, der Maximalwert am Freitag zwischen 16.00 und 18.00 Uhr, der größte Variationskoeffizient wird an Werktagen in der Zeit zwischen 16.00 und 20.00 Uhr mit 0,034 registriert, am Wochenende in der Zeit zwischen 20.00 und 24.00 Uhr mit 0,022.

Das Histogramm des stündlichen Lagersummenwegs am Freitag und am Sonntag (51. KW 1985) illustriert die zuvor beschriebenen Feststellungen (Bild 17).

Am Freitag wird der stündliche Lagersummenweg bis zum Nachmittag vermutlich durch innerstädtischen Nahverkehr beeinflusst, relative Maxima treten um 9.00 und 14.00 Uhr auf. Ab 16.00 Uhr nimmt der Lagersummenweg infolge Wochenend- und überwiegend Pendlerverkehr bis um 18.00 Uhr progressiv zu, zwischen 17.00 und 18.00 Uhr ist der stündliche Lagersummenweg rd. doppelt so groß als der mittlere stündliche Lagersummenweg des Tages. In der Zeit von 19.00 bis rd. 20.00 Uhr wird der Lagersummenweg durch den Wochenendverkehr geprägt, der stündliche Lagersummenweg liegt hier um rd. 30 % über dem Mittelwert. Ab 22.00 Uhr nimmt der Lagersummenweg sehr stark ab und erreicht um 24.00 Uhr annähernd das tägliche Minimum. Am Sonntag (15.12.1985) nimmt der stündliche Lagersummenweg von 0.00 Uhr bis um 7.00 Uhr progressiv zu, diese Zunahme kann auf Berufsverkehr der Schwerindustrie im Großraum Duisburg (Ruhrgebiet) zurückgeführt werden. Zwischen 11.00 und 15.00 Uhr wird das sonntägliche und wöchentliche Minimum des stündlichen Lagersummenwegs festgestellt. Ab 16.00 Uhr nimmt der Lagersummenweg wieder infolge Berufsverkehr und innerstädtischem Verkehr stark zu, um 19.00 Uhr steigt der stündliche Lagersummenweg infolge von Wochenendpendelverkehr und Fernverkehr sprunghaft an und erreicht um 23.00 Uhr das tägliche Maximum, dessen Größe vergleichbar den Lagerverschiebungen aus Wochenendverkehr am Freitag (19.00 bis 20.00 Uhr) ist.

Die Differenzierung des Lagersummenwegs nach Tagesstunden zeigt, daß Verkehrseinflüsse (lokale, regionale, überregionale Verkehrsströme, rush-hour) den stündlichen Lagersummenweg an ausgewählten Wochentagen nennenswert beeinflussen. Über längere Zeiträume (Wochentage, Werkzeuge, Wochenende) werden diese Einflüsse infolge der stochastischen Beanspruchung jedoch reduziert. Der Mittelwert des stündlichen Lagersummenwegs innerhalb von ausgewählten Zeitintervallen schwankt nur innerhalb enger Grenzen (Tab. 4.1 und 4.2).

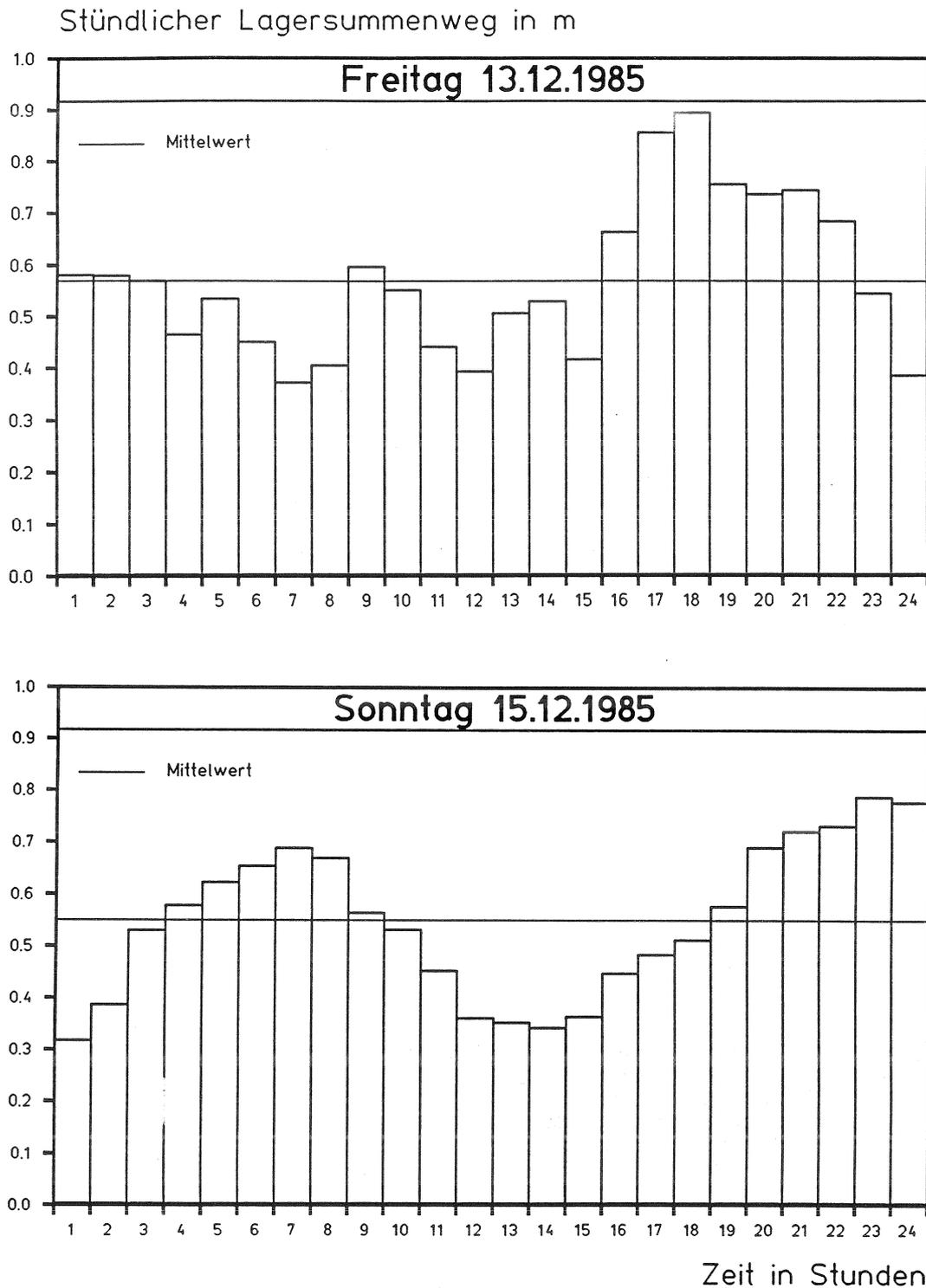


Bild 17: Histogramm des stündlichen Lagersummenwegs an ausgewählten Wochentagen innerhalb des Meßzeitraums; rechtes Lager

6.1.3 Täglicher Lagersummenweg

6.1.3.1 Täglicher Lagersummenweg, differenziert nach Kalendertagen

Für den Meßzeitraum vom August 1985 bis Juni 1987 wurde aus den vollständig vorliegenden Daten (jeweils Meßwerte über 24 h) der tägliche Lagersummenweg gemäß Abschnitt 6.1.1 ermittelt und getrennt nach Kalenderjahren (1985, 1986, 1987) tabellarisch dargestellt. In der Tabelle 5 sind die täglichen Lagersummenwege für das rechte Lager (vgl. Bild 5) und in Tabelle 6 für das linke Lager (vgl. Bild 5) dargestellt.

Signifikante zeitliche Einflüsse aus Kalendertagen, Wochentagen oder Monaten können nicht gewonnen werden. Aus den gesamten Meßzeiträumen ergibt sich ein Mittelwert des täglichen Lagersummenwegs für das rechte Lager von rd. 13,96 m, und für das linke Lager von rd. 13,56 m (Tab. 5 und 6).

Während der Meßphase wurde für das rechte Lager ein minimaler täglicher Lagersummenweg von 9,05 m (26.06.1986) und ein maximaler täglicher Lagersummenweg von 21,05 m (23.10.1986) registriert. Am linken Gleitlager wurde ein minimaler Lagersummenweg von 6,86 m (25.02.1987) und ein maximaler Lagersummenweg von 20,24 m (29.05.1987) ermittelt. Die Standardabweichung betrug für die Meßwerte des rechten Lagers $s = 1,8$ m und des linken Lagers $s = 2,4$ m (Tab. 7).

Tabelle 5 : Täglicher Lagersummenweg . rechtes Lager

1985												1986												1987																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
Täglicher Lagersummenweg ΣS_d in m, Rechtes Lager																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
Tag	Aug.	Sept.	Oktober	Nov.	Dez.	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Oktober	Nov.	Dez.	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Tag	Aug.	Sept.	Oktober	Nov.	Dez.	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
1	-	-	-	14.520	-	-	13.294	-	-	-	-	-	18.007	13.202	12.259	13.888	-	-	-	11.662	-	-	13.543	13.266	2	13.710	-	-	13.219	-	-	12.812	-	-	-	-	-	18.007	14.431	-	14.238	-	-	-	-	-	-	14.223	14.363	3	-	-	-	-	-	12.212	13.230	-	-	-	-	-	18.756	15.744	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14.359	13.619	4	-	-	-	-	-	13.829	13.703	-	-	-	-	-	19.240	14.101	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14.375	14.250	5	-	16.406	-	-	-	12.800	13.836	-	-	-	-	9.692	10.395	12.497	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14.508	11.134	6	10.133	11.421	-	-	-	13.245	12.750	-	-	-	-	9.986	12.025	13.209	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14.359	12.444	7	10.144	15.635	-	-	-	-	11.648	-	-	-	-	-	11.255	13.674	-	-	-	-	14.148	-	-	-	-	14.467	14.229	8	10.263	13.877	-	-	-	-	12.619	-	-	-	-	-	13.905	13.815	-	13.181	-	-	13.444	-	-	-	-	14.099	13.458	9	10.242	15.068	-	-	-	-	13.590	-	-	-	-	-	13.978	13.778	-	13.177	-	-	13.620	13.006	-	-	-	13.706	-	10	11.183	11.816	-	-	-	-	13.378	-	-	-	-	-	12.982	12.919	-	13.741	-	-	13.701	11.145	-	-	-	14.288	-	11	11.594	14.570	-	13.632	-	-	14.979	-	-	-	-	9.448	14.354	13.793	-	14.015	-	-	13.694	15.806	-	-	-	13.750	13.922	12	11.887	15.017	-	13.417	12.305	-	13.479	-	-	-	-	9.448	13.422	12.178	-	13.479	-	-	13.736	14.013	-	-	-	13.558	14.200	13	11.827	11.655	-	13.668	13.674	-	13.044	-	-	-	-	9.821	14.696	14.189	-	-	-	-	13.371	14.187	15.337	-	-	13.265	13.356	14	11.951	16.676	-	15.848	13.625	-	11.637	-	-	-	9.065	-	14.399	12.518	-	-	-	-	14.043	12.931	-	-	-	-	-	15	14.304	12.106	-	12.179	13.141	-	-	-	-	-	9.656	-	14.354	15.637	-	-	-	-	13.758	13.853	14.425	-	-	-	-	-	16	17.072	11.841	-	-	13.484	-	-	-	-	-	-	-	13.294	12.116	-	-	-	-	14.016	13.015	14.559	-	-	13.417	-	17	10.414	12.039	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13.764	12.691	17.734	-	-	-	14.062	14.604	16.780	-	-	13.744	13.406	18	10.715	14.792	-	-	13.065	-	-	-	-	-	-	9.232	12.775	19.061	-	-	-	-	13.809	13.019	-	-	-	13.653	13.226	19	10.640	12.395	-	-	13.474	-	14.392	-	-	-	-	9.232	12.777	13.739	19.697	-	-	-	14.181	12.242	13.233	-	-	13.228	13.908	20	10.692	13.344	-	-	13.726	-	-	-	-	-	-	9.594	13.912	15.478	20.865	-	-	-	14.028	13.540	13.351	14.128	-	-	14.128	13.642	21	11.923	11.266	-	13.954	-	-	-	-	-	-	9.494	-	13.867	14.315	19.114	-	-	-	14.316	13.416	14.134	13.847	-	-	13.847	10.694	22	12.459	-	-	14.256	-	-	-	-	-	-	9.868	-	13.433	15.508	19.290	-	-	-	13.612	13.266	13.227	13.812	11.537	-	-	11.537	-	23	12.580	-	-	13.987	-	-	13.488	-	-	-	-	-	14.774	12.901	18.383	-	-	-	13.430	12.910	13.958	13.081	10.409	-	-	10.409	-	24	15.319	-	-	-	-	-	13.380	-	-	-	-	-	14.130	14.495	21.050	-	-	-	14.222	14.036	13.431	13.837	11.539	-	-	11.539	-	25	14.894	-	-	-	-	-	12.404	-	-	-	-	9.045	14.832	12.860	16.837	-	-	-	13.393	16.498	13.387	13.665	13.671	-	-	13.671	-	26	14.423	-	-	-	-	-	13.611	-	-	-	-	17.633	13.202	13.120	13.984	-	-	-	12.435	13.551	13.270	13.510	13.260	-	-	13.260	-	27	12.766	-	-	-	-	-	13.323	-	-	-	-	-	13.202	12.943	14.214	-	-	-	16.639	15.223	13.491	13.108	-	-	-	-	-	28	13.433	-	-	-	-	-	14.005	-	-	-	-	-	13.051	14.315	13.945	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.874	-	14.284	14.315	13.945	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.074	-	12.308	14.940	13.902	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

☐ Sonntag ☐ Feiertag

Tabelle 7: Statistische Daten des täglichen Lagersummenwegs, differenziert nach Kalendertagen des Meßzeitraums (1985, 1986, 1987)

	Absolute Häufigkeit	Minimalwert	Maximalwert	Spannweite	Mittelwert	Standard-Abweichung
		m				
Rechtes Lager	300	9,045	21,050	12,005	13,964	1,8
Linkes Lager	323	6,859	20,239	13,380	13,564	2,4

Die Differenz zwischen den Lagersummenwegen des rechten und linken Lagers betrug im Mittel rd. 2,9 %, sie kann auf

- ungleichmäßige Verkehrsbeanspruchung in Abhängigkeit von der Fahrtrichtung (gemeinsamer Überbau für beide Fahrtrichtungen)
- ungleichmäßiges Gleitverhalten der beiden Lagertypen einseitig verschiebbar (rechts), allseitig verschiebbar (links)
- Torsionsbeanspruchung des Überbaus zurückgeführt werden.

Die Ergebnisse des täglichen Lagersummenwegs innerhalb des Meßzeitraums sind getrennt für rechtes und linkes Lager in den Bildern 18a und 18b dargestellt. Die Diagramme illustrieren daß

- der tägliche Lagersummenweg einen großen Streubereich besitzt (Spannweiten: rechts 12,0 m, links 13,4 m)
- der tägliche Lagersummenweg zufälligen (stochastischen) Ereignissen unterliegt

- tendenziell rechts und links vergleichbare Meßergebnisse vorliegen, jedoch innerhalb engerer Zeiträume (z.B. Juni/Juli 1986) große Differenzen zwischen rechtem und linkem Lager auftreten können.

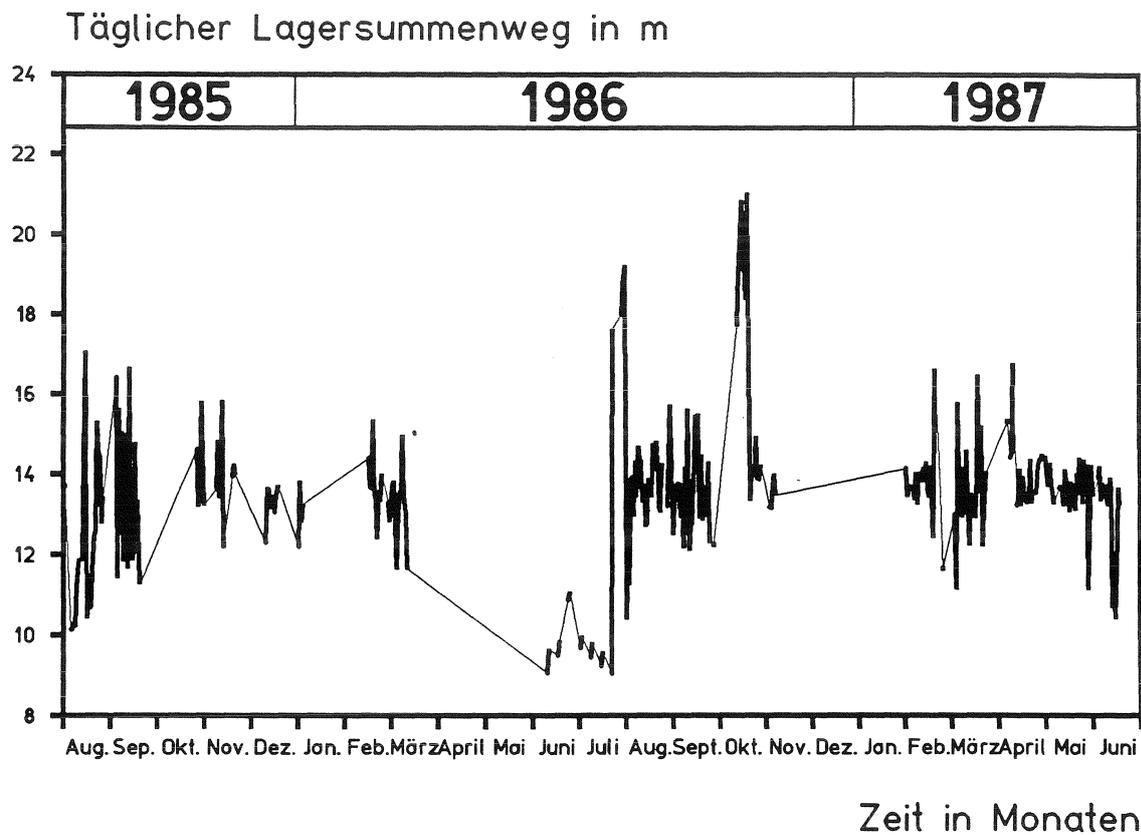


Bild 18a: Grunewaldbrücke; täglicher Lagersummenweg; rechtes Lager

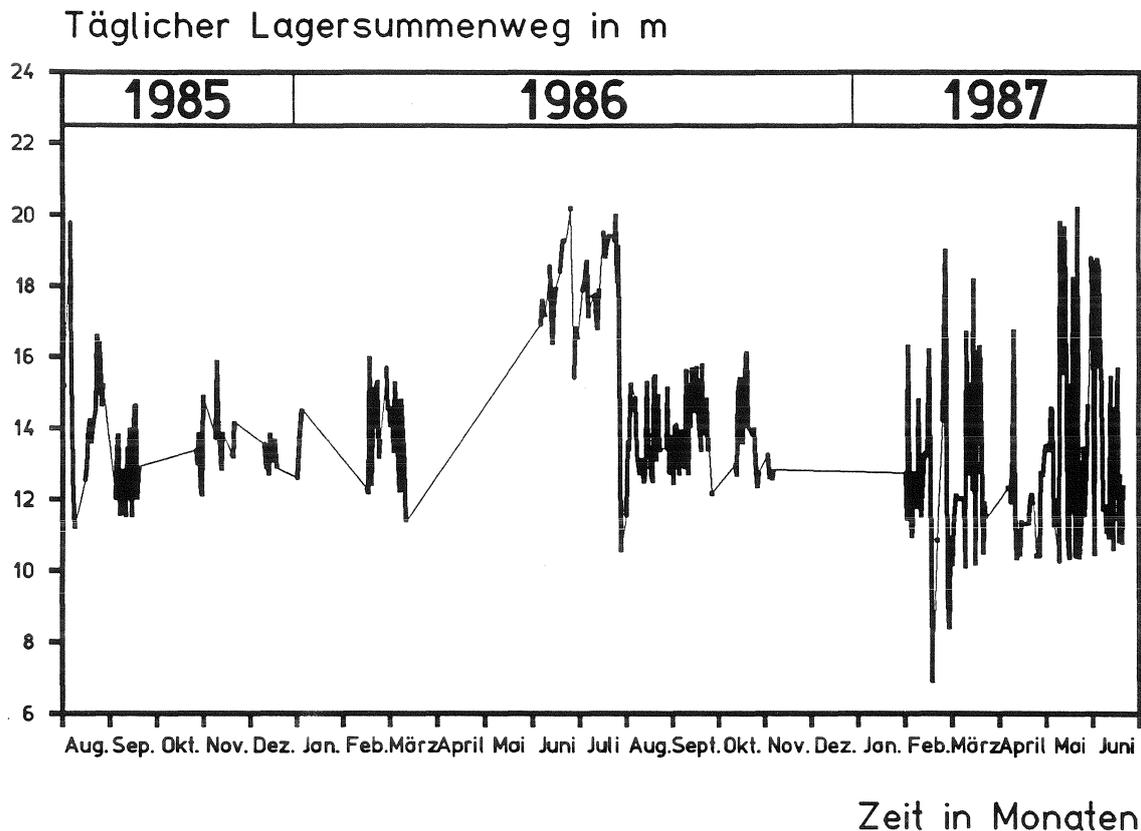


Bild 18b: Grunewaldbrücke, täglicher Lagersummenweg; linkes Lager

Der tägliche Lagersummenweg setzt sich aus der Summe der positiven und negativen Lagerverschiebungen (s. Abschn. 0.1) zusammen, wobei hier stochastisch verteilte Einzelverschiebungen unterschiedlicher Amplituden aufaddiert werden. Aus der Differenz zwischen dem positiven und dem negativen Lagersummenweg kann abgeleitet werden, ob innerhalb eines Tages oder eines längeren Zeitabschnitts bevorzugt einsinnige Verschiebungen auftreten, und damit eine Änderung der temporären Mittellage des Lagers auftritt (Tab. A3 bis A4).

Exemplarisch für die zeitliche Entwicklung der Differenz zwischen positiven und negativen täglichen Lagerverschiebungen sind in Bild 19 die Ergebnisse des rechten Lagers aus dem Meßzeitraum September 1986 graphisch aufgetragen.

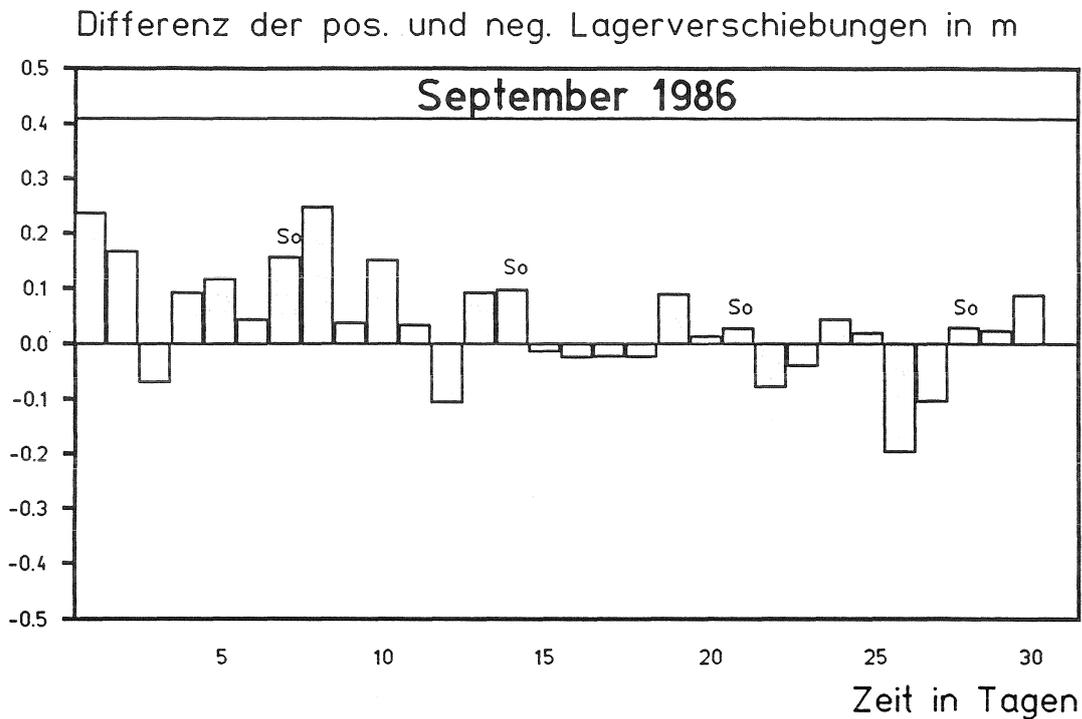


Bild 19: Histogramm der Differenz zwischen positiven und negativen täglichen Lagerverschiebungen; rechtes Lager

Das Histogramm verdeutlicht, daß die Verschiebung der temporären Mittellage des Lagers mehr oder weniger alterniert. In der ersten Septemberhälfte erfolgte eine deutliche Verlängerung, in der zweiten Septemberhälfte eine Verkürzung des Überbaus.

Die Differenzierung des täglichen Lagersummenwegs nach Kalendertagen des Meßzeitraums ergibt, daß der Lagersummenweg überwiegend von stochastischen Einflüssen abhängig zu sein scheint, signifikante kalendertägliche oder jahreszeitliche Einflüsse sind nicht erkennbar (Bild 18a und b). Der Mittelwert der täglichen Differenz zwischen positiven und negativen Lagerverschiebungen beträgt über den Meßzeitraum für das rechte Lager 0,07 m, für das linke Lager 0,10 m (Tab. A3 und A4). Die Differenz innerhalb der Lagerverschiebungen kann mit temperaturinduzierten Zwängungen im Überbau (damit in den Gleitlagern) interpretiert werden.

6.1.3.2 Täglicher Lagersummenweg, differenziert nach Wochentagen

Zur Differenzierung des Verkehrseinflusses auf den täglichen Lagersummenweg wurden zunächst über den gesamten Meßzeitraum (08.1985 bis 06.1987) die Lagersummenwege an allen Wochentagen für das rechte und linke Lager ermittelt (Tab. A5.1 bis A5.3 und A6.1 bis A6.3). Die daraus berechneten ausgewählten statistischen Daten sind getrennt für das rechte und linke Lager in den Tabellen 8.1 bis 9.3 zusammengestellt. Aus den vorliegenden Ergebnissen kann über den gesamten Meßzeitraum kein signifikanter Einfluß des Wochentags auf den täglichen Lagersummenweg festgestellt werden.

Tabelle 8.1: Statistische Daten des täglichen Lagersummenwegs, differenziert nach dem Wochentag; rechtes Lager

1985						
Wochentag	Absolute Häufigkeit n	Median x m	Spannweite R m	Mittelwert \bar{x} m	Standardabweichung s m	Variationskoeffizient v
Montag	8	13.954	4.427	13.351	1.679	0.126
Dienstag	8	11.933	3.283	11.985	1.151	0.096
Mittwoch	9	13.433	4.649	13.005	1.457	0.112
Donnerstag	11	13.954	6.143	13.840	1.882	0.136
Freitag	12	13.509	6.830	13.198	1.767	0.134
Samstag	9	13.625	6.262	13.480	2.184	0.162
Sonntag	7	13.141	3.848	12.813	1.375	0.107

Tabelle 8.2: Statistische Daten des täglichen Lagersummenwegs, differenziert nach dem Wochentag; rechtes Lager

1986						
Wochentag	Absolute Häufigkeit	Median	Spannweite	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
	n	x m	R m	\bar{x} m	s m	v
Montag	16	13.900	8.153	14.715	2.260	0.154
Dienstag	15	13.703	8.719	13.660	1.906	0.140
Mittwoch	16	13.723	7.264	13.999	1.695	0.121
Donnerstag	14	13.499	7.127	13.730	1.607	0.117
Freitag	16	13.733	9.413	13.998	2.371	0.169
Samstag	23	13.294	10.016	13.085	2.869	0.219
Sonntag	23	13.177	10.103	13.211	2.701	0.204

Tabelle 8.3: Statistische Daten des täglichen Lagersummenwegs, differenziert nach dem Wochentag; rechtes Lager

1987						
Wochentag	Absolute Häufigkeit	Median	Spannweite	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
	n	x m	R m	\bar{x} m	s m	v
Montag	18	13.475	3.800	13.521	0.752	0.056
Dienstag	15	14.036	4.196	13.574	1.209	0.089
Mittwoch	16	13.513	4.959	13.787	1.142	0.083
Donnerstag	16	13.884	2.317	13.727	0.642	0.047
Freitag	16	13.860	5.646	14.040	1.328	0.095
Samstag	15	13.642	2.205	13.532	0.662	0.049
Sonntag	17	13.612	3.665	13.395	0.938	0.070

Tabelle 9.1: Statistische Daten des täglichen Lagersummenwegs, differenziert nach dem Wochentag; linkes Lager

1985						
Wochentag	Absolute Häufigkeit	Median	Spannweite	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
	n	x	R	\bar{x}	s	v
		m	m	m	m	
Montag	7	13.852	4.915	13.947	1.783	0.128
Dienstag	7	13.584	6.940	14.498	2.428	0.167
Mittwoch	8	13.890	3.924	13.988	1.239	0.089
Donnerstag	10	13.036	3.109	13.071	0.976	0.075
Freitag	12	13.023	4.011	13.104	1.112	0.085
Samstag	8	13.501	3.772	13.926	1.315	0.094
Sonntag	6	13.749	4.732	13.666	1.577	0.115

Tabelle 9.2: Statistische Daten des täglichen Lagersummenwegs, differenziert nach dem Wochentag; linkes Lager

1986						
Wochentag	Absolute Häufigkeit	Median	Spannweite	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
	n	x	R	\bar{x}	s	v
		m	m	m	m	
Montag	22	15.146	7.989	15.744	2.370	0.151
Dienstag	23	14.818	8.462	15.249	2.295	0.151
Mittwoch	24	14.290	7.110	15.006	2.256	0.150
Donnerstag	22	13.905	7.138	15.046	2.472	0.164
Freitag	24	15.278	8.932	15.026	2.397	0.159
Samstag	14	13.142	3.831	13.503	1.224	0.091
Sonntag	14	13.972	2.957	13.869	0.997	0.072

Tabelle 9.3: Statistische Daten des täglichen Lagersummenwegs, differenziert nach dem Wochentag; linkes Lager

1987						
Wochentag	Absolute Häufigkeit n	Median x m	Spannweite R m	Mittelwert \bar{x} m	Standardabweichung s m	Variationskoeffizient v
Montag	19	11.962	7.328	12.889	2.340	0.182
Dienstag	17	13.022	8.636	13.698	2.486	0.182
Mittwoch	18	11.732	12.838	12.407	2.998	0.242
Donnerstag	16	12.606	10.425	13.147	2.810	0.214
Freitag	16	13.049	9.935	13.552	3.000	0.221
Samstag	17	12.028	5.725	12.073	1.744	0.144
Sonntag	19	11.946	9.522	13.286	2.916	0.219

Für die Lagerverschiebungen, z. B. des rechten Lagers (Tab. 8.1 bis 8.3), wurde in 1985 mittwochs, 1986 montags und 1987 freitags im Mittel der maximale wochentägliche Lagersummenweg registriert. Das jeweilige Minimum des mittleren wochentäglichen Lagersummenwegs wurde in 1985 dienstags, 1986 samstags und 1987 sonntags festgestellt. Zwischen den Meßergebnissen des rechten und linken Lagers werden für den wochentäglichen Einfluß deutliche, jedoch nicht erkennbar korrelierende Unterschiede festgestellt. Im gleichen Meßzeitraum wurde hier das Maximum des wochentäglichen Lagersummenwegs in 1985 mittwochs (rechtes Lager: dienstags), in 1986 montags (rechtes Lager: montags) und in 1987 freitags (rechtes Lager: dienstags) registriert.

Die analoge statistische Auswertung über den gesamten Meßzeitraum (1985, 1986, 1987) trägt ebenfalls nicht zur Differenzierung wochentäglicher Einflüsse bei (Tab. 10.1 und 10.2). Tendenziell werden jedoch an den Wochenenden (Samstag und Sonntag) die geringsten Lagerverschiebungen, montags und freitags die größten Lagersummenwege registriert. Am Wochenende wird am rechten Lager ein um nur rd. 2,3 % geringer und am linken Lager um rd. 4,7 % geringer Lagersummenweg gegenüber dem jährlichen täglichen Mittelwert registriert. Montags und freitags wird der Mittelwert sowohl am rechten als auch am linken Lager um rd. 2,2 % überschritten.

Tabelle 10.1: Statistische Daten des täglichen Lagersummenwegs, differenziert nach dem Wochentag; rechtes Lager

Meßzeitraum						
Wochentag	Absolute Häufigkeit n	Median	Spannweite	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
		x m	R m	\bar{x} m	s m	v
Montag	42	13.637	10.224	13.943	1.722	0.123
Dienstag	38	13.534	8.981	13.273	1.623	0.122
Mittwoch	41	13.501	9.146	13.698	1.462	0.107
Donnerstag	41	13.793	8.120	13.758	1.372	0.100
Freitag	44	13.718	10.808	13.795	1.874	0.136
Samstag	47	13.416	10.016	13.304	2.224	0.167
Sonntag	47	13.357	10.103	13.218	2.020	0.153

Tabelle 10.2: Statistische Daten des täglichen Lagersummenwegs, differenziert nach dem Wochentag; linkes Lager

Meßzeitraum						
Wochentag	Absolute Häufigkeit n	Median	Spannweite	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
		x m	R m	\bar{x} m	s m	v
Montag	48	14.404	10.122	14.352	2.610	0.182
Dienstag	47	14.035	9.595	14.576	2.439	0.167
Mittwoch	50	13.664	12.838	13.908	2.674	0.192
Donnerstag	48	13.333	10.916	14.001	2.525	0.180
Freitag	52	13.497	9.935	14.129	2.497	0.177
Samstag	39	12.904	6.488	12.966	1.664	0.128
Sonntag	39	13.348	9.522	13.554	2.184	0.161

In Bild 20 werden exemplarisch für den nach Wochentagen differenzierten täglichen Lagersummenweg ausgewählte Kalenderwochen des Meßzeitraums dargestellt. Innerhalb des Meßzeitraums liegt über längere Meßzeiten (hier Wochen) ein unterschiedliches Niveau des täglichen Lagersummenwegs vor. In der 33. KW 1985 beträgt der mittlere tägliche Lagersummenweg 12,60 m, in der 43. KW 1986 18,41 m und in der 15. KW 1987 13,93 m. Tendenziell illustrieren die Histogramme, daß an Wochenenden geringere Lagerverschiebungen erfolgen (Einfluß des Wochenendverkehrs), und daß freitags ein relatives

Maximum vorliegt. An bevorzugten anderen Wochentagen (z. B. Mittwoch in der 1. KW 1987) sind jedoch ebenfalls relative Maxima möglich.

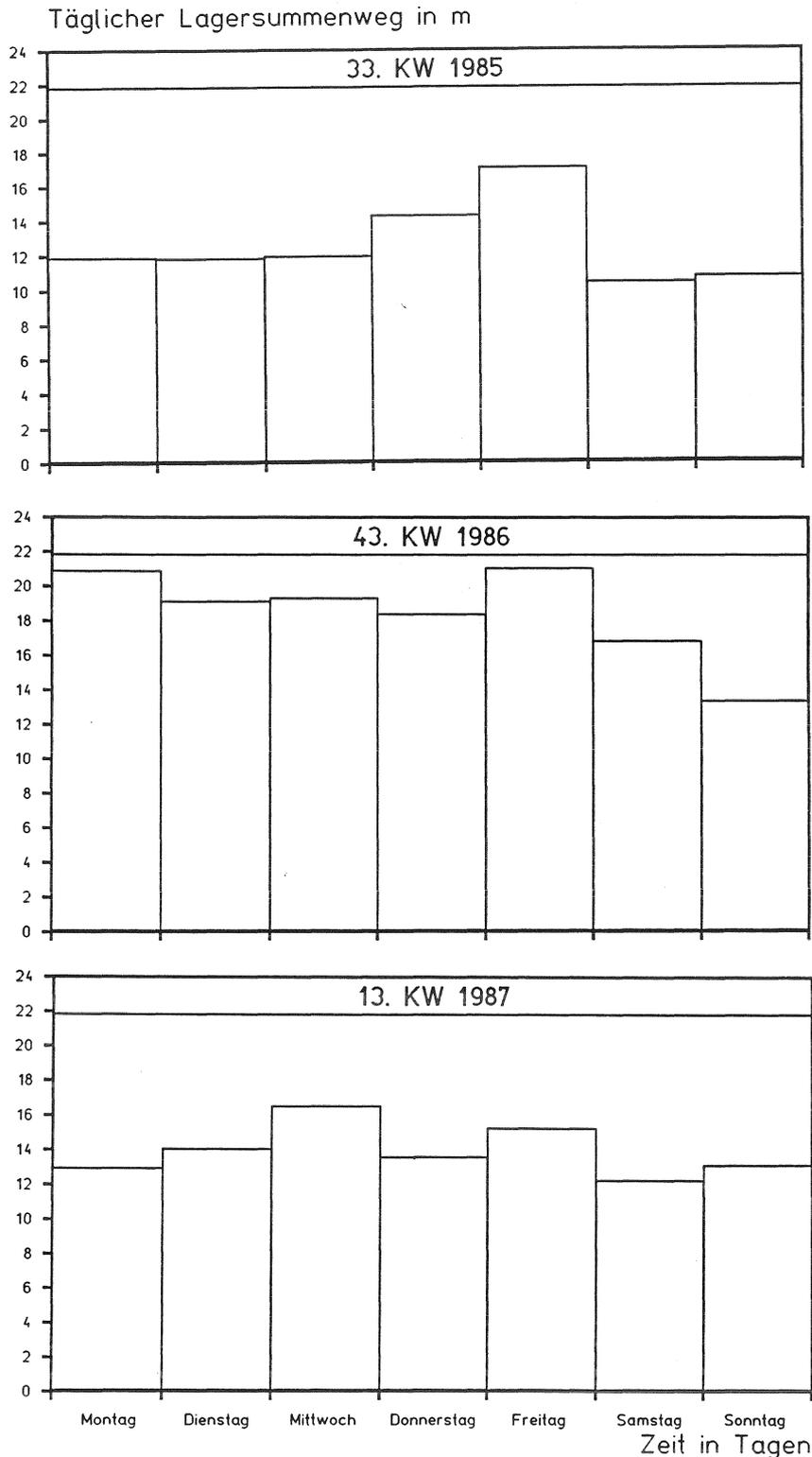


Bild 20: Tägliche Lagersummenwege in ausgewählten Kalenderwochen des Meßzeitraums; rechtes Lager

6.1.3.3 Wochentägliche Lagersummenwege, differenziert nach Kalendermonaten

In den Tabellen 11.1 und 11.2 sind die täglichen Lagersummenwege für das rechte und linke Lager innerhalb von Kalendermonaten nach Wochentagen geordnet. Für die jeweiligen Kalenderjahre ist das jährliche Maximum und Minimum des wochentäglichen Lagersummenwegs unterlegt dargestellt (Tab. 11). Die Darstellung zeigt, daß tendenziell in den Sommermonaten das jährliche Minimum, und in den Wintermonaten das jährliche Maximum registriert werden kann. Die Differenz zwischen dem jeweiligen jährlichen Maximum und Minimum liegt jedoch innerhalb des Streubereichs der Einzelwerte, so daß ein strenger Zusammenhang nicht ableitbar ist. Signifikante wochentägliche oder monatliche Einflüsse sind ebenfalls nicht ableitbar. Dies gilt auch für die Zuordnung der zeitlich differenzierten Ergebnisse zwischen rechtem und linkem Lager (Tab. 11.1 und 11.2).

Tabelle 11.1: Mittelwert des täglichen Lagersummenwegs, differenziert nach Monat und Wochentag; rechtes Lager

Jahr	Monat	Mittelwert des täglichen Lagersummenweges in m Rechtes Lager						
		Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag	Samstag	Sonntag
1985	Aug.	12,317	11,355	11,863	12,342	13,401	12,305	12,311
	Sept.	13,454	11,927	14,681	14,606	12,110	14,526	12,991
	Okt.	14,622	13,193	13,501	15,817	-	-	-
	Nov.	14,845	13,417	13,668	14,901	13,651	13,603	13,632
	Dez.	13,484	-	13,065	12,889	13,700	13,625	13,141
1986	Jan.	13,245	-	-	-	12,212	13,829	12,800
	Feb.	13,380	12,404	14,002	13,499	13,830	15,358	13,488
	März	13,304	14,341	13,657	12,897	11,643	12,957	13,201
	Juni	-	-	-	-	-	9,811	10,199
	Juli	-	-	-	-	-	9,354	11,758
	Aug.	15,285	12,734	13,459	13,143	13,994	15,013	14,903
	Sept.	14,495	13,107	13,963	13,382	13,035	13,999	13,362
	Oktober	17,424	16,664	15,165	16,662	17,562	17,949	16,527
1987	Nov.	13,741	14,015	13,479	-	-	13,534	13,708
	Feb.	13,689	13,995	13,632	13,450	14,679	14,169	13,438
	März	13,252	13,262	15,106	13,269	14,316	12,854	12,967
	April	14,060	14,254	13,648	14,024	15,105	13,387	13,252
	Mai	13,861	13,701	13,715	14,113	13,736	13,817	14,060
	Juni	12,919	12,840	12,855	13,767	12,125	13,147	12,907

jährliches Maximum
 jährliches Minimum

Tabelle 11.2: Mittelwert des täglichen Lagersummenwegs, differenziert nach Monat und Wochentag, linkes Lager

Jahr	Monat	Mittelwert des täglichen Lagersummenweges in m Linkes Lager						
		Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag	Samstag	Sonntag
1985	Aug.	15,352	15,997	14,956	13,428	13,365	14,763	15,024
	Sept.	11,899	13,076	13,200	12,726	12,967	13,205	12,775
	Okt.	13,381	12,966	13,865	12,383	-	-	-
	Nov.	15,897	14,373	13,682	13,036	13,049	14,551	13,728
	Dez.	13,852	-	13,092	13,611	12,869	13,167	12,671
1986	Jan.	14,532	-	-	-	12,603	13,349	13,891
	Feb.	14,600	15,112	13,813	12,645	14,834	12,384	13,795
	März	13,407	14,427	14,313	13,157	13,336	14,921	13,748
	Juni	19,045	17,675	17,746	17,992	18,121	-	-
	Juli	18,598	18,016	17,895	18,124	17,744	-	-
	Aug.	14,358	13,302	13,788	13,181	13,013	12,747	13,926
	Sept.	14,749	13,909	13,419	13,475	14,815	13,394	14,176
	Okt.	14,699	14,182	13,174	14,091	14,006	14,406	14,536
	Nov.	12,683	12,551	12,836	-	-	12,790	12,680
1987	Feb.	15,796	12,526	8,768	11,955	13,049	12,295	12,128
	März	11,980	15,555	12,147	12,344	13,142	11,219	13,515
	April	11,427	11,202	11,843	12,133	14,066	11,347	10,837
	Mai	13,121	15,242	13,619	14,023	13,793	11,108	13,995
	Juni	12,793	12,426	13,857	14,647	13,716	14,687	14,208

jährliches Maximum
 jährliches Minimum

6.1.3.4 Wochentägliche Lagersummenwege, differenziert nach Quartalen

Zur weiteren Differenzierung wurde der wochentägliche Lagersummenweg nach Quartalen in den Tabellen 12.1 und 12.2 betrachtet. Aufgrund der relativ großen wochentäglichen Streuungen Spannweiten (abhängig von Quartal, Wochentag zwischen 1,1 m und 9,6 m) gegenüber den wochentäglichen Mittelwerten ist kein quartalsabhängiger Einfluß feststellbar. Tendenziell wird für das rechte Lager im 4. Quartal (Mittelwert aus dem 4. Quartal 1985 und 1986) ein um rd. 10 % größerer wochentäglicher Lagersummenweg gegenüber den übrigen Quartalen registriert, die Spannweite beträgt hier jedoch rd. 6,8 m (rd. 45 des mittleren wochentäglichen Lagersummenwegs im 4. Quartal).

Tabelle 12.1: Statistische Daten des täglichen Lagersummenwegs, differenziert nach Quartal und Wochentag; rechtes Lager

1985 bis 1987							
Quartal	Wochentag	Absolute Häufigkeit n	Median x	Spannweite R	Mittelwert \bar{x}	Standardabweichung s	Variationskoeffizient v
			m	m	m	m	
1	Mo	11	13.378	1.166	13.392	0.385	0.148
	Di	9	14.036	3.835	13.651	1.181	1.395
	Mi	10	13.751	3.479	14.154	1.122	1.259
	Do	10	13.437	1.938	13.295	0.659	0.435
	Fr	11	13.655	5.002	13.650	1.489	2.218
	Sa	10	13.622	3.144	13.617	0.919	0.845
	So	11	13.266	2.191	13.170	0.598	0.358
2	Mo	11	13.491	3.800	13.573	0.902	0.813
	Di	9	13.750	4.099	13.537	1.256	1.576
	Mi	10	13.349	2.886	13.437	0.826	0.682
	Do	10	13.940	1.334	13.948	0.409	0.167
	Fr	10	13.677	5.646	13.765	1.367	1.870
	Sa	12	13.372	5.355	12.612	1.807	3.267
	So	13	13.744	4.703	12.779	1.769	3.130
3	Mo	14	14.335	8.600	14.105	2.098	4.403
	Di	15	12.308	4.298	12.383	1.318	1.738
	Mi	14	13.317	5.601	13.321	1.504	2.262
	Do	14	13.422	6.143	13.353	1.555	2.418
	Fr	15	13.433	6.830	13.210	1.584	2.509
	Sa	18	13.251	8.962	12.998	2.756	7.594
	So	17	12.962	9.162	13.118	2.508	6.288
4	Mo	6	14.303	7.380	15.257	2.796	7.816
	Di	5	14.015	5.921	14.791	2.453	6.016
	Mi	7	13.501	7.031	14.173	2.321	5.385
	Do	7	14.940	6.078	14.960	1.980	3.919
	Fr	8	14.079	8.871	15.130	2.860	8.182
	Sa	7	13.888	5.880	14.828	2.247	5.049
	So	6	13.495	6.555	14.540	2.558	6.544

Für die Meßergebnisse des linken Lagers ergeben sich ähnliche Zusammenhänge (Tab. 12.2). Der leichte Einfluß des Wochentags auf den täglichen Lagersummenweg bleibt bei der stochastischen Differenzierung nach Quartalen erhalten (relative Minima am Wochenende und Maxima von Montagen und Freitagen).

6.1.3.5 Täglicher Lagersummenweg, differenziert nach Monaten

In den Tabellen 13.1 und 13.2 wurde der tägliche Lagersummenweg nach den Kalendermonaten des Meßzeitraums (22 Monate) differenziert und statistisch ausgewertet. Aufgrund des großen Streubereichs scheinen nur trendmäßige Aussagen über monatliche Einflüsse möglich.

Der monatliche Mittelwert des täglichen Lagersummenwegs schwankt bis auf die Monate Juni und Juli 1986 (unmittelbar nach dem Austausch des Fahrbahnübergangs, vgl. Tab. 2) zwischen 12,2 m und 16,8 m am rechten Lager (11,8 m und 14,6 m am linken Lager). Im Juni und Juli werden dagegen am rechten La-

ger rd. 10,0 m und am linken rd. 18,0 m registriert (Tab. 13.1 und 13.2). Den Ergebnissen für das rechte Lager liegt für diese Monate eine relativ geringe Anzahl an Einzelwerten zugrunde, die Spannweite streut entsprechend für Juni 1986 um 2,0 m, für Juli 1986 um 8,6 m. Der monatliche Mittelwert des täglichen Lagersummenwegs ist in Bild 21a und 21b illustriert. Bis auf die beiden Monate Juni und Juli 1986 ergibt sich im statischen Mittel ein täglicher Lagersummenweg, der zeitlichen Einflüssen nicht zu unterliegen scheint. Relative Minima und Maxima (vgl. Bilder 15a und 15b) werden im Rahmen des großen (stochastischen) Streubereichs kompensiert. Die relativen stündlichen (Bilder 15) oder wochentäglichen (Bilder 18) Minima machen rd. 70 % des jeweiligen Mittelwerts aus. Dies bedeutet, daß permanente Lagerverschiebungen aus Bauwerksanregungen (Mikroseismik, Bodenunruhe, DB-Verkehr, PKW-Verkehr) sowie Eigenschwingverhalten (Eigenfrequenz) den täglichen Lagersummenweg wesentlich beeinflussen, und relative Maxima aus Betriebsbeanspruchungen (LKW-Verkehr, temporäre Verkehrsstörungen) im statischen Mittel geglättet werden und rd. 30 % der Lagerverschiebungen ausmachen.

Tabelle 12.2: Statistische Daten des täglichen Lagersummenwegs, differenziert nach Quartal und Wochentag; linkes Lager

1985 bis 1987							
Quartal	Wochentag	Absolute Häufigkeit n	Median x	Spannweite R	Mittelwert \bar{x}	Standardabweichung s	Variationskoeffizient v
			m	m	m	m	
1	Mo	12	14.566	6.438	13.603	2.367	5.604
	Di	10	14.160	6.901	14.376	-2.207	4.873
	Mi	11	12.294	8.473	12.195	2.532	6.412
	Do	10	12.606	7.952	12.489	1.962	3.850
	Fr	11	13.305	5.699	13.419	1.817	3.301
	Sa	12	12.315	5.551	12.469	1.573	2.475
	So	12	13.105	6.936	13.262	1.927	3.714
2	Mo	14	12.369	9.609	13.910	3.293	10.841
	Di	13	13.882	8.451	14.315	2.865	8.209
	Mi	14	12.655	9.296	14.191	3.390	11.489
	Do	13	13.496	8.926	14.695	3.193	10.192
	Fr	13	14.685	9.825	14.810	3.662	13.409
	Sa	9	11.418	5.590	12.354	2.178	4.746
	So	11	12.051	9.522	13.499	3.375	11.390
3	Mo	16	15.174	7.999	15.357	2.368	5.610
	Di	19	14.492	8.462	15.104	2.556	6.533
	Mi	18	14.516	7.304	14.976	2.139	4.576
	Do	18	13.574	7.710	14.571	2.460	6.050
	Fr	20	13.880	8.932	14.383	2.259	5.102
	Sa	11	12.931	4.213	13.474	1.213	1.472
	So	10	14.028	4.732	14.016	1.440	2.075
4	Mo	6	13.907	3.214	14.202	1.229	1.511
	Di	5	13.901	1.911	13.651	0.855	0.730
	Mi	7	13.569	1.710	13.285	0.626	0.392
	Do	7	13.537	1.783	13.409	0.640	0.410
	Fr	8	13.018	3.896	13.363	1.168	1.363
	Sa	7	13.254	3.831	13.809	1.363	1.859
	So	6	13.252	2.390	13.472	0.962	0.926

Tabelle 13.1: Statistische Daten des täglichen Lagersummenwegs, differenziert nach Monaten; rechtes Lager

Jahr	Monat	Monatlicher Lagersummenweg 1)	Absolute Häufigkeit	Median	Spannweite	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
		ΣS_m m	n	x m	R m	\bar{x} m	s m	v
1985	Aug.	294,301	24	11,905	6,939	12,263	1,873	3,508
	Sept.	229,923	17	13,344	5,411	13,525	1,844	3,402
	Okt.	57,134	4	14,062	2,624	14,283	1,193	1,423
	Nov.	153,525	11	13,954	3,669	13,957	0,947	0,896
	Dez.	106,494	8	13,479	1,421	13,312	0,472	0,223
1986	Jan.	52,086	4	13,023	1,617	13,021	0,685	0,469
	Feb.	137,291	10	13,633	2,954	13,729	0,767	0,588
	März	184,000	14	13,262	3,342	13,143	0,860	0,740
	Juni	60,031	6	9,762	2,009	10,005	0,798	0,636
	Juli	84,452	8	9,643	8,588	10,556	2,876	8,270
	Aug.	394,122	28	13,909	8,846	14,076	1,923	3,697
	Sept.	408,977	30	13,700	3,628	13,633	1,041	1,083
	Okt.	268,632	16	17,285	8,791	16,789	2,945	8,674
	Nov.	95,720	7	13,741	1,061	13,674	0,411	0,169
	Dec.	291,157	21	13,736	4,204	13,865	0,767	0,589
1987	März	311,302	23	13,416	5,53	13,535	1,238	1,533
	April	223,804	16	13,523	9,553	13,988	0,965	0,931
	Mai	401,773	29	13,812	1,427	13,854	0,420	0,176
	Juni	314,498	24	13,437	3,954	13,104	1,165	1,356

1) aufsummierte Meßwerte

- jährliches Maximum
- jährliches Minimum

Tabelle 13.2: Statistische Daten des täglichen Lagersummenwegs, differenziert nach Monaten; linkes Lager

Jahr	Monat	Monatlicher Lagersummenweg ¹⁾	Absolute Häufigkeit	Median	Spannweite	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
		$\sum S_m$ m	n	\bar{x} m	R m	$\bar{\bar{x}}$ m	s m	v
1985	Aug.	263,455	18	14,402	8,603	14,636	1,943	3,775
	Sept.	218,594	17	12,850	3,115	12,858	1,050	1,102
	Okt.	52,595	4	13,173	1,482	13,149	0,629	0,395
	Nov.	152,002	11	13,728	3,810	13,818	1,037	1,075
	Dez.	105,742	8	13,129	1,181	13,218	0,48	0,183
1986	Jan.	54,374	4	13,620	1,930	13,594	0,819	0,671
	Feb.	138,476	10	13,730	3,850	13,848	1,374	1,887
	März	194,617	14	14,164	4,311	13,901	1,195	1,429
	Juni	271,741	15	17,964	3,831	18,116	1,099	1,207
	Juli	415,545	23	18,102	4,578	18,067	1,174	1,379
	Aug.	322,571	24	13,293	4,970	13,440	1,244	1,548
	Sept.	420,403	30	13,900	3,390	14,013	1,003	1,006
	Okt.	225,368	16	13,990	4,002	14,086	1,129	1,274
	Nov.	89,010	7	12,683	0,928	12,716	0,290	0,084
1987	Feb.	249,842	20	12,435	9,472	12,492	2,019	4,077
	März	385,103	30	12,025	10,682	12,837	2,649	7,020
	April	201,110	17	11,418	6,467	11,830	1,460	2,131
	Mai	366,454	27	13,136	9,972	13,572	3,211	10,309
	Juni	383,441	28	12,730	8,365	13,694	2,769	7,666

¹⁾ aufsummierte Meßwerte

- jährliches Maximum
- jährliches Minimum

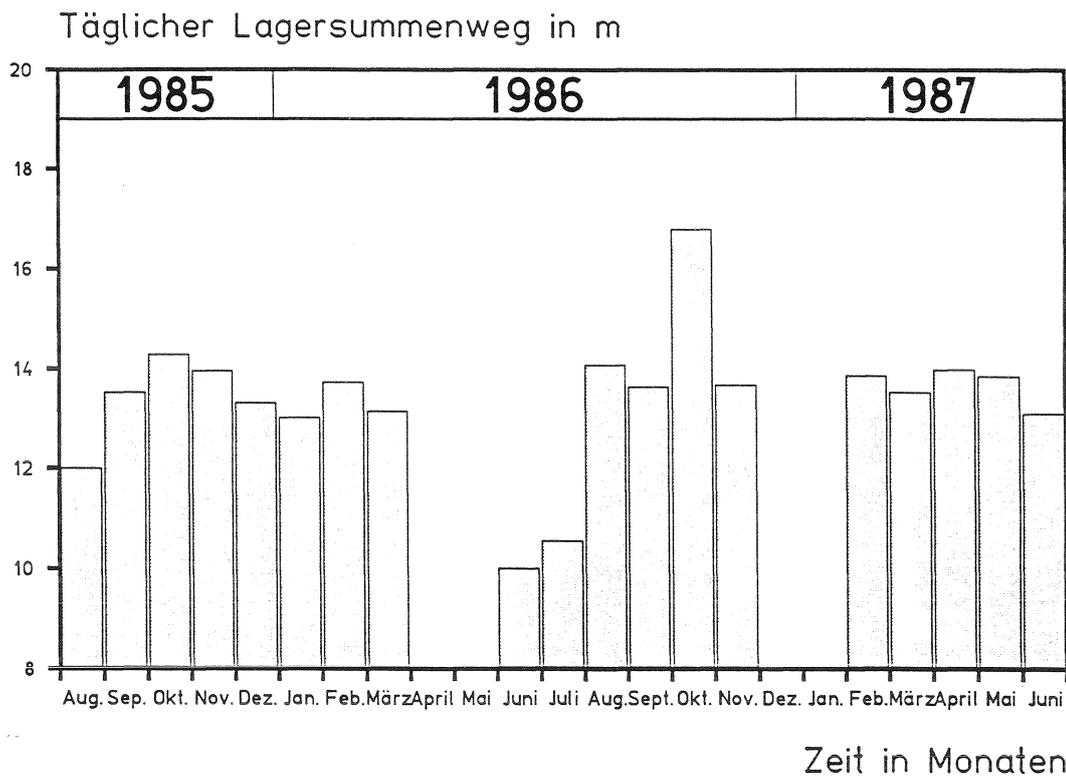


Bild 21a: Mittlerer täglicher Lagersummenweg, differenziert nach Monaten, rechtes Lager

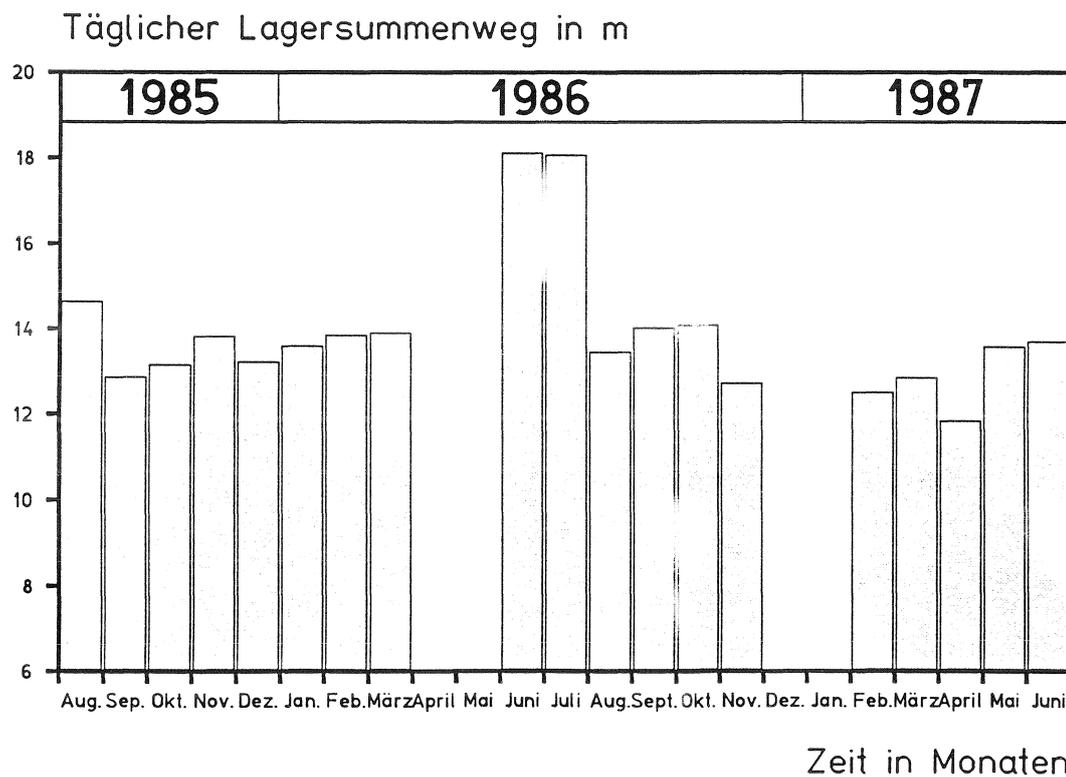


Bild 21b: Mittlerer täglicher Lagersummenweg, differenziert nach Monaten, linkes Lager

In Bild 22 ist der tägliche Lagersummenweg in ausgewählten Monaten (September 1986 und Mai 1987) für das linke Lager dargestellt. Für den Meßzeitraum September 1986 ergibt sich ein Mittelwert des täglichen Lagersummenwegs von 14,0 m, für den Meßzeitraum Mai 1987 von 13,6 m. Obwohl dem ein vergleichbarer mittlerer Lagersummenweg zugrundeliegt, streuen die Meßwerte im Mai 1987 stärker, und zeigen ausgeprägte relative Maxima.

6.1.3.6 Zusammenfassung

Aus den zugrundeliegenden Meßdaten (rd. 330 Tage, rd. 22 Kalendermonate) kann für den täglichen Lagersummenweg keine signifikante und trennscharfe Abhängigkeit von definierten Prüfzeiträumen wie

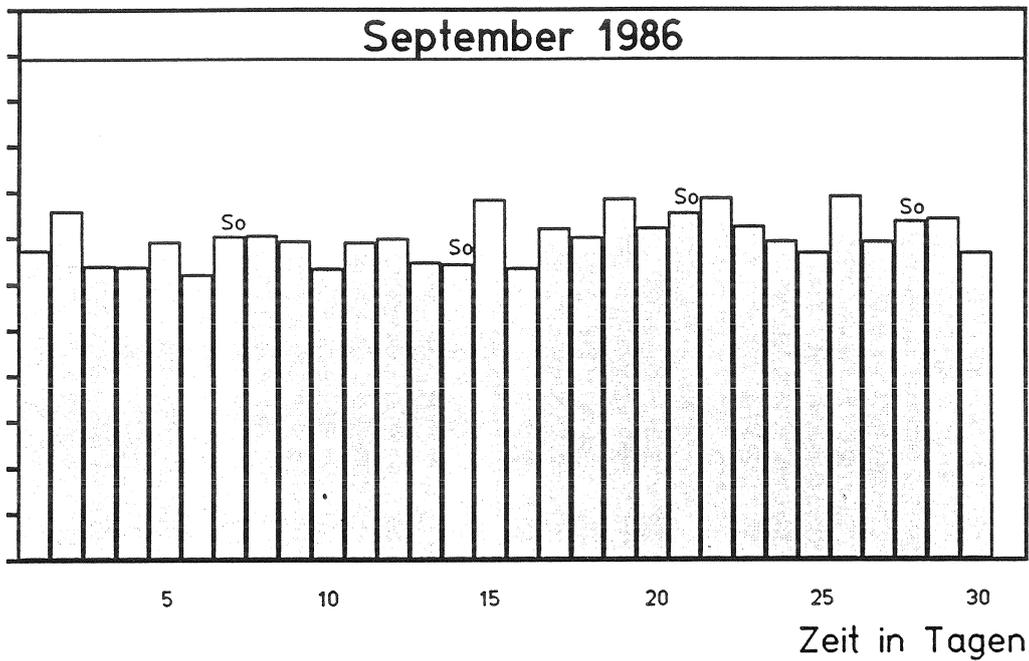
- Kalendertag
- Wochentag
- Monat
- Quartal

abgeleitet werden.

Der überwiegende Anteil aus Einzelverschiebungen (rd. 70 % des Lagersummenwegs) scheint aus permanenter dynamischer Anregung des Bauwerks zu resultieren. Temporäre Einflüsse aus Verkehrsströmungen innerhalb eng begrenzter Zeitintervalle (Stunden, Kalendertage) werden im statistischen Mittel infolge relativer Minima und Maxima geglättet.

Der Lagersummenweg unterliegt u. a. aufgrund der stochastischen Betriebsbeanspruchung einem großen Streubereich, der in der Größenordnung der Meßwerte liegt. Eine differenzierte statistische Beschreibung des täglichen Lagersummenwegs von zeitlichen Abhängigkeiten scheint nicht möglich.

Täglicher Lagersummenweg in m



Täglicher Lagersummenweg in m

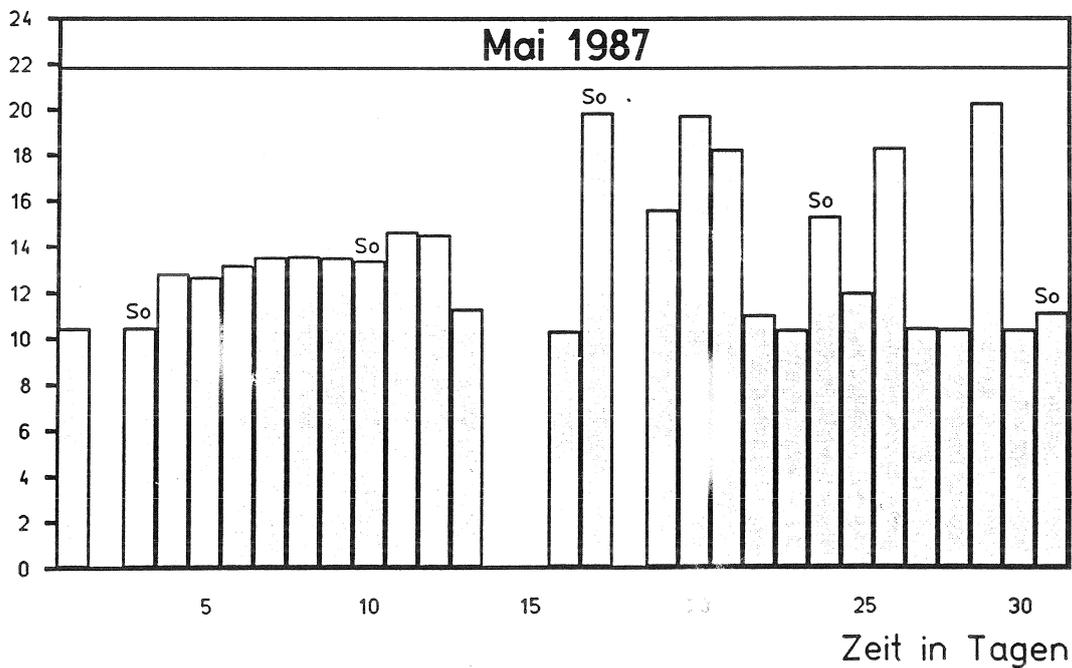


Bild 22: Histogramm des täglichen Lagersummenwegs in ausgewählten Monaten des Meßzeitraums; linkes Lager

6.1.4 Extrapolation des jährlichen Lagersummenwegs

Im statistischen Jahresmittel ergibt sich ein relativ konstanter täglicher Lagersummenweg von rd. 14,0 m am rechten Lager und rd. 13,6 m am linken Lager (vgl. Tab. 7). Die Standardabweichung beträgt rd. 1,8 m bzw. 2,4 m. Für die Summenlinie des täglichen Lagersummenwegs an fortlaufenden Meßtagen ergibt sich daraus eine relativ konstante Steigung. In Bild 23 ist die Summenlinie für beide betrachteten Lager dargestellt.

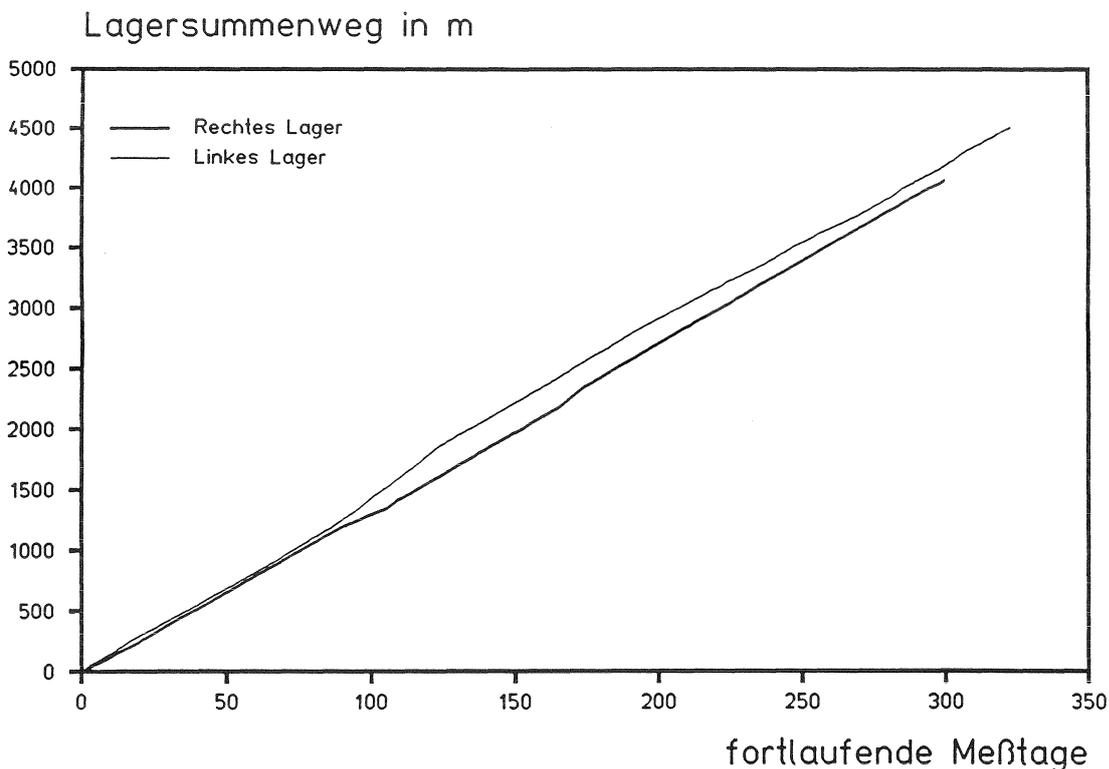


Bild 23: Summenlinie des täglichen Lagersummenwegs

Die Summenlinien zeigen deutlich, daß nach dem Austausch des Fahrbahnübergangs (rd. 90 Meßtage, vgl. Tab. 2), am zweiachsig verschiebbaren linken Lager ein großer täglicher Lagersummenweg registriert wurde, gleichzeitig am rechten einachsig verschiebbaren Lager ein geringerer Lagersummenweg aufgetreten ist. Nach längerer Meßphase (rd. 300 Tage) nähern sich die Summenlinien für beide Lager wieder an und zeigen gleichförmige Tendenz. Aus den Summenkurven kann ein jährlicher Lagersummenweg (für beide Lager) von rd. 5000 m extrapoliert werden.

6.1.5 Lagerverschiebungen

6.1.5.1 Statistische Verteilung der Einzelverschiebungen

Die Summenlinie der relativen Häufigkeit der Verschiebungsklassen ist in Bild 24 für beide Lager dargestellt. Während des Meßzeitraums wurden je Lager rd. $5,5 \cdot 10^7$ Einzelverschiebungen registriert (n = Anzahl der Einzelverschiebungen, d. h. die Summe aller innerhalb des Meßzeitraums registrierten positiven und negativen Lagerverschiebungen). Davon entfallen beim rechten Lager rd.

- 22 %	auf die Verschiebungsklasse =	4 μm
- 18 %	- " -	\leq 8 μm
- 20 %	- " -	\leq 16 μm
- 15 %	- " -	\leq 32 μm
- 12 %	- " -	\leq 64 μm
- 5 %	- " -	\leq 128 μm
- 5 %	- " -	\leq 256 μm
- 4 %	- " -	\leq 512 bis \leq 1024 μm .

Am linken Lager sind die Einzelverschiebungen gemessen wie folgt auf die Verschiebungsklassen verteilt:

- 30 %	auf die Verschiebungsklasse =	4 μm
- 29 %	- " -	\leq 8 μm
- 26 %	- " -	\leq 16 μm
- 10 %	- " -	\leq 32 μm
- 2 %	- " -	\leq 64 μm
- 1 %	- " -	\leq 128 μm
- 1 %	- " -	\leq 256 μm
- 1 %	- " -	\leq 512 bis \leq 1024 μm .

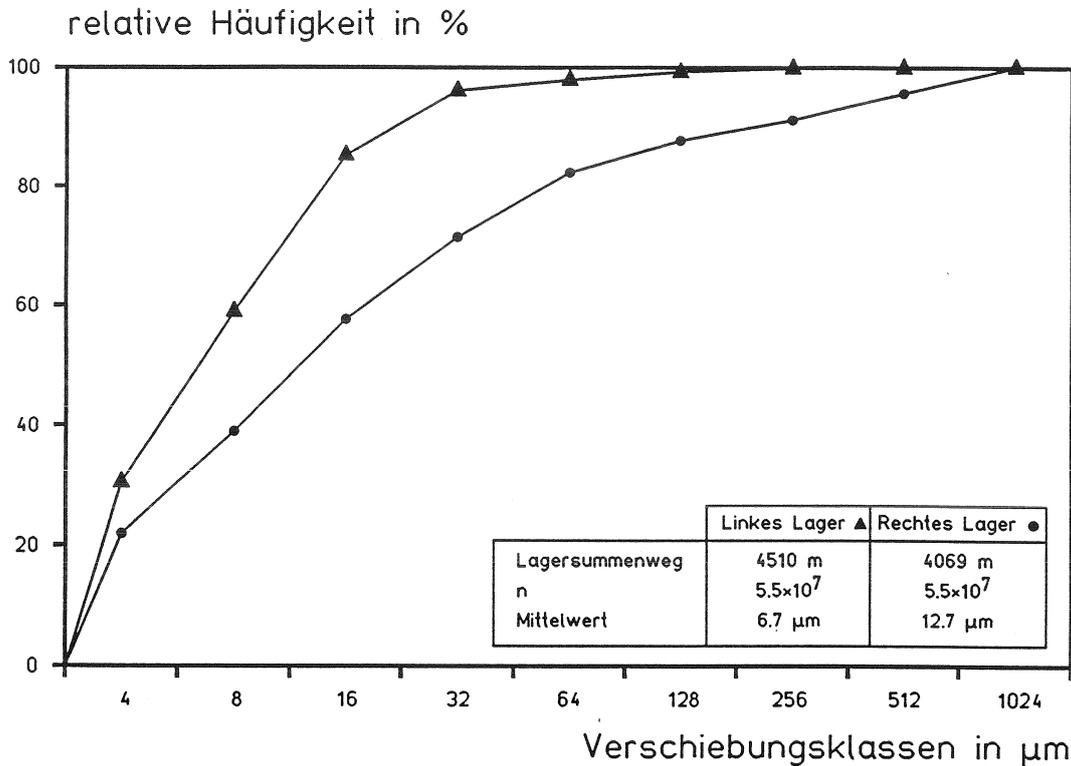


Bild 24: Summenlinie der relativen Häufigkeit der Verschiebungsklassen; rechtes und linkes Lager

Über den gesamten Meßzeitraum werden im Mittel rd. $2,0 \cdot 10^5$ Einzelverschiebungen pro Tag gemessen (Summe aus positiven und negativen Verschiebungen). Die Anzahl der Ereignisse schwankt zwischen rd. $1,0 \cdot 10^4$ und rd. $4,0 \cdot 10^5$ (Bild 25).

Aus den Diagrammen geht hervor, daß die absolute Häufigkeit der Verschiebungen nicht mit dem täglichen Lagersummenweg korreliert werden kann. Signifikant ist jedoch, daß unmittelbar nach dem Ausbau des Fahrbahnübergangs (nach rd. 90 Meßtagen) sowohl der tägliche Lagersummenweg als auch die tägliche absolute Häufigkeit der Verschiebungen über eine begrenzte Zeit abnehmen. Im Zeitraum zwischen 210 und 230 Meßtagen nimmt die absolute Häufigkeit sehr stark ab, während der tägliche Lagersummenweg starken Streuungen vom jährlichen Mittelwert unterliegt. Vergleichbare Phänomene treten nach rd. 280 Meßtagen auf.

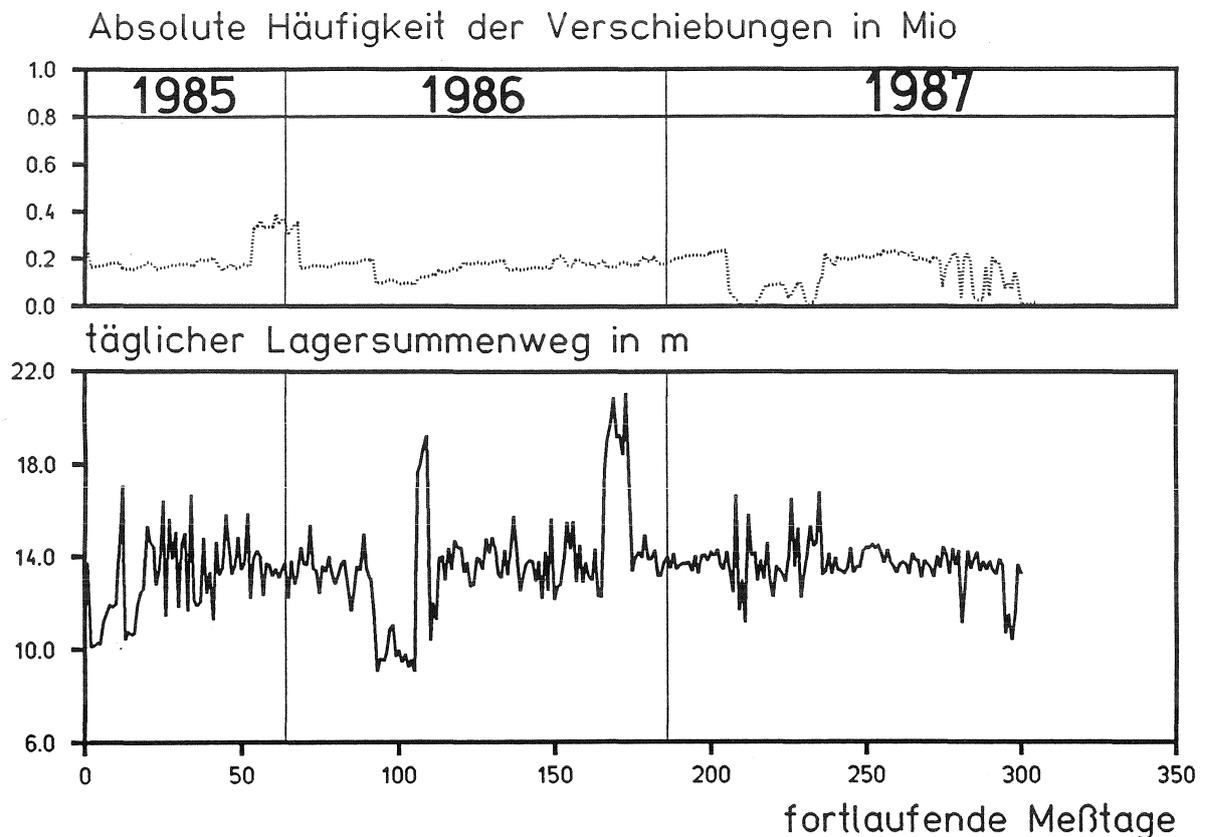


Bild 25: Absolute Häufigkeit der täglichen Einzelverschiebungen

Zur näheren Differenzierung dieser Phänomene ist in Bild 26 der zeitliche Verlauf der relativen Häufigkeit der interessierenden Verschiebungsklassen bis $128 \mu\text{m}$ im Meßzeitraum für das rechte Lager aufgetragen. In der ersten Hälfte des Meßzeitraums werden überwiegend Verschiebungen in den Klassen $= 4$, ≤ 8 und $\leq 16 \mu\text{m}$ registriert, während in der zweiten Hälfte des Meßzeitraums verstärkt die Verschiebungsklassen ≤ 32 , ≤ 64 und $\leq 128 \mu\text{m}$ belegt werden. Der Verlauf der relativen Häufigkeit der Verschiebungsklassen illustriert, daß der Verschiebungsmechanismus zufälligen Ereignissen zu unterliegen scheint. Tendenziell kann jedoch festgestellt werden, daß die relative Häufigkeit der Verschiebungsklassen (vgl. Bild 24)) untereinander, unabhängig von der absoluten Häufigkeit, über den Meßzeitraum erhalten bleibt.

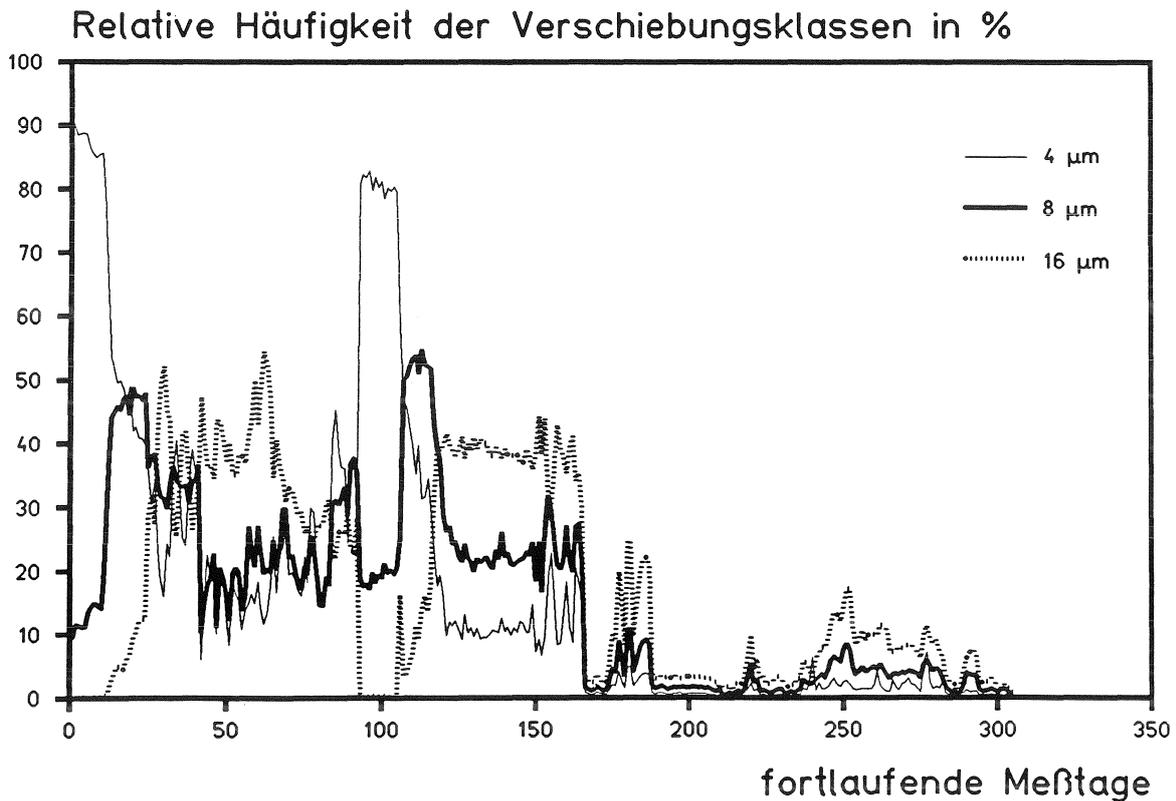
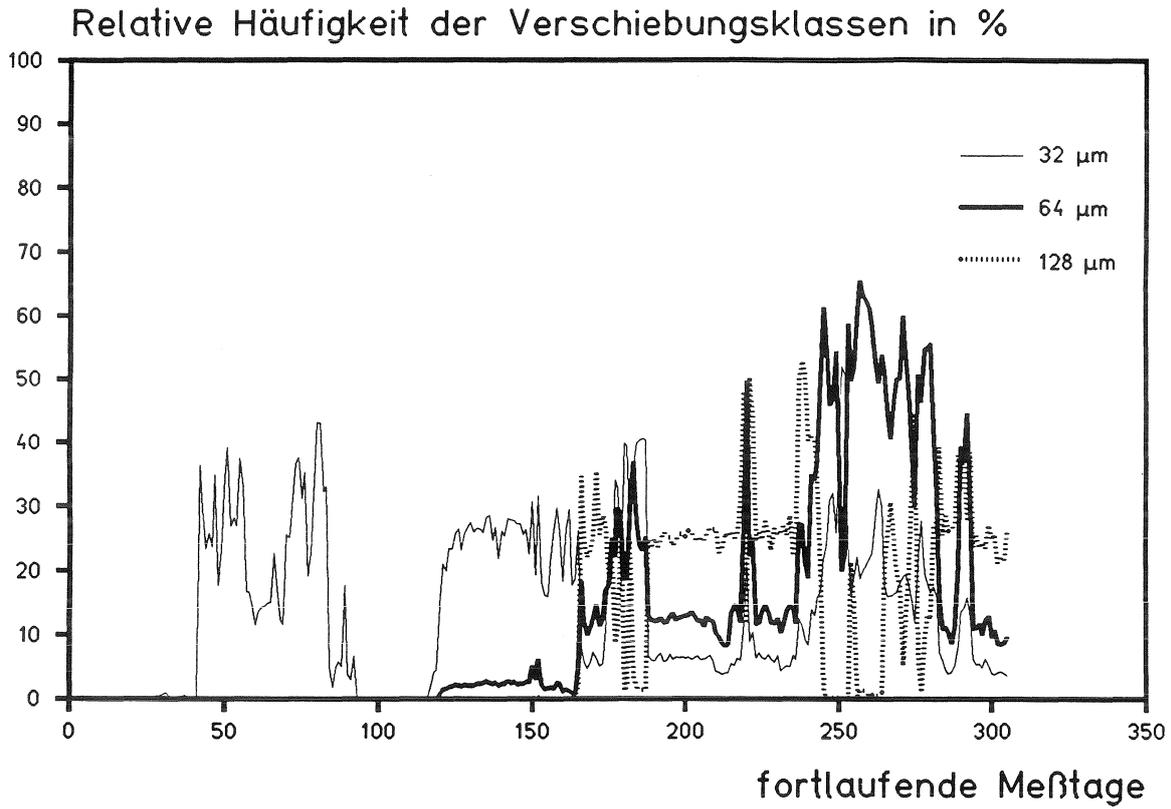


Bild 26: Relative Häufigkeit der Verschiebungsklassen; rechtes Lager

6.1.5.2 Jährlicher Lagersummenweg, differenziert nach Verschiebungsklassen

Aus dem extrapolierten jährlichen Lagersummenweg und den relativen Häufigkeiten der Verschiebungsklassen kann eine Aussage über den jährlichen Lagersummenweg, differenziert nach Verschiebungsklassen, gewonnen werden.

Für das rechte Lager (Bild 25) entfallen rd.

- 1120 m	auf die Verschiebungsklasse =	4 μm
- 917 m	- " -	\leq 8 μm
- 1019 m	- " -	\leq 16 μm
- 764 m	- " -	\leq 32 μm
- 611 m	- " -	\leq 64 μm
- 255 m	- " -	\leq 128 μm
- 255 m	- " -	\leq 256 μm
- 200 m	- " -	\leq 512 bis \leq 1024 μm .

Der jährliche Lagersummenweg für das linke Lager (Bild 25) verteilt sich auf die Verschiebungsklassen wie folgt:

- 1484 m	auf die Verschiebungsklasse =	4 μm
- 1435 m	- " -	\leq 8 μm
- 1286 m	- " -	\leq 16 μm
- 494 m	- " -	\leq 32 μm
- 99 m	- " -	\leq 64 μm
- 50 m	- " -	\leq 128 μm
- 50 m	- " -	\leq 256 μm
- 50 m	- " -	\leq 512 bis \leq 1024 μm .

Aus diesen Daten wird deutlich, daß der größte Anteil des jährlichen Lagersummenwegs auf Einzelverschiebungen zwischen 4 und 32 μm entfällt.

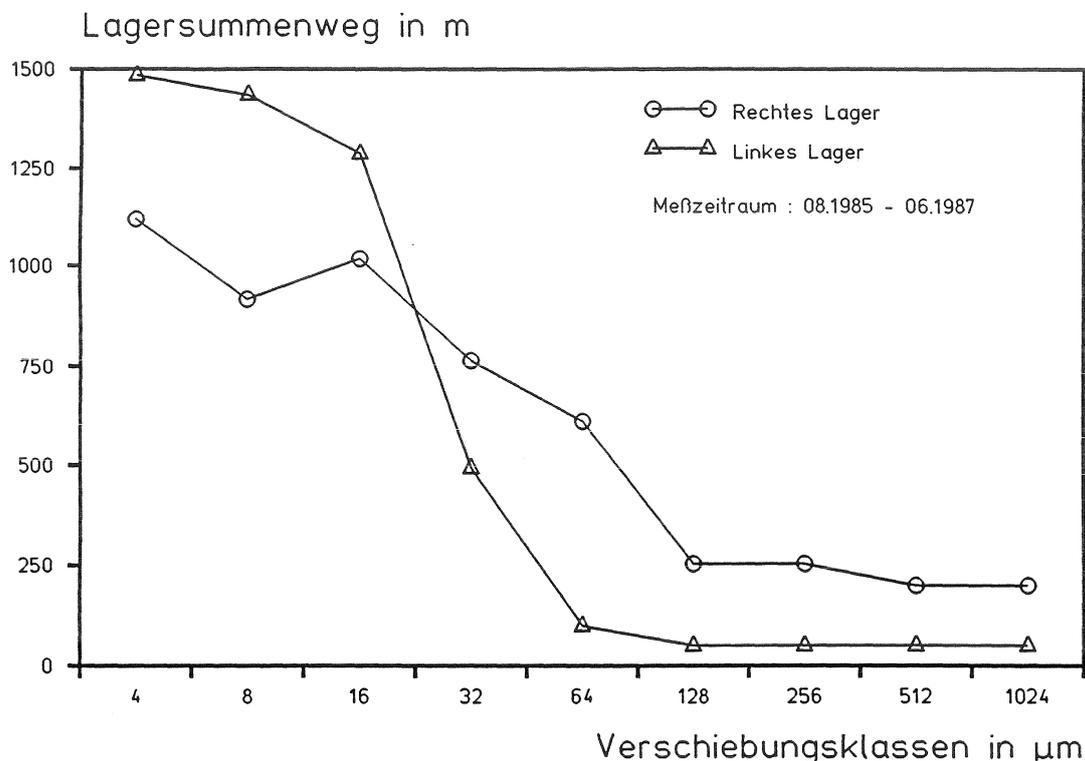


Bild 27: Extrapolierter jährlicher Lagersummenweg in Abhängigkeit von den Verschiebungsklassen

6.1.6 Gleitgeschwindigkeiten

Die Gleitgeschwindigkeiten können aus der Klassiermatrix (Größe und Dauer der Einzelverschiebung) errechnet werden (vgl. Bild 16).

In Bild 28 ist, getrennt für die Meßergebnisse des rechten und linken Lagers, die Summenlinie der relativen Häufigkeit der Gleitgeschwindigkeiten aufgetragen. Die kleinste Gleitgeschwindigkeit wurde mit 0,0016 mm/s (= 0,4 % der Gleitgeschwindigkeit für Zulassungsversuche /1/) am rechten Lager ermittelt, die größte Gleitgeschwindigkeit betrug für beide Lager 102,4 mm/s (= der 256-fachen Gleitgeschwindigkeit für Zulassungsversuche). Die mittlere Gleitgeschwindigkeit aus einem Stichprobenumfang von rd. $5,0 \cdot 10^7$ betrug für das rechte Lager rd. 1,2 mm/s (= dem 3-fachen Wert der

Zulassungsversuche), und für das linke Lager rd. 0,55 mm/s (= dem 1,4-fachen Wert der Zulassungsversuche). Rd. 15 % der Einzelverschiebungen des rechten Lagers weist eine größere Gleitgeschwindigkeit als 10 mm/s auf, für das linke Lager beträgt dieser Prozentsatz lediglich 0,2 %.

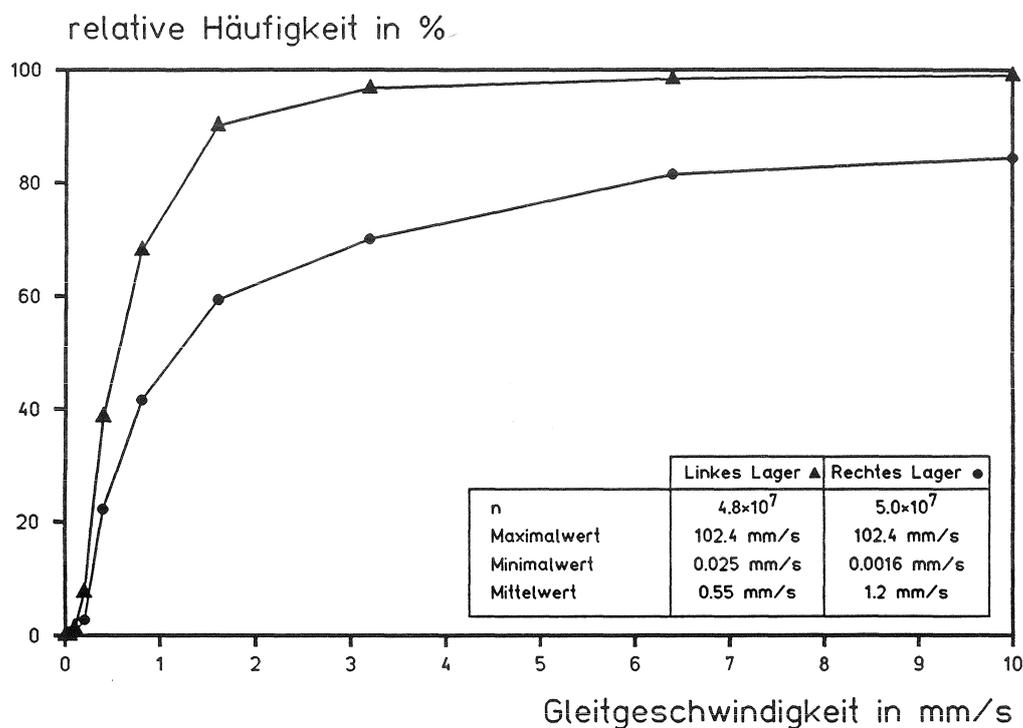


Bild 28: Summenlinie der Gleitgeschwindigkeiten

In den Bildern 29a und 29b sind die absoluten Häufigkeiten der ermittelten Gleitgeschwindigkeiten aufgetragen.

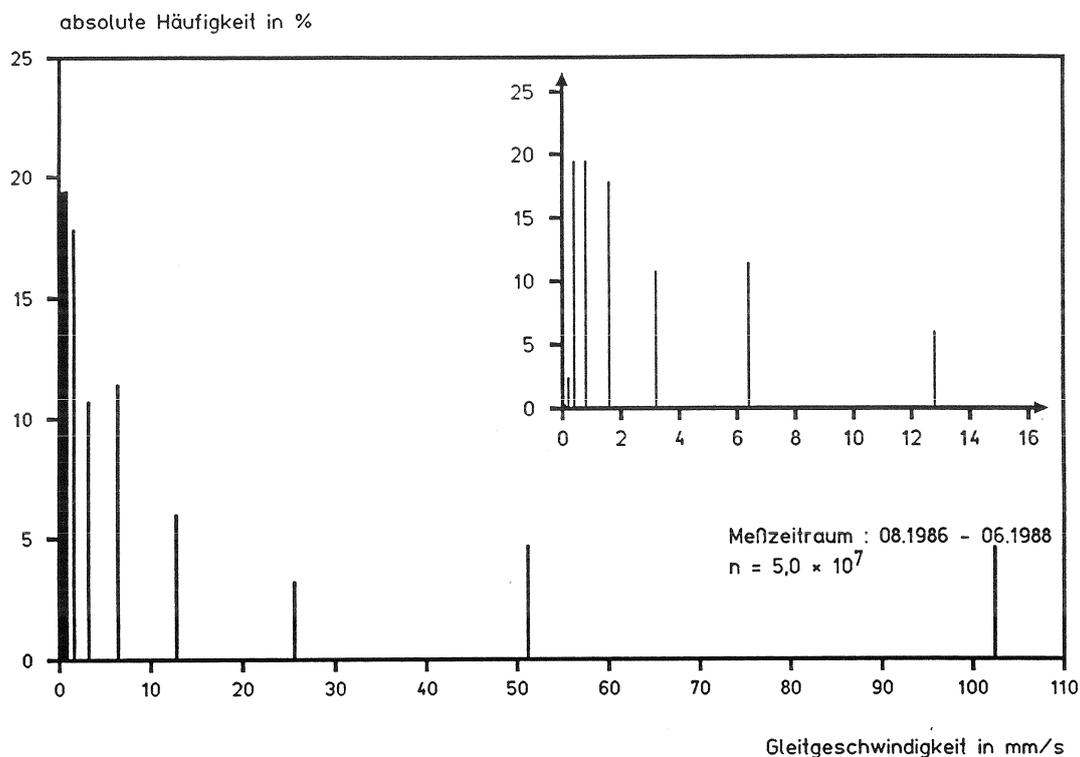


Bild 29a: Absolute Häufigkeit der Gleitgeschwindigkeiten; rechtes Lager

Aus der Häufigkeitsverteilung der Gleitgeschwindigkeiten kann ein deutlich differierendes Gleitverhalten offensichtlich in Abhängigkeit vom Lagertyp festgestellt werden. Beim einachsig verschieblichen Lager (rechts) erfolgen rd. 80 % aller Verschiebungen mit Gleitgeschwindigkeiten $\leq 6,4$ mm/s, beim linken Lager (zweiachsig verschieblich) sind dies rd. 99 %. Offensichtlich führen Zwängungen in der Führung des Lagers zu ruckartigen (stick-slip) Verschiebungen mit zwar kleinen Verschiebungswegen, jedoch extrem hohen Gleitgeschwindigkeiten (bis zu 102 mm/s).

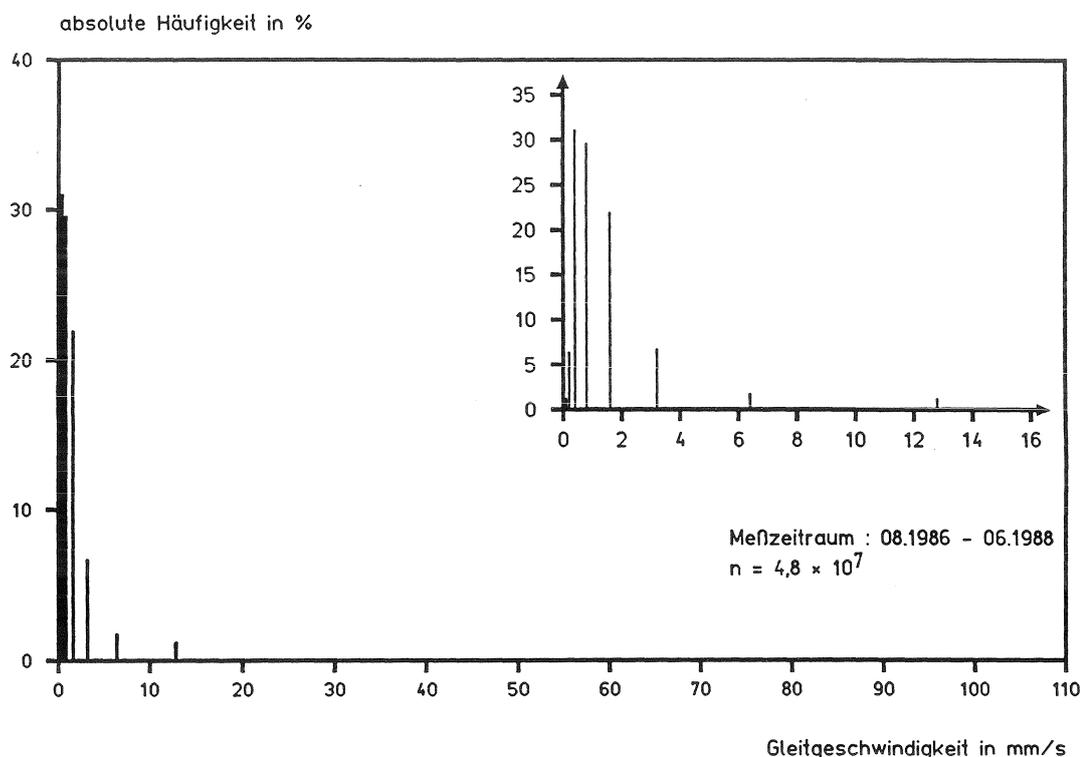


Bild 29b: Absolute Häufigkeit der Gleitgeschwindigkeiten; linkes Lager

Für die Betrachtung verschleißerzeugender Beanspruchungsparameter ist die Verteilung der Gleitgeschwindigkeiten, differenziert nach Verschiebungsklassen, von Interesse (Bilder 30a und 30b). Dazu sind nur die Verschiebungsklassen bis $\leq 128 \mu\text{m}$ zu berücksichtigen (vgl. Bild 26). Tendenziell nehmen mit größer werdenden Verschiebungen (Verschiebungsklassen) die Gleitgeschwindigkeiten zu. Lediglich die Verschiebungsklasse = $4 \mu\text{m}$ weist Gleitgeschwindigkeiten $\leq 0,4 \text{ mm/s}$ (Gleitgeschwindigkeit für Zulassungsversuche) auf.

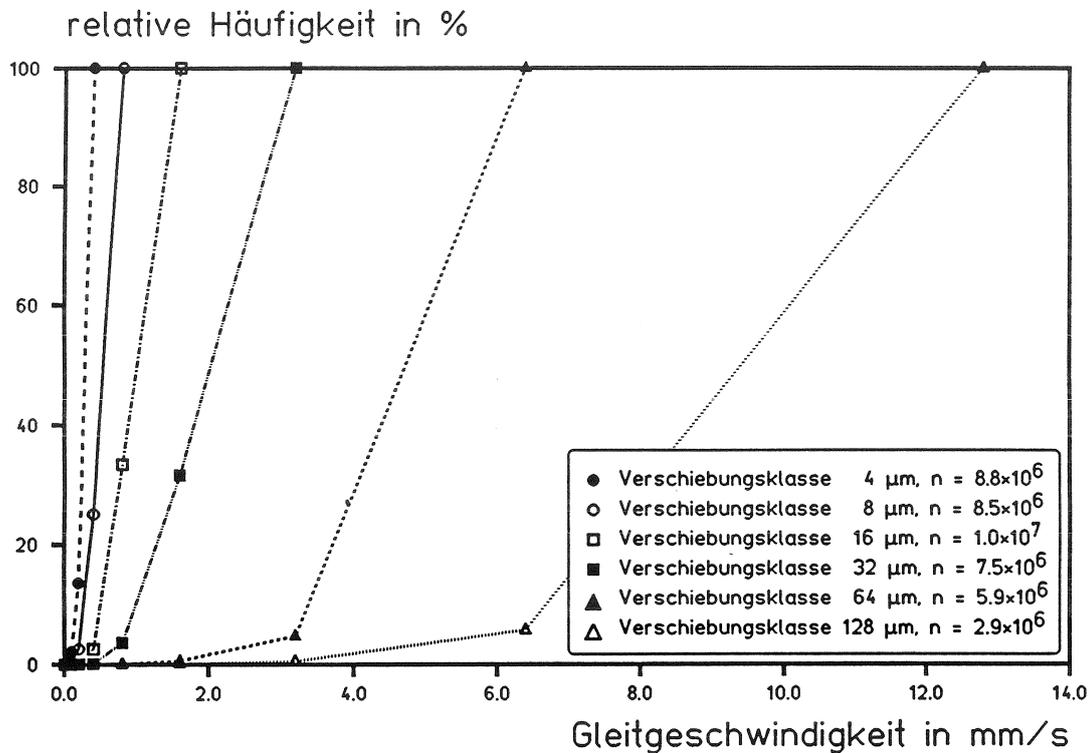


Bild 30a: Summenlinie der Gleitgeschwindigkeit, differenziert nach Verschiebungsklassen; rechtes Lager

In Abhängigkeit von der Verschiebungsklasse treten im Mittel die folgenden Gleitgeschwindigkeiten am rechten Lager auf:

Verschiebungsklasse =	4 µm	v = 0,3 mm/s
"	≤ 8 µm	v = 0,4 mm/s
"	≤ 16 µm	v = 1,0 mm/s
"	≤ 32 µm	v = 2,0 mm/s
"	≤ 64 µm	v = 4,6 mm/s
"	≤ 128 µm	v = 9,4 mm/s.

Am linken Lager betragen die mittleren Gleitgeschwindigkeiten abhängig von der Verschiebungsklasse:

Verschiebungsklasse =	4 μm	$v = 0,3 \text{ mm/s}$
"	$\leq 8 \mu\text{m}$	$v = 0,4 \text{ mm/s}$
"	$\leq 16 \mu\text{m}$	$v = 1,0 \text{ mm/s}$
"	$\leq 32 \mu\text{m}$	$v = 1,6 \text{ mm/s}$
"	$\leq 64 \mu\text{m}$	$v = 3,7 \text{ mm/s}$
"	$\leq 128 \mu\text{m}$	$v = 7,3 \text{ mm/s}$

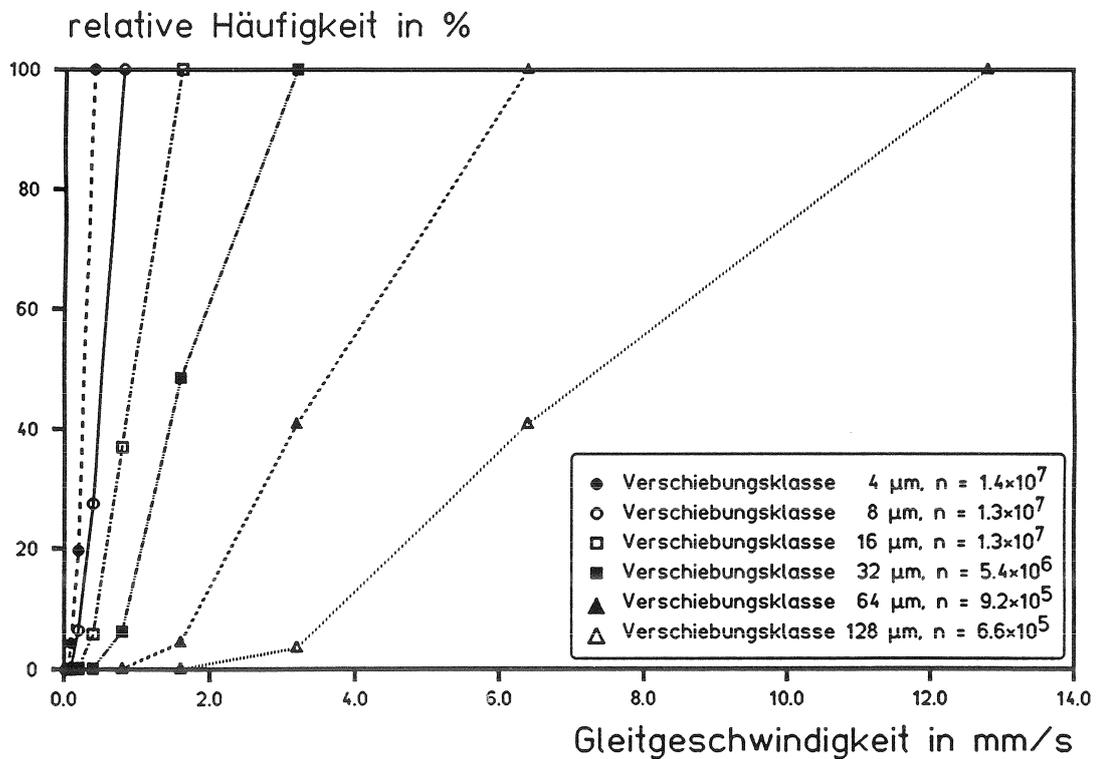


Bild 30b: Summenlinie der Gleitgeschwindigkeit, differenziert nach Verschiebungsklassen; linkes Lager

6.1.7 Auflagerdrehwinkel

Aus der Differenz der Verschiebungsmessungen der jeweils am rechten und linken Lager senkrecht übereinander angeordneten Wegaufnahme wird die Auf-

Lagerverdrehung unter Beachtung des Abstands der Meßaufnehmer errechnet. Dabei wird der Endquerträger als ausreichend steif angenommen. Aus den kleinen Verschiebungen der Oberschwingungen resultieren dementsprechend sehr kleine Auflagerdrehwinkel. Als maximaler Drehwinkel werden $\text{tg } \gamma = 4,9 \cdot 10^{-4}$, als minimaler Drehwinkel $\text{tg } \gamma = 9,6 \cdot 10^{-7}$ registriert. Der Mittelwert liegt bei $\text{tg } \gamma = 6,8 \cdot 10^{-6}$ für das rechte und bei $\text{tg } \gamma = 3,3 \cdot 10^{-6}$ für das linke Lager. Die Summenlinien der relativen Häufigkeit der Auflagerdrehwinkel sind in Bild 31 dargestellt.

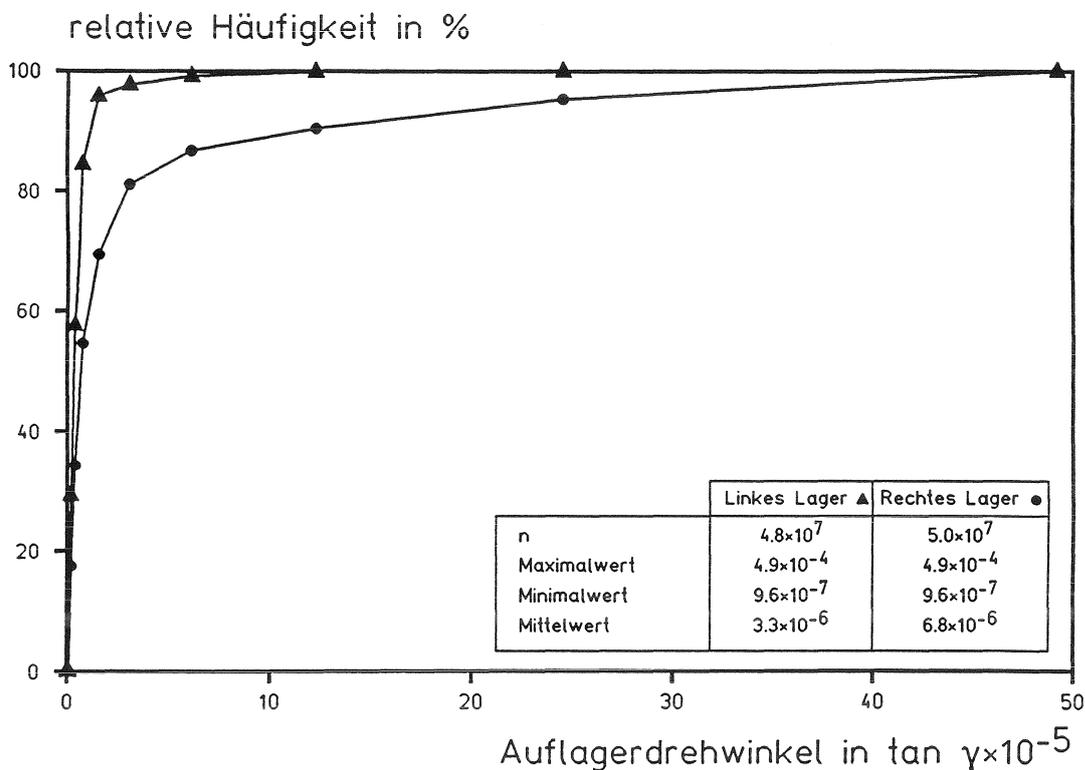


Bild 31: Relative Häufigkeit der Auflagerdrehwinkel

Die Darstellung verdeutlicht, daß

- rd. 20 bis 30 % der Auflagerdrehwinkel auf relativ kleine Klassen entfallen

- deutliche Unterschiede in Abhängigkeit von der Lagersituation und dem Lagertyp auftreten.

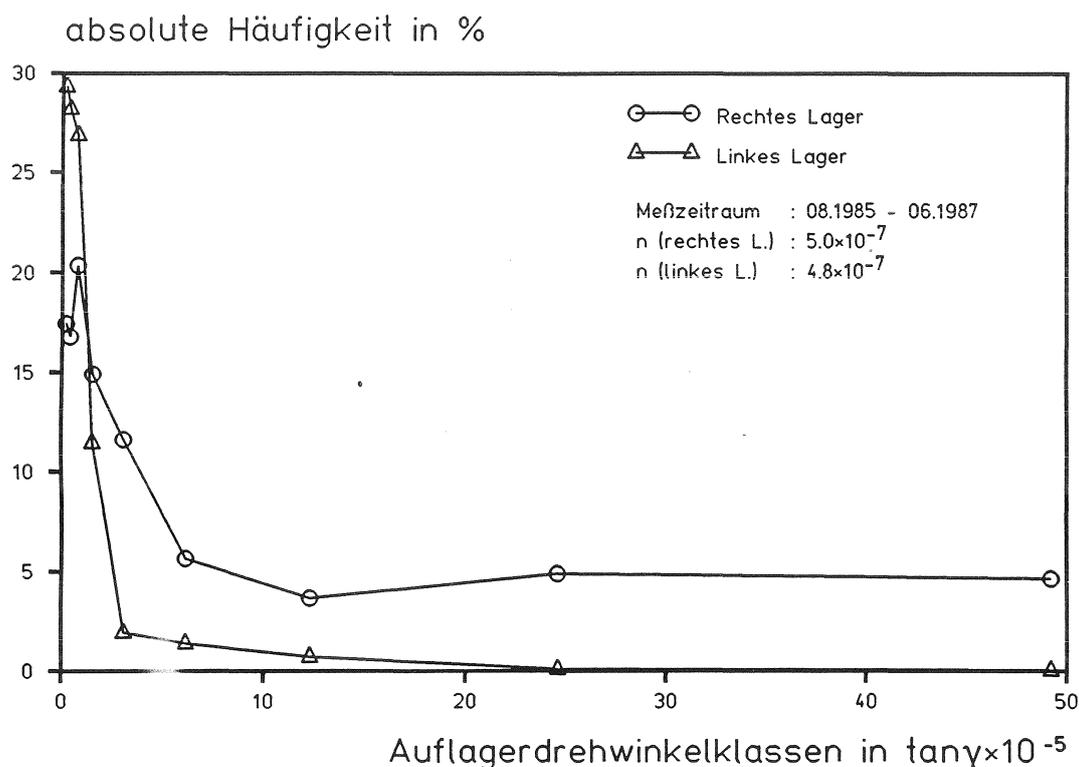


Bild 32: Absolute Häufigkeit der Auflagerdrehwinkelklassen

6.1.8 Winkelgeschwindigkeiten

Die Winkelgeschwindigkeit errechnet sich aus dem Auflagerdrehwinkel und der zugehörigen Dauer der Rotation. Über den Meßzeitraum wurde eine maximale Winkelgeschwindigkeit in der Lagerquerachse von $5,0 \cdot 10^{-8}/s$ errechnet, der Minimalwert betrug $1,0 \cdot 10^{-12}/s$. Die Summenlinien der relativen Häufigkeit der Winkelgeschwindigkeit ist in Bild 33 dargestellt.

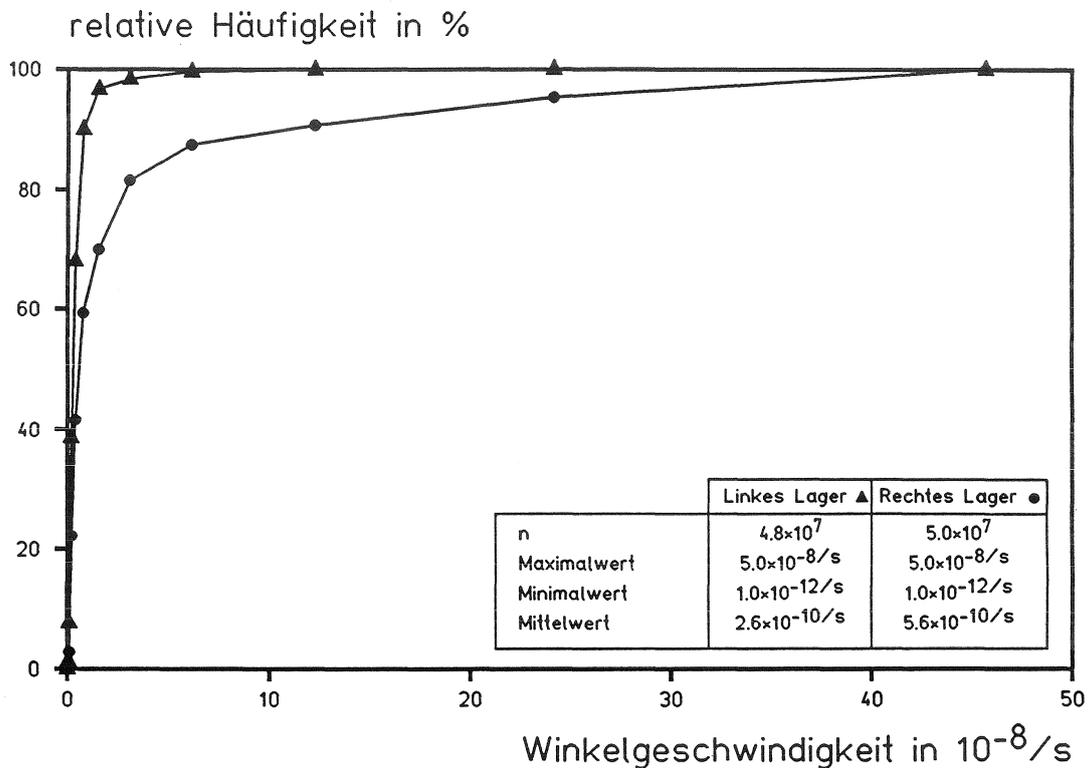


Bild 33: Relative Häufigkeit der Winkelgeschwindigkeiten

Die mittlere Winkelgeschwindigkeit beträgt für das rechte Lager rd. $5,6 \cdot 10^{-10}/s$ und für das linke rd. $2,6 \cdot 10^{-10}/s$. Vermutlich infolge der unmittelbaren Überfahrt in Richtung Duisburg treten am rechten Lager größere Winkelgeschwindigkeiten gegenüber dem linken Lager auf. Aufgrund der Bauwerksgeometrie (Spannweite, Abstand der neutralen Faser von der Gleitebene) und der geringen Eigenfrequenz sind die wesentlich aus dynamischer Verkehrsbeanspruchung gemessenen Winkelgeschwindigkeiten der Einzelverdrehungen sehr klein.

Die Darstellung der absoluten Häufigkeit der Winkelgeschwindigkeiten (Bilder 34a und 34b) verdeutlicht, daß rd. 80 % aller Ereignisse des rechten Lagers einer Winkelgeschwindigkeit $\leq 0,3 \cdot 10^{-8}/s$ zugeordnet werden können, am linken Lager sind das rd. 98 %.

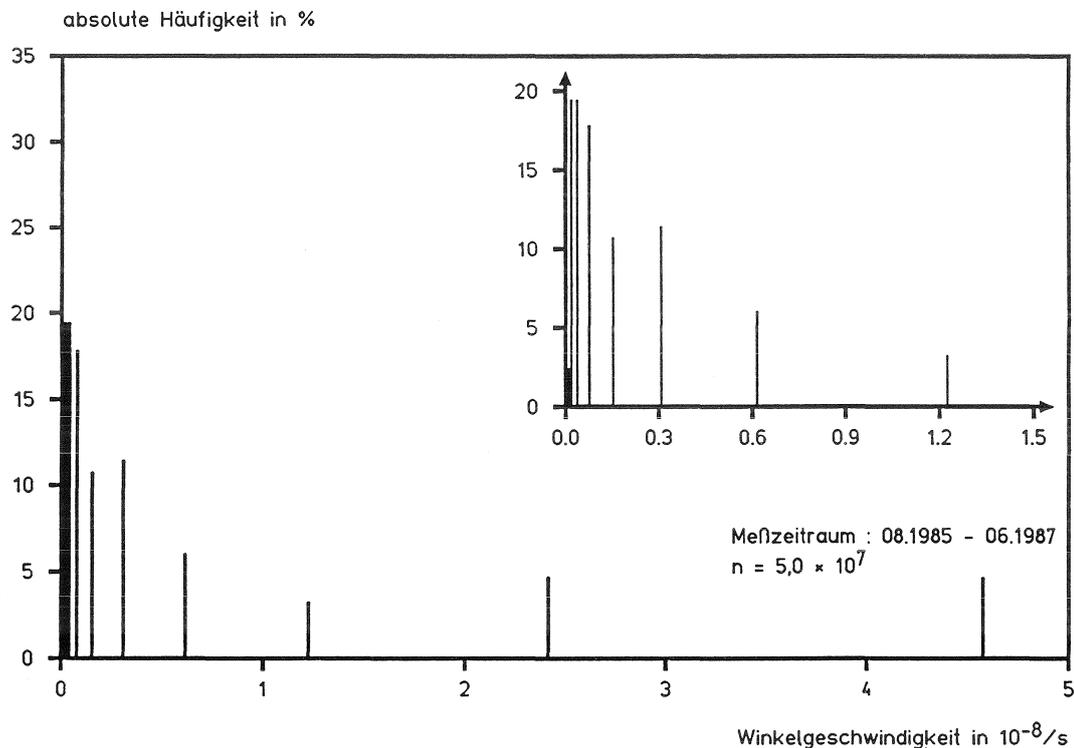


Bild 34a: Absolute Häufigkeit der Winkelgeschwindigkeiten; rechtes Lager

6.2 Bauwerkstemperaturen

6.2.1 Allgemeines zur Auswertung

Die Temperaturen an den 4 Temperatursensoren wurden dreimal stündlich (alle 20 Minuten) registriert und als Absolutwerte auf Diskette abgespeichert. Für die Auswertung wurden die Daten auf den Institutsrechner überspielt und in Relativwerte transformiert. Zur Auswertung wurden lediglich die Meßzeiträume herangezogen, an denen verwertbare Meßwerte aus den Lagerbewegungsmessungen (Abschn. 6.1) vorlagen.

Zur überschlägigen Abschätzung der Größenordnung temperaturinduzierter Lagersummenwege wurde die sogenannte "mittlere Bauwerkstemperatur" /24/ unter den vereinfachenden Annahmen ermittelt, daß

- die Temperaturverteilung in jedem Hohlkasten gleichmäßig ist,
- die Temperaturverteilung in der orthotropen Fahrbahnplatte gleichmäßig ist
- der Asphaltbelag einen vernachlässigbaren Einfluß auf die Temperaturdehnung des Überbaus ausübt
- Krümmungen (lineare Temperaturverteilung) und Eigenspannungen (nichtlineare Temperaturverteilung) vernachlässigt werden können.

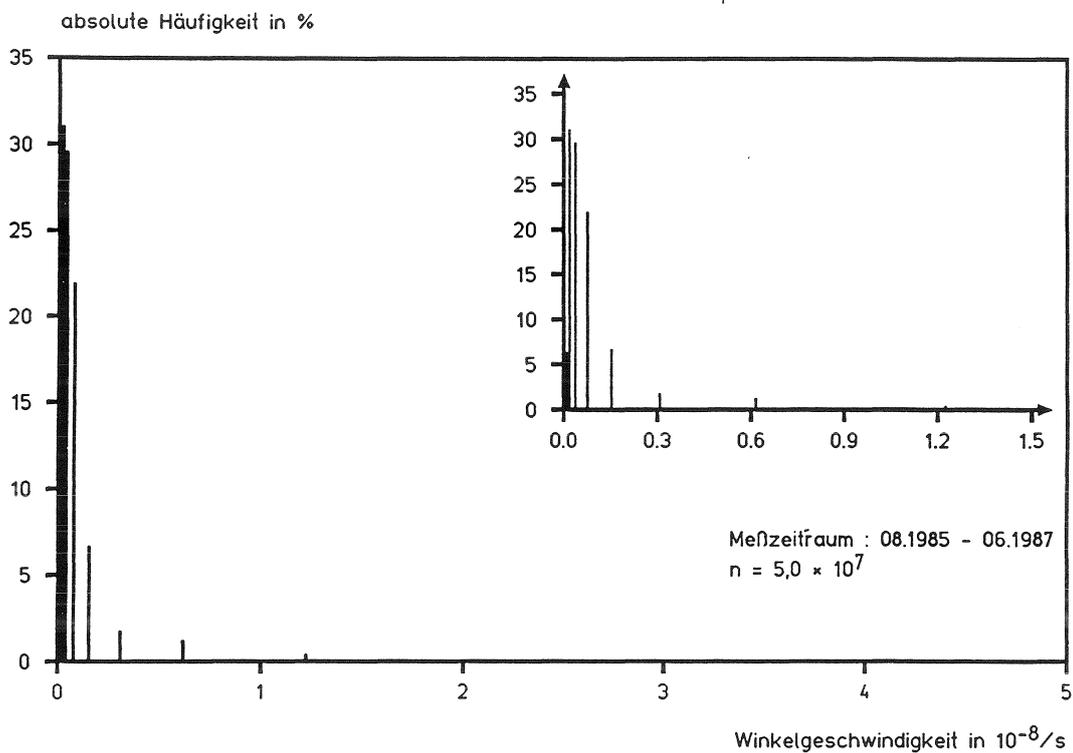


Bild 34b: Absolute Häufigkeit der Winkelgeschwindigkeiten; linkes Lager

Für die mittlere Bauwerkstemperatur wurde der folgende vereinfachende Ansatz zugrundegelegt:

$$T_{\text{mittel}} = \frac{T_1}{2} + \left(\frac{T_2 \cdot U_2 + T_3 \cdot B + T_4 \cdot U_4}{U_{\text{ges}}} \right) \cdot \frac{1}{2}$$

mit:

- T_{mittel} = mittlere Bauwerkstemperatur
- T_1 = Umgebungstemperatur der Brücke im Lagerbereich
- T_2 = Temperatur des linken Stegs
- T_3 = Temperatur der Fahrbahnplatte
- T_4 = Temperatur des rechten Stegs
- U_2 = Umfang des linken Stegs
- U_4 = Umfang des rechten Stegs
- U_{ges} = Umfang des Gesamtquerschnitts
- B = Breite der Fahrbahnplatte.

Zur Ermittlung des Steg-Umfangs wurde eine mittlere Bauwerkshöhe aus Regel- und Stützquerschnitt zugrundegelegt. Für die rechnerische Ermittlung temperaturinduzierter Lagerverschiebungen wurde

- die lineare Wärmedehnzahl α_T mit $1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 1/K$
- die Dilatationslänge mit 439 m

angenommen.

Aus den rechnerischen Ergebnissen wurde durch Summation von Absolutwerten (positive und negative Verschiebungen) der Lagersummenweg infolge Temperatur ermittelt.

6.2.2 Täglicher Lagersummenweg infolge Temperatur

In Bild 35 ist die Ganglinie der rechnerisch ermittelten Lagersummenwege über den Meßzeitraum dargestellt.

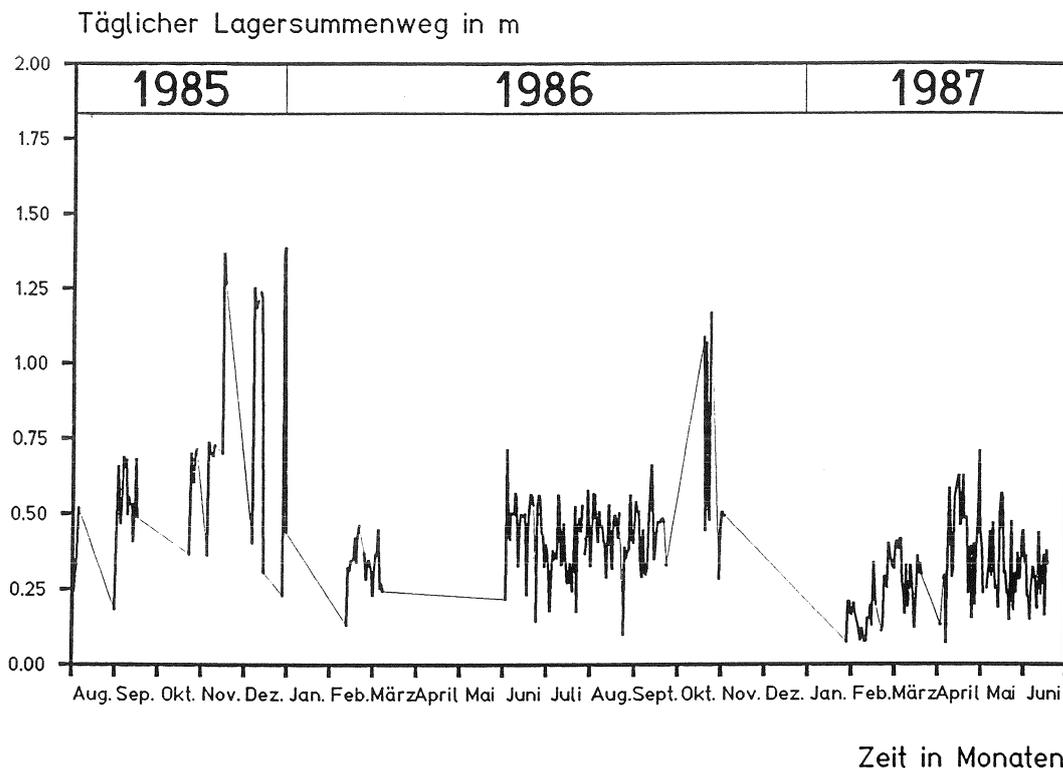


Bild 35: Täglicher Lagersummenweg infolge Temperaturänderungen

Relative Maxima treten in den Wintermonaten auf, während in den Sommermonaten infolge stärkerer täglicher Temperaturänderungen und stärkerer Strahlungseinflüsse häufige alternierende Verschiebungen verzeichnet werden.

Der mittlere temperaturinduzierte tägliche Lagersummenweg kann mit rd. 0,5 m/d abgeschätzt werden. Die Summenlinie (Bild 36) der täglichen Lager-summenwege über den Meßzeitraum läßt einen jährlichen Lagersummenweg von rd. 100 m erwarten, das sind rd. 2 % des gesamten gemessenen jährlichen Lagersummenwegs.

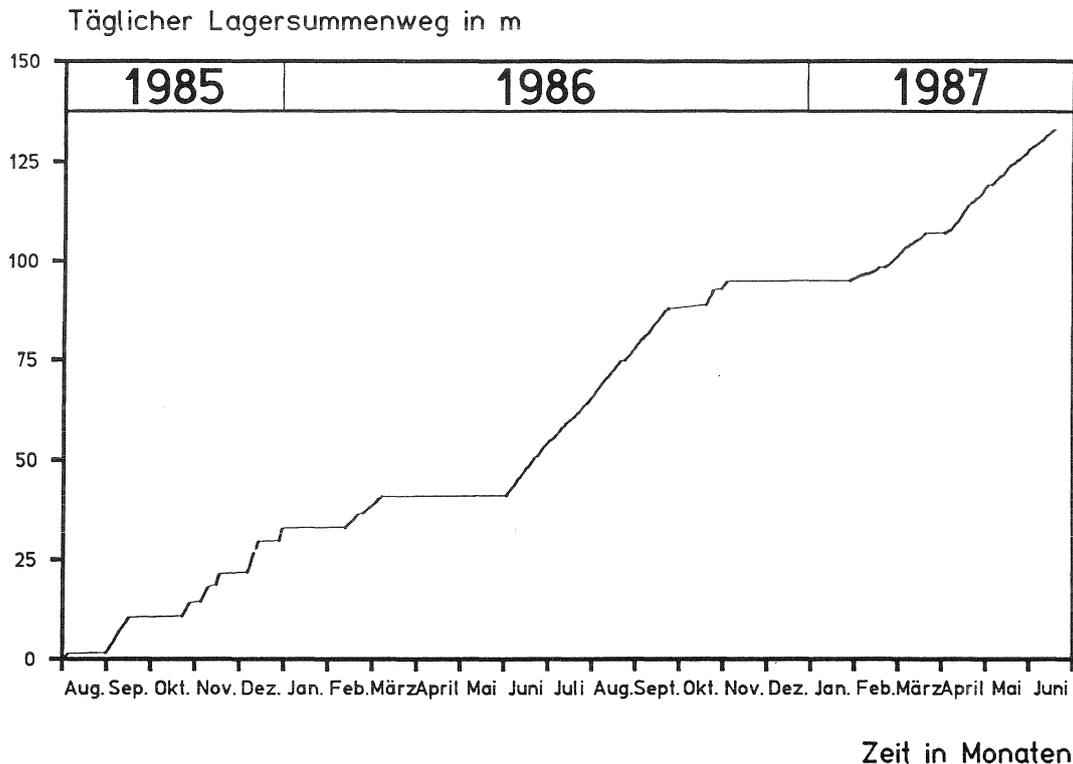
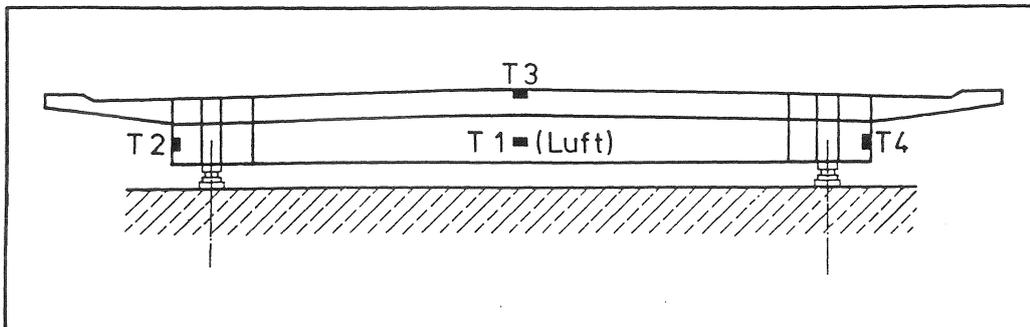


Bild 36: Summenlinie des täglichen Lagersummenwegs infolge Temperatur über den Meßzeitraum

6.2.3 Extreme Bauwerkstemperaturen

Die im Verlauf der Messungen je Meßort registrierten Extremtemperaturen und die jeweilige mittlere Temperatur über den Meßzeitraum sind in Tabelle 14 zusammengestellt.

Während der Wintermonate ist keine signifikante Temperaturdifferenz am Überbauquerschnitt feststellbar. In den Sommermonaten treten insbesondere infolge der Sonneneinstrahlung (das Bauwerk hat eine ausgeprägte Nord-Süd-Orientierung) Temperaturdifferenzen innerhalb des Querschnittes von bis zu 20 K auf. In Tabelle 15 sind die maximalen Temperaturdifferenzen innerhalb eines Tages je Meßstelle zusammengestellt.

Tabelle 14: Extreme und mittlere Temperatur je Meßort im Meßzeitraum


Meßstelle	Temperatur in °C		
	Minimum	Maximum	Mittelwert
T ₁	-13,0	+29,8	+ 9,7
T ₂	-13,3	+36,9	+10,4
T ₃	-16,1	+45,3	+10,6
T ₄	-12,6	+34,1	+10,5

Tabelle 15: Maximale Temperaturdifferenzen innerhalb eines Tages

Meßstelle	Temperaturdifferenz	Datum
	K	
T ₁	14,4	10.05.1987
T ₂	20,5	29.04.1987
T ₃	27,6	10.05.1987
T ₄	20,4	09.08.1985

Bild 37 zeigt beispielhaft angewählte Tagesganglinien der Temperatursensoren für den 23.02.1986 und den 25.04.1987.

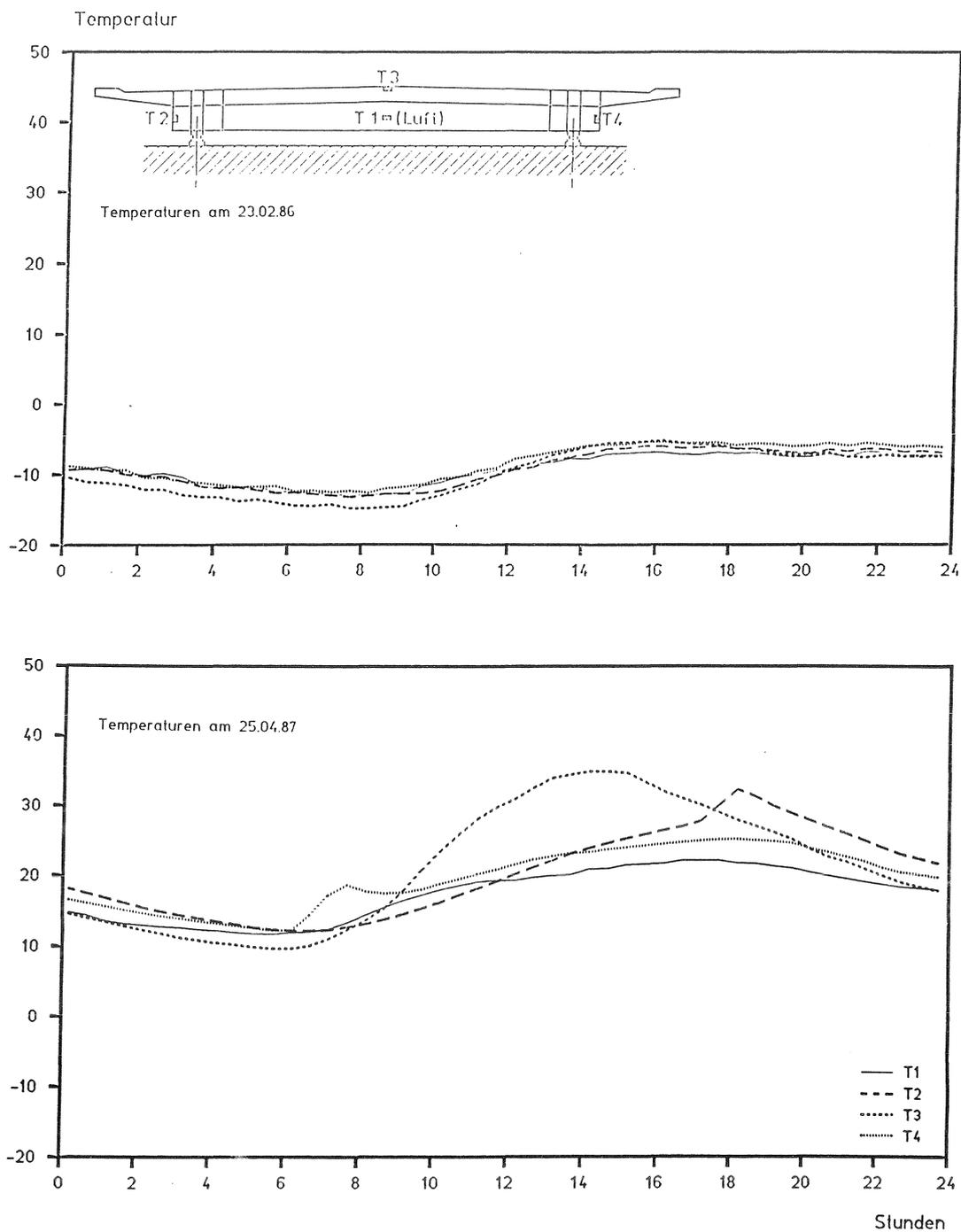
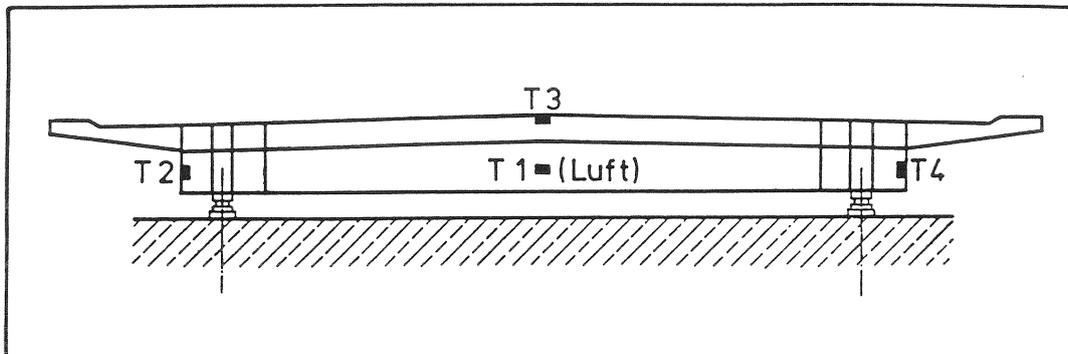


Bild 37: Temperaturganglinien ausgewählter Winter- und Sommermonate

Maximale Temperaturdifferenzen am Querschnitt innerhalb eines Tages sind in Tabelle 16 zusammengefaßt.

Tabelle 16: Maximale Temperaturdifferenzen an einem Tag



Differenz der Meßstelle	Temperaturdifferenz K	Datum
$T_1 - T_2$	10,5	25.04.1987
$T_1 - T_3$	17,0	17.06.1986
$T_1 - T_4$	14,1	09.06.1986
$T_2 - T_3$	13,4	02.07.1986
$T_2 - T_4$	14,2	06.09.1986
$T_3 - T_4$	15,4	06.09.1986

6.2.4 Zusammenfassung

Der Lagersummenweg infolge Temperatur kann mit einem Anteil von rd. 2 % am gesamten Lagersummenweg als verschleißrelevante Größe vernachlässigt werden.

Die Extremtemperaturen im Bereich der Lager (T_2 und T_4) wurden mit rd. -13 °C und rd. $+35\text{ °C}$ ermittelt. Die mittlere Temperatur liegt bei rd. 10 °C und entspricht exakt der Bezugstemperatur gemäß DIN 1072 /14/ für den Lagereinbau. Für den Tieftemperaturbereich sind Laborversuche bei -35 °C mit ausreichendem Sicherheitsabstand anzusehen. Bei höheren Temperaturen muß auch über längere Zeiträume, insbesondere am rechten Lager des betrachteten Bauwerks, mit Temperaturen deutlich über $+21\text{ °C}$ gerechnet werden.

Am Überbau treten relativ große tägliche Temperaturdifferenzen an den Meßorten und innerhalb des Querschnittes auf. Als Folge hiervon können Zwängungen in den Lagern, insbesondere dem einachsigen verschiebbaren, unterstellt werden.

Die täglichen Temperaturdifferenzen sind teils größer als der Mittelwert, so daß eine Korrelation mit lokalen Temperaturmessungen (Wetterstationen) nicht möglich ist. Ursache hierfür sind zu starke Abhängigkeiten des Stahlüberbaus von der Strahlungsbilanz /17/ und Windeinwirkungen /26/.

7 DOKUMENTATION DES LAGERZUSTANDES

7.1 Gleitplatten

Die Gleitplatten der ausgebauten Gleitlager am Gruppenfeiler bestehen aus einem Zweischichten-Verbundwerkstoff gemäß Zulassung /36/ (aus POM und einem Hartgewebe). Jede Schicht weist eine Dicke von rd. 2,0 mm auf.

Gemäß der Zulassung soll die maximale Rauhtiefe der POM-Oberfläche 0,5 µm, Einzelwerte 1,0 µm, nicht überschreiten.

Beide Gleitplatten (rechtes und linkes Lager) besitzen eine Länge von 1,32 m und eine Breite von 0,63 m (rechtes Lager) bzw. 0,67 m (linkes Lager).

Beim Ausbau zerbrach die Gleitplatte des rechten Lagers.

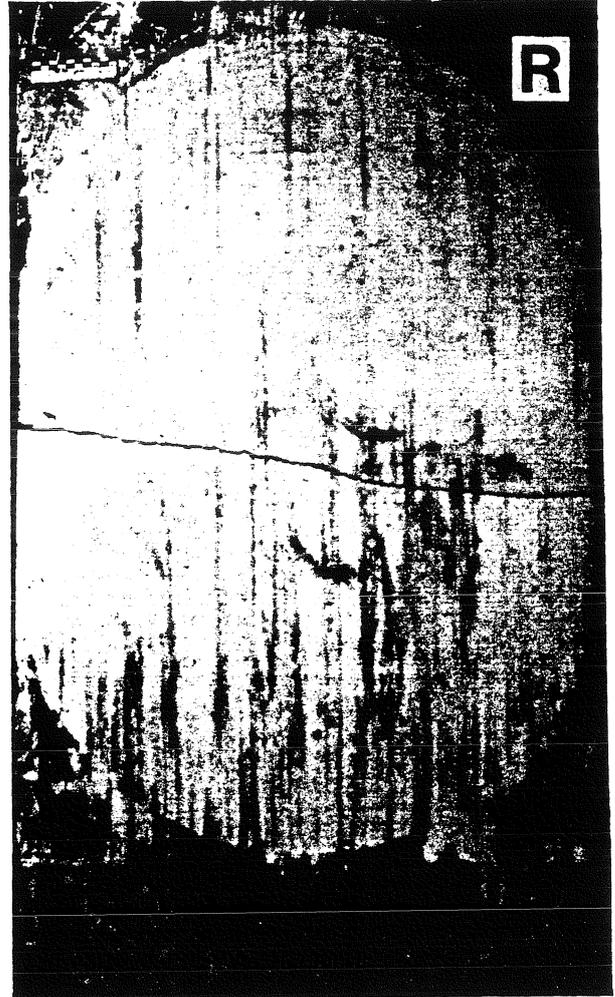
7.1.1 Visuelle Bemusterung

Der Zustand der Gleitplatten wurde unmittelbar nach dem Lagerausbau fotografisch dokumentiert (Bild 38). Aus der Kontamination der Oberflächen mit Schmutz und Atmosphärrillen außerhalb des Gleitbereiches sowie Schmierstoffrückständen (beim Gleitvorgang herausgetreten) ist ein maximaler sowie ein bevorzugter Gleitbereich erkennbar (Bild 39).

FELD



FELD



GRUPPEN-
PFEILER



GRUPPEN-
PFEILER

Bild 38: Zustand der Gleitplatten nach dem Lagerausbau;
Linkes Lager (L) und Rechtes Lager (R)

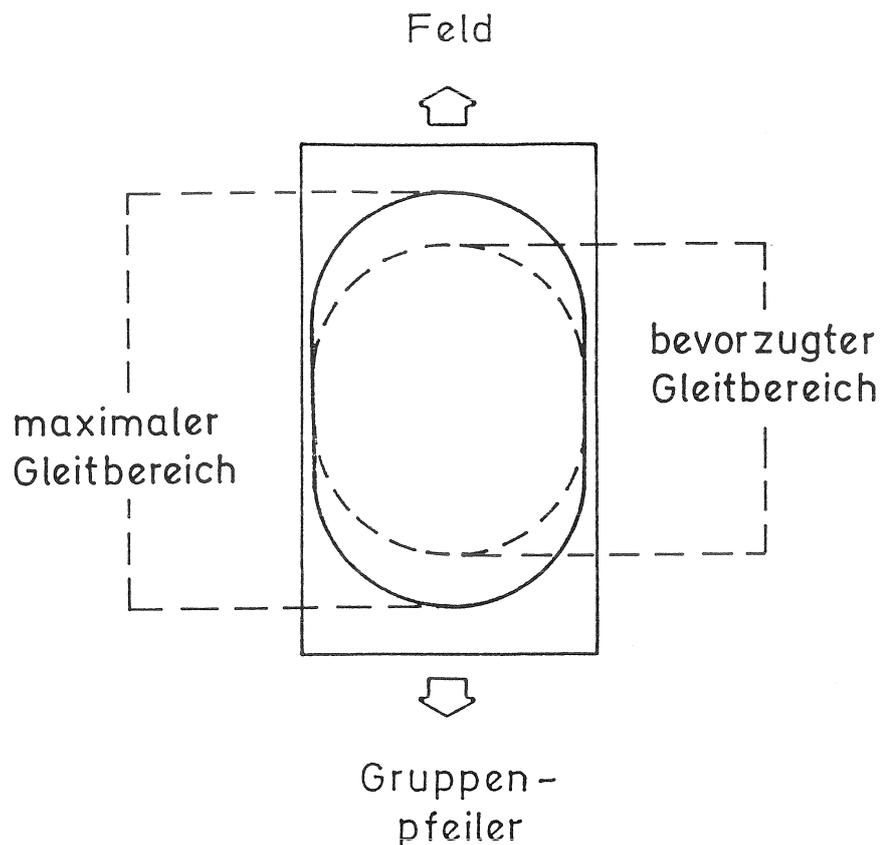


Bild 39: Prinzipdarstellung von Gleitbereichen auf den POM-Gleitplatten

Beim zweiachsig verschiebbaren Lager (linkes Lager) erreicht die PTFE-Scheibe (Durchmesser 610 mm) unter Betriebsbeanspruchung regelmäßig den seitlichen Randbereich der POM-Platte in Feldrichtung. Der maximale Gleitbereich umfaßt eine Länge von rd. 1087 mm (= einer Längenänderung des Überbaus von rd. 477 mm). Aus dem Erscheinungsbild der POM-Oberfläche kann ein "bevorzugter" Gleitbereich von rd. 750 mm abgeschätzt werden (= einer Längenänderung des Überbaus von rd. 290 mm). Der Randabstand des "bevorzugten" Gleitbereiches zum Feld beträgt rd. 105 mm, daraus resultiert eine überwiegende positive Außermittheit aus der Lagerachse (zum Gruppenpfeiler) von rd. 250 mm (660 mm-105 mm-305 mm).

Das rechte Lager (einachsig verschiebbar) weist ebenfalls einen maximalen Gleitbereich von rd. 1080 mm auf (die maximale Verschiebung zum Gruppenpfeiler ist nur schwach erkennbar). Der "bevorzugte" Gleitbereich kann mit rd. 900 mm angenommen werden, der Randabstand dieses Bereiches zum Feld mit rd. 45 mm. Die überwiegende positive Außermittheit des Lagers beträgt rd. 305 mm.

Die Kontamination der POM-Oberfläche ist in Feldrichtung weitaus geringer als in Richtung Gruppenpfeiler (Bild 38). Das Erscheinungsbild der Verschmutzung ist braun fettartig bis pastös, in Richtung Gruppenpfeiler sind zunehmende staubartige Einlagerungen erkennbar. Am Gleitbereichende in Feldrichtung befinden sich keinerlei Rückstände aus heraustransportiertem Schmierstoff, dagegen sind in Gruppenpfeilerrichtung ausgeprägte Fettrückstände vorhanden (Bild 40).

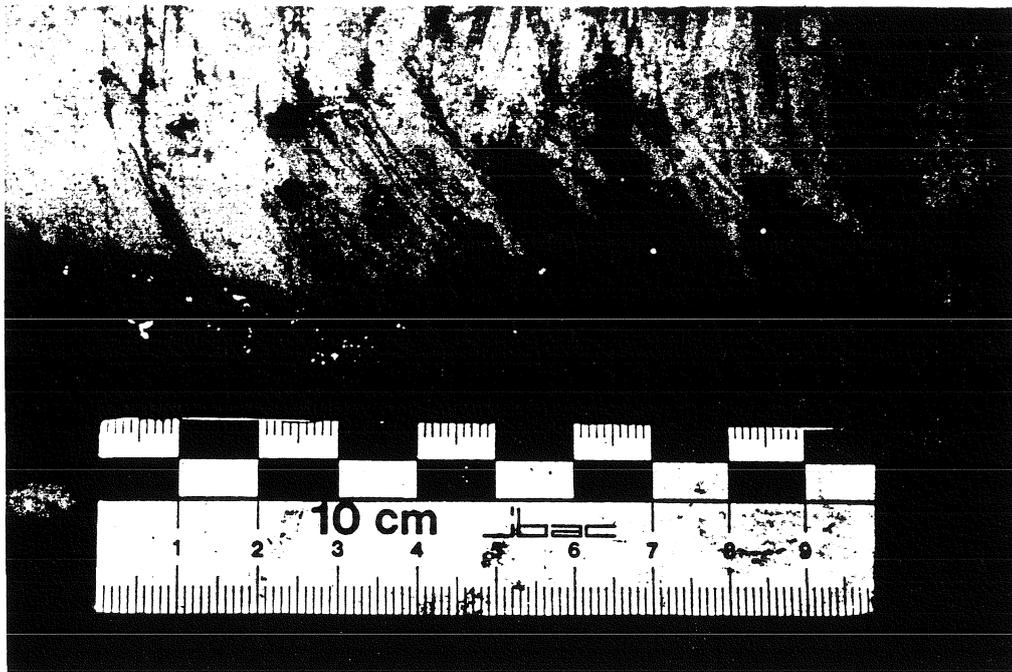


Bild 40: Heraustransportierter Schmierstoff; linkes Lager

Der Schmierstoff ist schwarz pastös und weist starke Schmutzeinlagerungen auf. Vereinzelt werden ganze Schmierstoffspeicher aus der PTFE-Scheibe herausgelöst, die als feste Masse an der POM-Scheibe haften bleiben.

An der Oberfläche des POM befindet sich über größere Bereiche eine mehrere μm -dicke, gelblich feste Masse. Aufgrund der pastösen Schmierstoff-Konsistenz wird das Fett offensichtlich nach langer Betriebsdauer (hier rd. 15 a) bei Verschiebungsvorgängen nicht mehr mitgeführt (ein sog. Nachschmiereffekt kann nicht unterstellt werden), sondern bestenfalls durch "Walkvorgänge" bedingt verteilt (Bild 37). Die Abdrücke der Schmierstoff-

speicher sind auf der POM-Oberfläche erkennbar, fallweise sind beim Verschiebungsvorgang ganze Schmierstoffspeicher herausgelöst worden; das Fett wird jedoch lediglich durch die nachfolgende Betriebsbeanspruchung um wenige Zentimeter verteilt (Bild 38, linkes Lager, Mitte).

In Gleitrichtung weist die POM-Oberfläche starke Kratzer auf. Die Kratzer sind vornehmlich im nichtbevorzugten Gleitbereich anzutreffen, da hier ein Gleiten über verschmutzte Oberflächen stattfindet (Bild 41). Senkrecht zur Gleitrichtung weisen die POM-Oberflächen Gestaltabweichungen 3. Ordnung gemäß DIN 4760 auf. Überwiegend im nichtbevorzugten Gleitbereich ist eine geordnete gleichgerichtete Rillenschar parallel zur Gleitrichtung vorhanden, die Rillen sind parallel und haben gleichen Rillenabstand. Die Rillentiefe beträgt bis zu $150\ \mu\text{m}$, die Rillenbreite und der Rillenabstand rd. $15\ \mu\text{m}$. Das Rillenprofil (Rillenbreite, Rillenabstand) korreliert mit der Ausbildung der Schmierstoffspeicher des PTFE gemäß der Zulassung (Durchmesser der Schmierstoffspeicher: $8\ \text{mm}$), Achsabstand der Schmierstoffspeicher in Gleitrichtung: $15\ \text{mm}$).

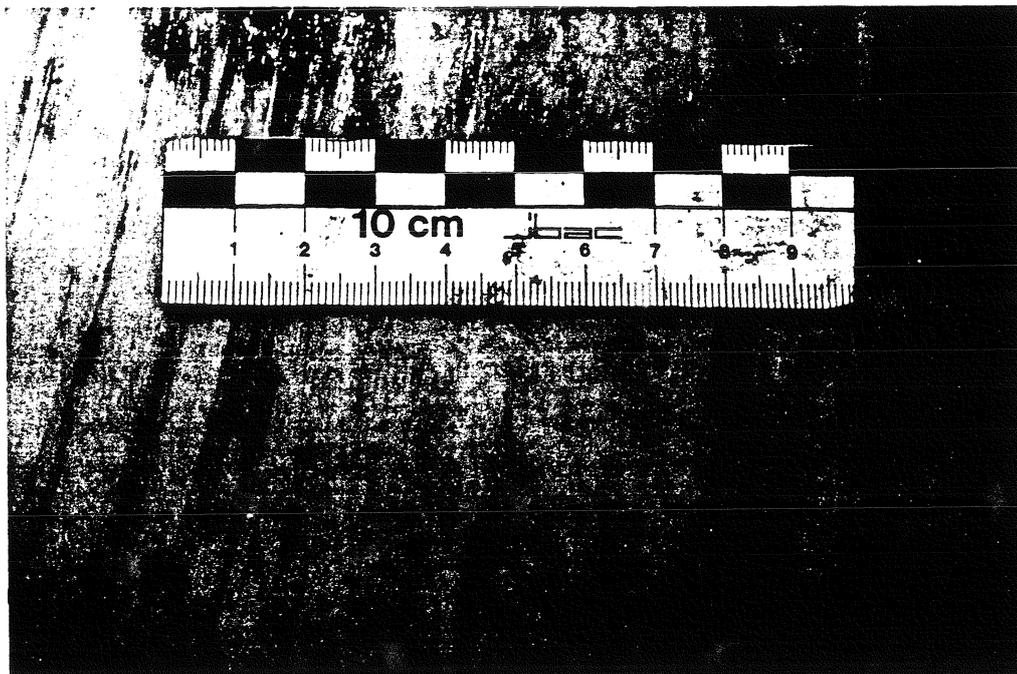


Bild 41: Kratzer und Rillen an der POM-Oberfläche; rechtes Lager

7.1.2 Ausgewählte Rauhtiefenprofile

Zur quantitativen Beschreibung des Verschleißzustandes der POM-Gleitplatten wurden Rauheitsprofile an ausgewählten Punkten parallel und senkrecht zur Gleitrichtung aufgenommen. An jeder Gleitplatte wurde das Rauhtiefenprofil

- außerhalb des Gleitbereichs (augenscheinlich keine Kratzer oder Rillen)
- im bevorzugten Gleitbereich (Plattenmitte)
- im nicht bevorzugten Gleitbereich in Feldrichtung
- im nicht bevorzugten Gleitbereich in Gruppenfeilerrichtung

aufgenommen (Bild 42).

Aufgrund der starken Gestaltabweichungen (Abschn. 7.1.1) treten große Streuungen innerhalb der Rauheitsmeßgrößen auf, die wegen des begrenzten Untersuchungsumfangs die Angabe von statistisch abgesicherten Rauheitsmeßgrößen nicht erlauben. Die Rauhtiefenprofile geben jedoch Aufschluß über Unterschiede der Oberflächentextur.

Vor den Rauheitsmessungen wurden die Meßorte mit einem Zellstofftuch und Lösemittel gereinigt. Die Rauheit wurde mit einem elektrischen Tastschnittgerät (Fabrikat Hommel, Hommel Tester T1000) nach DIN 4768 aufgenommen. Die Taststrecke l_t betrug 15 mm, die Filtercharakteristik wurde durch eine Grenzwellenlänge von $l_c = 2,5$ mm festgelegt.

Exemplarisch für die ermittelten Rauhtiefenprofile sind in Bild 43 die Rauhtiefenprofile außerhalb des Gleitbereiches sowie am bevorzugten Gleitbereich jeweils des rechten Lagers dargestellt. Die maximale Rauhtiefe der unbeanspruchten Oberflächenbereiche liegt deutlich über den zulässigen Werten der Zulassung (in Gleitrichtung um den Faktor 2,0, senkrecht zur Gleitrichtung um den Faktor 3,4). Ein von der Orientierung abhängiger unterschiedlicher Oberflächencharakter (Profilunregelmäßigkeiten; Profilkuppen mit benachbartem Profiltal) ist nicht erkennbar.

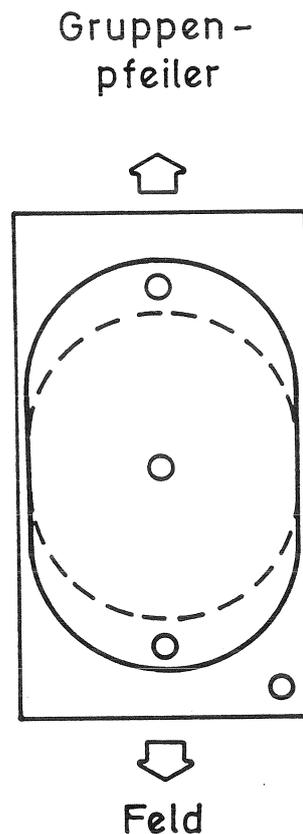


Bild 42: Meßorte zur Bestimmung der Rauhtiefenprofile an den POM-Gleitplatten; Prinzipdarstellung

Im Zentrum des bevorzugten Gleitbereichs werden fallweise in Gleitrichtung maximale Rauhtiefen von rd. $8,4 \mu\text{m}$, senkrecht dazu von rd. $25 \mu\text{m}$, registriert (Faktor 8,4 bzw. 2,5 gegenüber den zulassungsgemäßen Größen). Abhängig von der Gleitrichtung (Betriebsbeanspruchung) liegt eine differierende Oberflächentextur vor. In Gleitrichtung liegen Oberflächenunregelmäßigkeiten mit relativ kleinen Abständen innerhalb eines eng begrenzten Streubereichs ($R_a = 0,33 \mu\text{m}$) vor. Senkrecht zur Gleitrichtung wird die Oberflächenrauheit von einer Welligkeit überlagert, es werden maximale Rauhtiefen von rd. $25 \mu\text{m}$ und eine mittlere Rauhtiefe R_a von $5,5 \mu\text{m}$ registriert. Die von der Gleitrichtung abhängige differierende Oberflächentextur wird an allen Meßorten (linkes und rechtes Lager) innerhalb des Gleitbereichs vorgefunden.

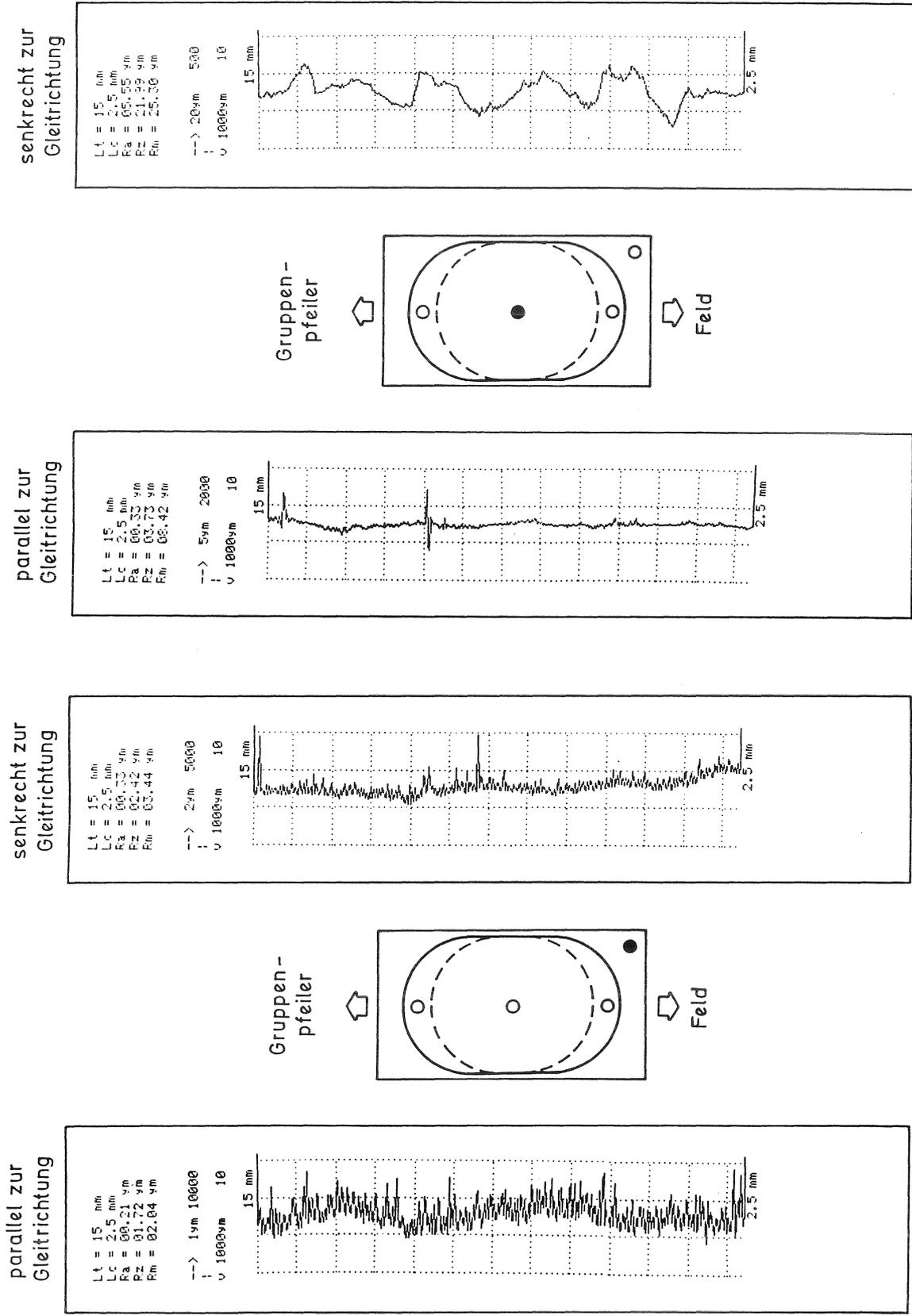


Bild 43: Rauhtiefenprofile an der POM-Gleitplatte des rechten Lagers
Außerhalb des Gleitbereiches/bevorzugter Gleitbereich

7.2 PTFE-Scheiben und -Führungsleisten

7.2.1 Visuelle Bewertung

Der Zustand der PTFE-Scheiben nach dem Lagerausbau ist fotografisch in Bild 44 dokumentiert.

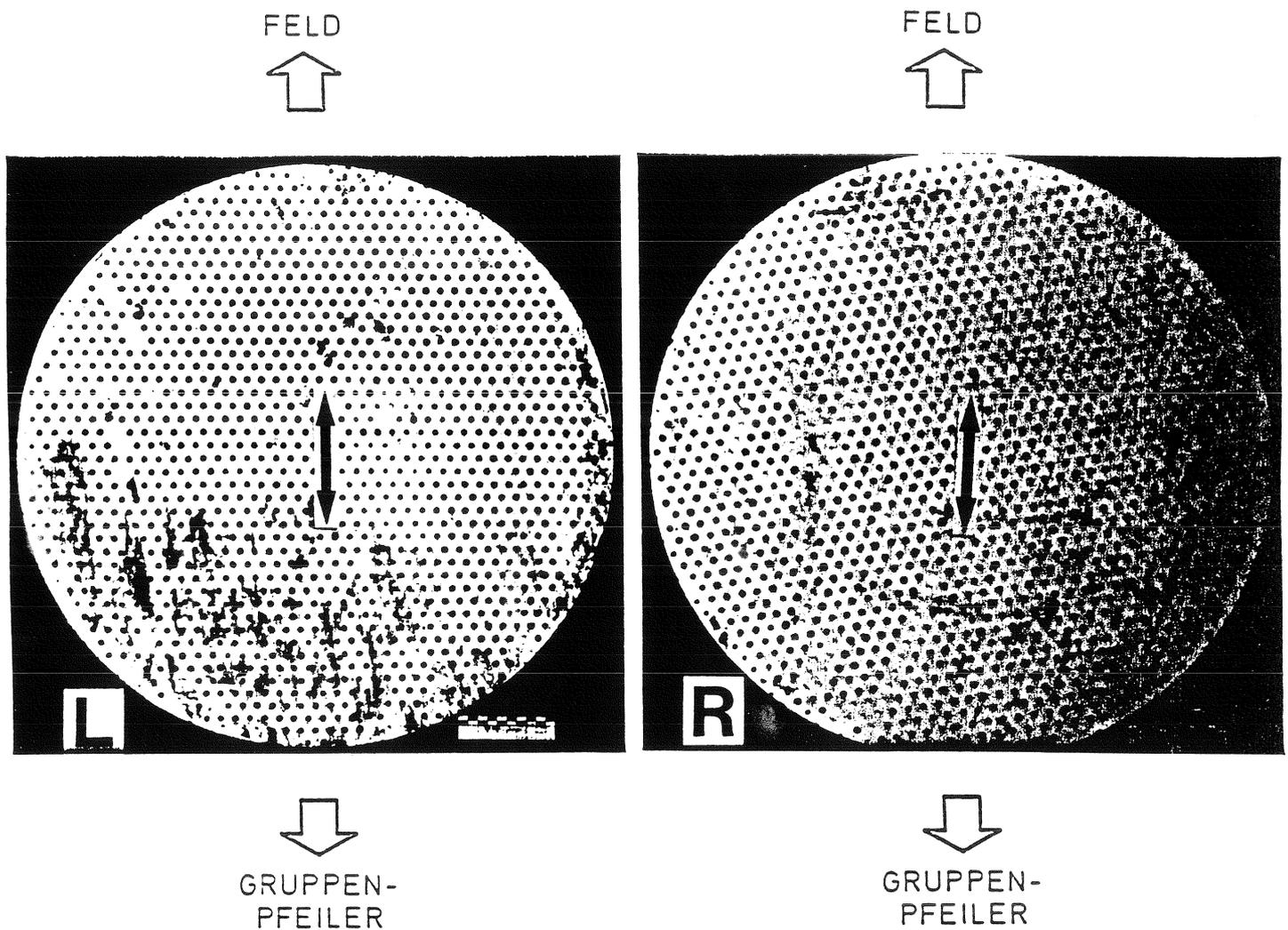


Bild 44: Zustand der PTFE-Scheiben nach dem Lagerausbau;
Linkes Lager (L) und Rechtes Lager (R)

Unverschmutzter, sauberer Schmierstoff wurde an keiner Stelle der Lager vorgefunden. Der Schmierstoff in den Speichern war schwarz pastös bis körnig. Über größere Oberflächenbereiche ist analog zu den POM-Gleitplatten eine dünne gelbliche Schicht vorzufinden, die vermutlich aus Schmierstoff mit pastöser Konsistenz resultiert.

Insbesondere am linken Lager sind ausgeprägte Schmutzeinlagerungen an den Randbereichen bis rd. 5 cm in die Gleitfläche des PTFE eingetragen. Am rechten Lager wurde rd. 20 cm vom Scheibenrand entfernt eine Verunreinigung vorgefunden, die vornehmlich aus dem Lagereinbau (bzw. -zusammenbau) her-rühren könnte (Bild 45).

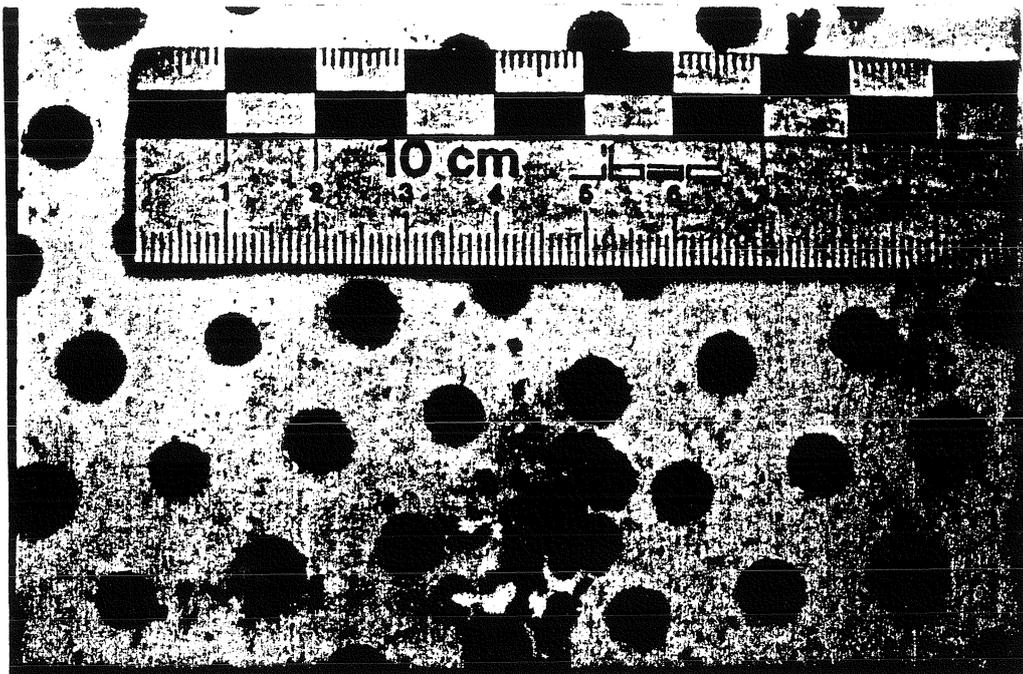


Bild 45: Verschmutzung im Innern der PTFE-Scheibe; rechtes Lager

Über größere Bereiche wurden an beiden PTFE-Scheiben leere Schmierstoff-speicher vorgefunden. Nachträglich läßt sich nicht eindeutig klären, ob eine unzureichende Schmierstoffmenge und -verteilung beim Lagerzusammenbau vorlag oder ob das Fett bei zunehmender Viskosität aus den Speichern her-austransportiert und/oder im Gleitspalt großflächig verteilt wurde. Die Zu-ordnung der an den zugehörigen Oberflächen (POM und PTFE) haftenden Fettbe-reiche gibt jedoch einen Hinweis darauf, daß vermutlich das Fett aus den Schmiertaschen herausgelöst wurde. Im Innern der leeren Schmiertaschen wer-den zudem Reste von relativ zähem und fettartigem (d. h. nicht am tribolo-gischen Prozeß beteiligtem) Schmierstoff vorgefunden (Bild 46). Die am her-austransportieren Fett vorgefundenen ganzen Fettspeicher (Bild 39) stützen die Annahme, daß bei vermutlich oszillierenden Lagerverschiebungen der pa-

stöße Schmierstoff an der Gleitplatte haften und bei Gleitbeginn herausgerissen wird.

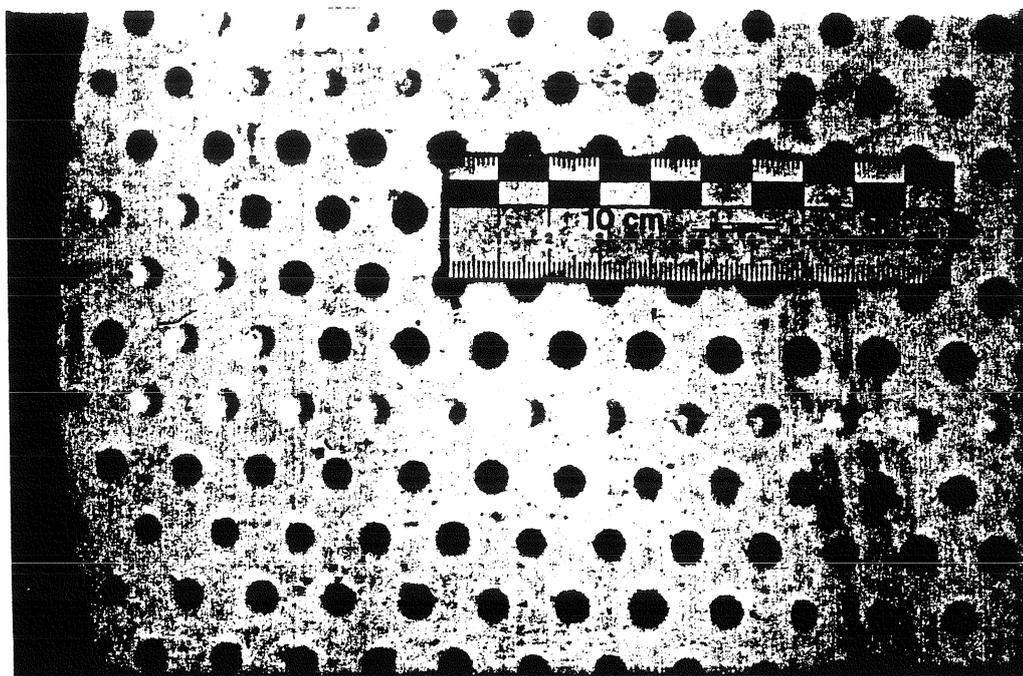


Bild 46: Leere Schmierstoffspeicher; rechtes Lager

Die PTFE-Führungsleisten des einseitig verschiebbaren rechten Lagers weisen sehr starke Verschmutzungs- und Verschleißerscheinungen auf. Nach Augenschein war keinerlei Schmierstoff mehr vorhanden, die Schmierstoffspeicher waren teilweise kaum noch erkennbar (Bild 47).

7.2.2 Ausgewählte Rauhtiefenprofile

Aufgrund der beengten Reibungsflächen innerhalb der Schmierstoffspeicher-Anordnung wurde für die Aufnahme der Rauheitsprofile eine Taststrecke $l_t = 4,8 \text{ mm}$ (Grenzwellenlänge $l_c = 0,8 \text{ mm}$) gewählt. Vor den Messungen wurden die Meßorte mit einem Lösemittel vorsichtig gereinigt. Die Meßorte sind schematisch in Bild 48 dargestellt, je Meßort wurde ein Rauheitstiefenprofil in Gleitrichtung und orthogonal dazu aufgenommen.

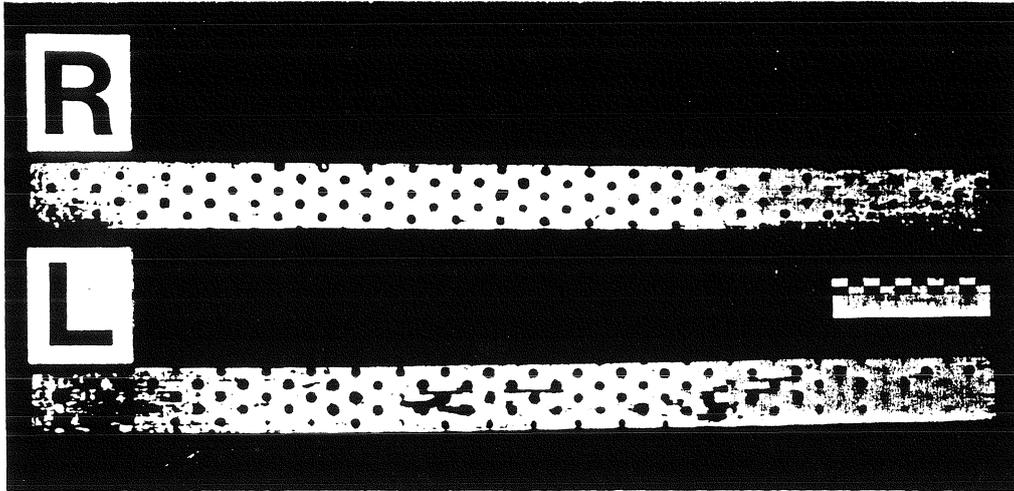


Bild 47: Zustand der PTFE-Führungsleisten nach dem Lagerausbau;
 rechtes Lager
 Rechte Führungsleiste (R) und Linke Führungsleiste (L)

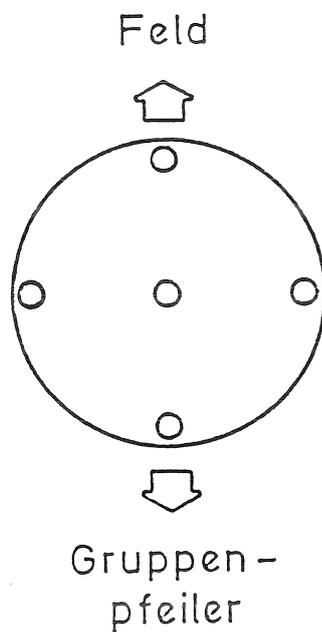


Bild 48: Meßorte zur Bestimmung der Rauhtiefenprofile an den PTFE-Scheiben;
 Prinzipdarstellung

Exemplarisch für die Oberflächentextur der PTFE-Gleitscheiben nach langer Betriebsdauer sind in Bild 49 die Rauhtiefenprofile des rechten Lagers im Zentrum der Scheibe sowie am linken Rand (bezogen auf den Einbauzustand) dargestellt.

In Gleitplattenmitte ist die maximale Rauhtiefe vermutlich infolge von Materialabtrag der Profilkuppen und gleichzeitigem Materialauftrag in die Profiltäler deutlich zurückgegangen, sie beträgt im Mittel rd. $2,5 \mu\text{m}$. Ein Einfluß der Gleitrichtung auf die Rauhtiefenprofile ist nicht erkennbar.

Am Rand der Gleitscheibe sind die maximalen Rauhtiefen in Gleitrichtung etwas größer als im Zentrum der Scheibe. Eine signifikante Änderung in der Oberflächentextur ist nicht erkennbar. Dagegen wird senkrecht zur Gleitrichtung das Rauhtiefenprofil von einer Welligkeit überlagert. Aus örtlichen Profilsitzen ergeben sich maximale Rauhtiefen von bis zu rd. $19 \mu\text{m}$.

7.2.3 Verschleißbetrag

Über die Dicke der PTFE-Scheiben im Einzelzustand liegen keine genauen Informationen vor (die Zulassung regelt eine geometrieabhängige Mindestdicke, hier $t \geq 4,5 \text{ mm}$). Die Mindestspalthöhe soll $(2,0 \pm 0,2) \text{ mm}$ im unbelasteten Zustand betragen.

Beim Belastungsvorgang werden elastische und plastische Materialverformungen im PTFE mit Fließvorgängen im Gleitspalt überlagert, die nach relativ kurzer Zeit durch eine Wulstbildung (Kaltfluß) zum Stillstand gelangen. Aus Versuchen an Modell-Lagern kann pressungsabhängig eine Dickenabnahme aus dem Belastungsvorgang von $\geq 200 \mu\text{m}$ angenommen werden. Nach einer Entlastung relaxiert das PTFE innerhalb enger Grenzen.

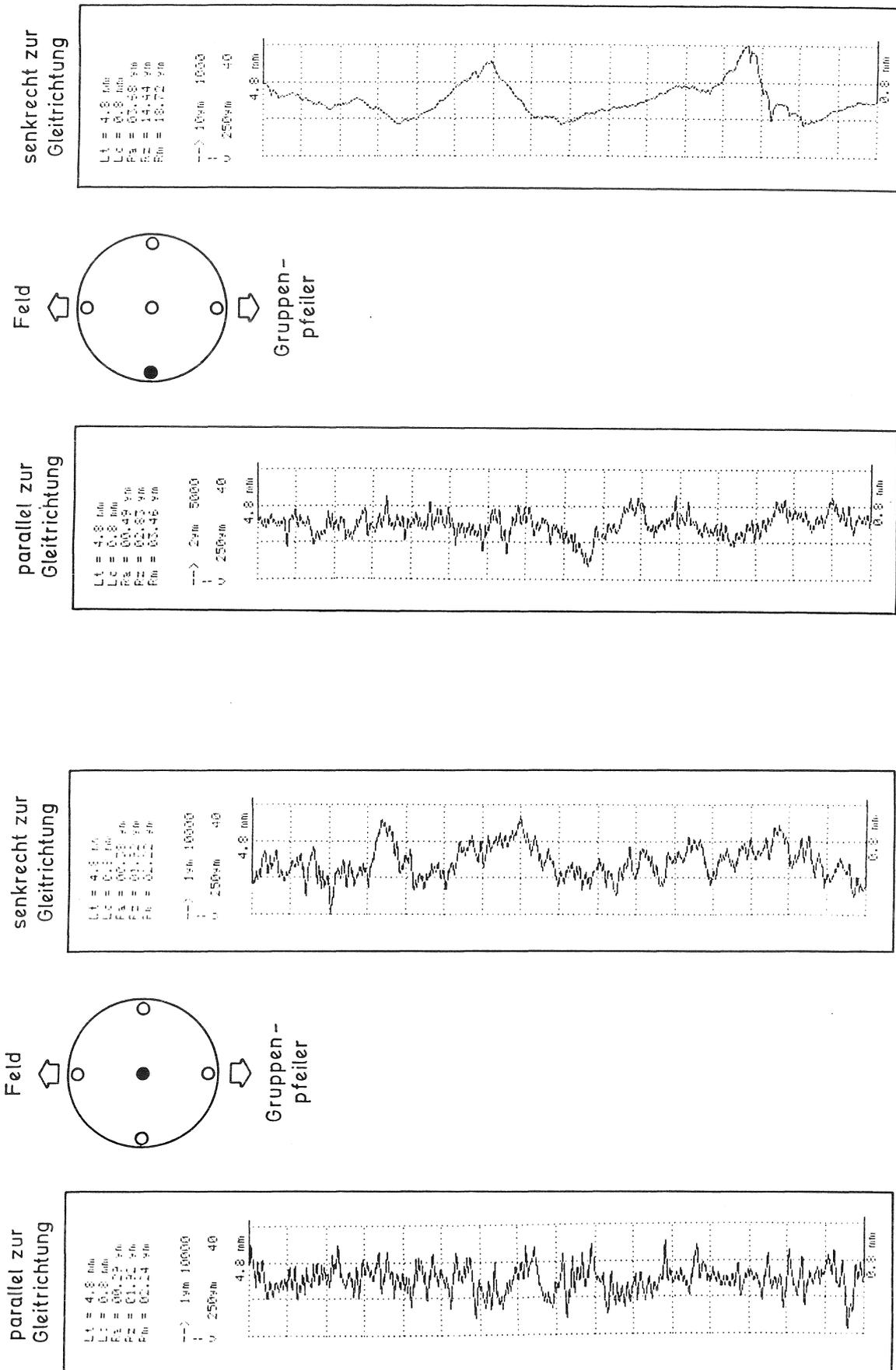


Bild 49: Rauhtiefenprofile an der PTFE-Scheibe des rechten Lagers
Im Zentrum der Scheibe/am rechten Rand

Zur Angabe eines von der Lagerachse abhängigen Verschleißbetrags wird von dem vorhandenen Durchmesser der Schmiertaschen auf die stattgefundene Dickenabnahme geschlossen. Um Einflüsse aus plastischen Verformungen auf die Meßgröße weitgehend auszuschließen, werden zur Ermittlung des Verschleißbetrags nur solche Schmiertaschen ausgewählt, die

- scharfkantige Schmiertaschen-Ränder
- kreisrunde Kontur

aufwiesen. Die Geometrie der Schmiertaschen im unbelasteten Zustand wird aus der Zulassung angenommen.

In Bild 50 ist das Profil des Verschleißbetrags über den Durchmesser der PTFE-Scheibe des linken Lagers in Gleitrichtung und orthogonal dazu dargestellt. Der niedrigste Verschleißbetrag wird im Zentrum der Scheibe mit rd. 350 μm registriert. Rund 10 mm vom Rand entfernt beträgt der Verschleißbetrag in Gleitrichtung rd. 1200 μm , senkrecht zur Gleitrichtung zwischen 800 μm und 900 μm . Der Verschleißbetrag ist über die Gleitfläche nicht konstant, er schwankt, abgesehen von der Randzone, zwischen rd. 500 μm und 1000 μm .

8 DISKUSSION

8.1 Einflüsse auf die Lagerverschiebungen

Differenzierte Betrachtungen des Lagersummenwegs nach Tageszeit und Tageszeit-Intervallen zeigen, daß der stündliche Lagersummenweg aus lokalen Verkehrseinflüssen (z. B. rush-hour), aber auch regionalen Gegebenheiten (Pendler-Verkehr), nennenswert beeinflusst wird. Tageszeitliche Minima, wie z. B. an Sonntagen um die Mittagsstunden oder an Werktagen in den Mitternachtsstunden, geben Hinweis darauf, daß der Überbau nicht in einen Ruhezustand übergeht. Bis zu 30 % der registrierten Lagersummenwege können auf das Eigenschwingverhalten (bzw. Anregungen des Bauwerks, die nicht aus Verkehrsbeanspruchung resultieren) zurückgeführt werden.

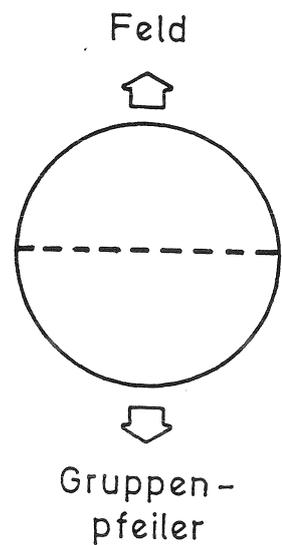
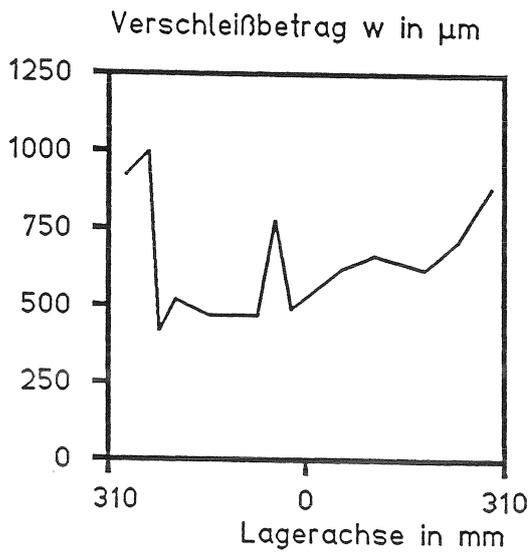
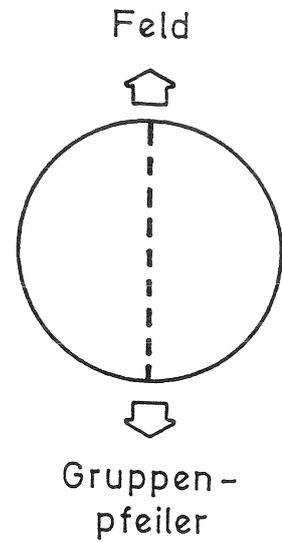
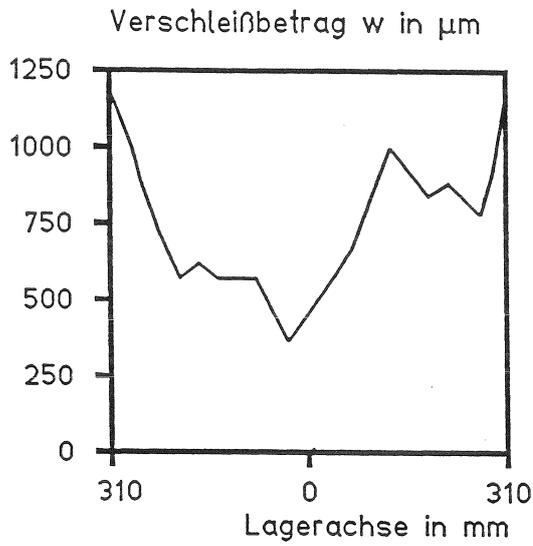


Bild 50: Verschleißbetrag w parallel und senkrecht zur Gleitrichtung; linkes Lager

Über längere Zeiträume werden jedoch die tageszeitlichen Einflüsse durch stochastische Ereignisse überlagert, so daß statistische Auswertungen keine trennscharfen Differenzierungen liefern.

Der tägliche Lagersummenweg ist innerhalb ausgewählter Zeiträume mit diskreten Einflüssen korrelierbar, insgesamt unterliegt er jedoch stochastischen Ereignissen. Der Streubereich einzelner Kalendertage ist relativ groß, zudem können offensichtlich an den betrachteten Lagern temporär differierende Reibungszustände unterstellt werden.

Aufgrund der permanenten Bauwerksdynamik (vgl. Abschn. 8.1.1.1) werden wochentägliche Abhängigkeiten überwiegend ausgeglichen. Tendenziell bestätigen sich jedoch erwartbare Unterschiede zwischen Werktagen und dem Wochenende. Innerhalb der Werktage ergeben sich aus den städtischen Verkehrsflüssen an Montagen und Freitagen relative Maxima. Über den Meßzeitraum werden jedoch solche Abhängigkeiten von zufallsbedingten Einflüssen nennenswert überlagert.

Auch über größere Zeitintervalle scheint eine differenzierte statistische Bearbeitung des täglichen Lagersummenwegs von zeitlichen Abhängigkeiten nicht möglich. Tendenzielle Abhängigkeiten des Lagersummenwegs von der Jahreszeit (jährliches Maximum im Herbst, jährliches Minimum im Sommer) geben Hinweise auf das temperaturabhängige Reibungsverhalten solcher Gleitlager; die vorliegenden Meßdaten scheinen jedoch nicht zur Ableitung korrelierender Abhängigkeiten ausreichend.

Aus Messungen anderer forschender Stellen (König-Karls-Brücke, Stuttgart /10/; Rheinbrücke Köln-Deutz, Köln /22/) werden potentielle Abhängigkeiten der Lagerbewegungen von der Verkehrsbeanspruchung (Verkehrsart, -stärke, -dichte) abgeleitet. Die verwendete Meßtechnik scheint jedoch nicht geeignet, dynamische Systemeigenschaften des Überbaus zu erfassen. In situ-Messungen des ibac an einer Spannbetonbrücke /5/ unter laufendem Verkehr mit einer analogen Meßeinrichtung, wie sie an der Grunewaldbrücke zum Einsatz gelangte, lassen dort ebenfalls keine zeitabhängigen Einflüsse auf die Lagerbewegungen erkennen. Neben der nahezu permanenten Verkehrsbeanspruchung werden auch an der Brohltalbrücke Verschiebungen aus dynamischen Überbauanregungen zu maßgeblichen Anteilen dem Lagersummenweg zugewiesen.

Bereits aus den Vorversuchen geht hervor, daß sich bei einer Meßeinrichtung mit ausreichend hoher Genauigkeit die Lagerverschiebungen (Oberschwingungen) infolge PKW- und LKW-Verkehr in Amplitude und Frequenz unwesentlich unterscheiden. Zudem muß davon ausgegangen werden, daß ein Brückenbauwerk durch Verkehr, Wind und Mikroseismik in seiner Systemeigenfrequenz angeregt wird /39/.

Als wesentliche Einflußparameter für den täglichen Lagersummenweg können zum einen dynamische Anregungen des Überbaus (Eigenschwingformen) sowie zufällige Verkehrsströme genannt werden, wobei die Verkehrsbeanspruchung die Systemanregung wesentlich beeinflusst. Bei der Verkehrsbeanspruchung sind das Verkehrsaufkommen sowie die Verkehrslastkollektive (LKW-LKW, LKW-PKW) von Bedeutung. Die komplexe Wechselwirkung zwischen dynamischer Verkehrsband-Beanspruchung und der Systemantwort des Überbaus sind im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht zu beschreiben. Hinweise werden von Forschungsvorhaben anderer Forscher erwartet /z. B. 40/.

8.2 Temperatur

Die aus der Literatur gewonnenen Angaben zur Größenordnung temperaturinduzierter Lagerverschiebungen reichen von 5 m/a bis 28 m/a. Unter ungünstigen Randbedingungen kann aus den Temperaurmessungen ein rechnerischer jährlicher Lagersummenweg infolge Temperatur von rd. 100 m extrapoliert werden. Gemessen am gesamten jährlichen Lagersummenweg (rd. 5000 m) sind dies maximal rd. 2 %. Vergleichbare Auswertungen gemessener Lagerverschiebungen infolge Temperatur an einer Spannbetonbrücke (Brohltalbrücke /5/) liefern hier einen Anteil von rd. 0,3 %. Allgemein kann der aus Temperatureinflüssen resultierende Lagersummenweg als verschleißinduzierende Größe vernachlässigt werden.

Vielfach wird in der Literatur die Auffassung vertreten, daß temperaturinduzierte Lagerverschiebungen gleichmäßig und mit geringer Gleitgeschwindigkeit erfolgen /6, 8/. Nichtlineare Temperaturgradienten am Überbau führen jedoch zu nicht unerheblichen Verformungen /22/. Hieraus resultieren auch Lastumlagerungen und Zwängungen in den Lagern, die als eine maßgebliche Ursache für die stick-slip-Verschiebungen angenommen werden können. Allgemein

werden in der Literatur derartige stick-slip-Effekte als verschleißfördernd angesehen, inwieweit dies auf den Sonderfall translatorisch wirkender Brückengleitlager zutrifft, und in welcher Höhe die technologischen Reibungszahlen hiervon beeinflußt werden, ist versuchstechnisch derzeit nicht nachgewiesen.

In der Brücken-Gleitlagertechnologie sind die vorrangig interessierenden Reibungszahlen (Anfahrreibungszahlen) innerhalb eines Temperaturbereiches von -35 °C bis $+21\text{ °C}$ anhand von Modell-Lager-Versuchen nachgewiesen /1, 2/. Kurzfristige klimabedingte Überschreitungen des Temperaturspektrums werden als unbedenklich angesehen /2/. Tiefe Temperaturen beeinflussen nachteilig die technologischen Schmierstoff-Eigenschaften, während höhere Temperaturen auf die Werkstoffeigenschaften des PTFE Einfluß nehmen.

Bei $+19\text{ °C}$ unter atmosphärischem Druck erfolgt eine kristalline Umwandlung der PTFE-Moleküle, die Umwandlung ist mit einer Volumenzunahme verbunden. Ausgehend von Modell-Reibungsversuchen wird die Vermutung geäußert, daß reversible Umwandlungen zu Rissen parallel der Molekülketten-Orientierung führen, die die Delaminierung einzelner Molekülketten begünstigen /41/.

An der Stahlbrücke Grunewald ist temporär mit dem Überschreiten der Lager (PTFE-)Temperatur von $+21\text{ °C}$ zu rechnen. Zudem führen die Reibungsvorgänge zur Temperaturerhöhung in der Reibfläche. Dies gilt insbesondere für den Übergang von der Misch- zur Trockenreibung. Die vorgefundenen Schmierstoff-Verhältnisse nach dem Lagerausbau lassen überwiegend Trockenreibung bzw. "Festschmierstoffverhältnisse" vermuten, die eine erhöhte Reibflächentemperatur erwarten lassen.

Systematische experimentelle Ergebnisse zur Reibungscharakteristik (Reibungszahlen, Verschleiß) im Temperaturbereich oberhalb $+21\text{ °C}$ liegen für Brückengleitlager derzeit nicht vor.

8.3 Lagerverschiebungen

Zum Zeitpunkt der Initiierung dieses Forschungsvorhabens war den Fachleuten bewußt, daß die Kenntnisse über das komplexe Tribosystem "Gleitlager in einer Brücke" und dessen synergetisches Beanspruchungskollektiv nicht ausreichen, um die erwartbare Betriebsdauer auf der Grundlage der Zulassungsversuchsergebnisse einigermaßen zielgenau abzuschätzen.

Die Frage des tatsächlich bei unterschiedlichen Brücken auftretenden Beanspruchungskollektivs und der zugehörigen Tribomechanismen in Gleitlagern wurde bis zu diesem Zeitpunkt, insbesondere wegen mangelder meßtechnischer Möglichkeiten, nicht angegangen, da aufgrund der dynamischen Beanspruchung durch Wind und Verkehr mit extrem kleinen und schnellen Bewegungseinheiten gerechnet werden mußte. Prinzipiell geeignete Meßgeräte und schnelle Datenverarbeitung stehen erst seit wenigen Jahren zur Verfügung. Zum Einsatz unter Brückenbedingungen mußten die erforderlichen Geräte speziell für dieses Vorhaben in Zusammenarbeit mit der Industrie konzipiert und erprobt werden.

Folgerichtig wurde der höchstmögliche realisierbare Stand der Meß- und Datentechnik unter Beachtung der Dauerhaftigkeit unter Bauwerksbedingungen und vertretbarer Kosten angestrebt. Wider Erwarten wurde die Mehrzahl der Lagerverschiebungen als viele kleinste Bewegungen registriert, deren Größenordnung nicht als elastische Verformungen des polymeren Gleitwerkstoffs (PTFE) ausgeschlossen werden kann. Zur Formulierung erster tribotechnischer Aussagen über die Vorgänge in Gleitlagern wurden dessen ungeachtet zunächst alle meßtechnisch erfaßbaren Ereignisse in dem vorliegenden Bericht als Lagerverschiebungen zusammengefaßt. Welche Mechanismen im Lager aus solchen Bewegungen (Gleiten, elastische Verformung) resultieren, kann im Rahmen dieser Untersuchungen nicht geklärt werden.

Die Ergebnisse beinhalten demzufolge alle Bewegungen zwischen Lagerober- und -unterteil infolge wirklicher Relativbewegung und elastischer Verformungen des Polymeren und der Schmierstoffschicht. Die Größenordnung der "Grenzbewegung" am Übergang zur Gleitbewegung - vermutlich für den Verschleiß bedeutsam wegen der Abschereffekte zwischen Polymerketten und der Aktivierung des Schmiermittels - kann (bedingt durch die Konzeption dieses Forschungsvorhabens) zur Zeit nicht definiert werden. Absolute Angaben,

z. B. über den jährlichen Lagersummenweg eines Gleitlagers, sind zwar von technisch-wissenschaftlichem Interesse, bedürfen für Aussagen hinsichtlich der zu erwartenden Lagerdauerhaftigkeit jedoch der Differenzierung bezüglich der unterschiedlichen Tribomechanismen. Entsprechende Forschungsvorhaben sind beantragt.

8.4 Gleitgeschwindigkeiten

Der Mittelwert der registrierten Gleitgeschwindigkeiten beträgt, abhängig von der Lagersituation, zwischen rd. 0,6 mm/s und rd. 1,2 m/s. Vergleichbare Messungen an der Spannbetonbrücke lieferten eine mittlere Gleitgeschwindigkeit von rd. 0,2 mm/s und an der Verbundbrücke rd. 0,5 mm/s /5/. Die maximale Gleitgeschwindigkeit betrug für die

- Stahlbrücke $v_{\max} = 120 \text{ mm/s}$
- Verbundbrücke $v_{\max} = 70 \text{ mm/s}$
- Spannbetonbrücke $v_{\max} = 11 \text{ mm/s}$.

Bild 51 illustriert, daß die im Rahmen des im ibac verfolgten Forschungsprojektes gemessenen Gleitgeschwindigkeiten

- an der hier diskutierten Stahlbrücke und an der Verbundbrücke zu überwiegenden Anteilen deutlich größer als die der Güteüberwachung zugrundeliegenden 0,4 mm/s und auch der im Rahmen von Dauergleitreibungsversuchen beaufschlagten 2 mm/s sind,
- an der Spannbetonbrücke /5/ die mittlere Gleitgeschwindigkeit deutlich unter 0,4 mm/s liegt.

Einschränkend muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß diesen Angaben der spezifische Auswertalgorithmus (vgl. Bild 15) mit entsprechend hoher Meßgenauigkeit zugrundeliegt. Es kann davon ausgegangen werden, daß eine größere Meßgenauigkeit zu

- einer geringeren Anzahl von Einzelverschiebungen
- größeren Einzelverschiebungen mit längerer Verschiebedauer

- höheren maximalen Gleitgeschwindigkeiten
 - ggf. geringeren mittleren Gleitgeschwindigkeiten
- führen würde.

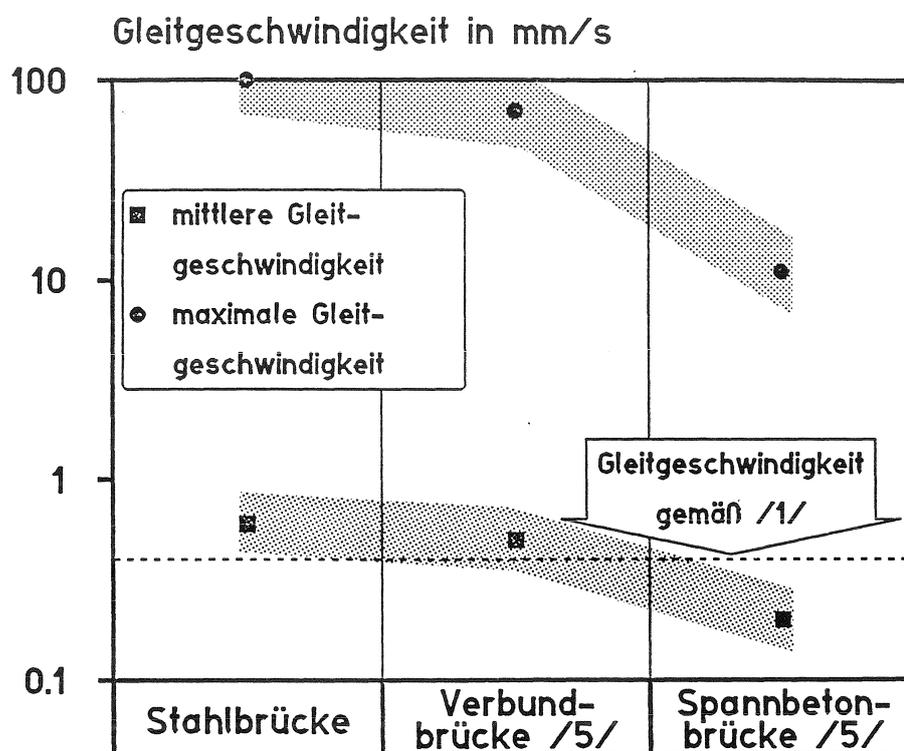


Bild 51: Mittlere und maximale Gleitgeschwindigkeit an ausgewählten Brücken-Gleitlagern

8.5 Auflagerdrehwinkel und Winkelgeschwindigkeiten

Über den Einfluß von Rotationsbewegungen auf die Reibungszahlen und den Verschleiß liegen derzeit keine Erkenntnisse vor. Die Auflagerdrehwinkel infolge Verkehrsbeanspruchung treten im Mittel in einer Größenordnung von rd. $\text{tg } \gamma = 5 \cdot 10^{-6}$, bei einer Winkelgeschwindigkeit von $4 \cdot 10^{-10}/\text{s}$ und einer Frequenz von rd. 1,7 Hz auf. Aus Versuchen an ganzen Lagern /8/ ist bekannt, daß dynamische Vertikalbelastung zu einer Erhöhung der Reibungszahlen führen kann. Inwieweit solche Effekte auf dynamische Rotationsbewegungen übertragen werden müssen, bedarf weiterer Forschungsaktivitäten. Zudem muß geklärt werden, ob diese kleinen und hochfrequenten Rotationsbewegungen zu elastischen Verformungen im PTFE führen (Kantenpressung). Wel-

chen Einfluß diese Lagerbewegungen auf den Schmiermitteltransport ausüben ist derzeit ebenfalls unbekannt.

9 BAUPRAKTISCHE SCHLUSSFOLGERUNGEN

Aus den derzeit vorliegenden Erkenntnissen über das Beanspruchungskollektiv von Brückengleitlagern bei Stahlbrücken vom Typ der Grunewaldbrücke kann zunächst für eine anzustrebende Betriebsdauer von 20 Jahren ein Lagersummenweg von 100 km angenommen werden. Versuchstechnisch ungeklärt ist jedoch die Frage, in welcher Größenordnung elastische Verformungen des PTFE innerhalb der sehr kleinen Verschiebungen von den vorliegenden aufsummierten Meßergebnissen abzuziehen sind. Eine nicht unerhebliche Reduktion des Lagersummenwegs wäre nicht auszuschließen. Derzeit liegen Erfahrungen aus Laborversuchen an Modell-Lagern über einen aufsummierten Gleitweg von rd. 20 km vor. Hierbei wurden vereinfachte Prüfparameter zugrundegelegt, die von den tatsächlich auftretenden beträchtlich abweichen.

Die vorliegenden Versuchsergebnisse zeigen, daß das reale Beanspruchungskollektiv in Brückengleitlagern kaum mit dem aus den Zulassungsversuchen vergleichbar ist. Die Translationsbewegungen erfolgen als eine Vielzahl kleiner Lagerverschiebungen, wobei über mehr oder weniger lange Zeitabschnitte Oszillieren mit stochastisch verteilten Amplituden angenommen werden kann. Verschiebungen der Mittellage erfolgen innerhalb vergleichsweise starker dynamischer Anregung. Über den Nachschmierreffekt und die Fettransportvorgänge infolge dieser Verschiebungsbeanspruchungen (insbesondere Oszillieren) liegen bisher keine Erkenntnisse vor.

Den in /1/ und in den bauaufsichtlichen Zulassungen angegebenen Reibungszahlen, die für die statische Berechnung der Lager und der angrenzenden Bauteile herangezogen werden /14/, liegen unter anderem die konstanten Prüfparameter

- mittlerer Pressung
 - Lagerverschiebung
 - Gleitgeschwindigkeit
 - Belastungsdauer vor Beginn des Reibungsvorgangs
- zugrunde.

Die Mehrzahl der gemessenen Einzel-Verschiebungen ist jedoch um etwa 3 Größenordnungen kleiner, während die realen Gleitgeschwindigkeiten im Mittel um das 1,5fache größer (der Maximalwert ist um das 250fache größer) gegenüber den Zulassungsversuchen sind. Eine wirkliche Ruhephase kann dagegen am Bauwerk nicht angenommen werden. Im weitaus überwiegenden Zeitraum finden in komplexer Überlagerung von sinusähnlichen Schwingungen beschleunigende und verzögernde Bewegungsabläufe statt. Eine Übertragung der labortechnisch im Rahmen von Zulassungsversuchen gewonnenen Reibungszahlen auf die realen Reibungszahlen im Bauwerk ist daher zur Zeit nicht möglich. Auf jeden Fall müßten dynamische Effekte /40/ Berücksichtigung finden. Vor allem besteht Grund zu der Vermutung, daß dynamische Vertikalbelastungen und Rotationsbeanspruchungen zu einer Erhöhung der Reibungszahlen und damit der Verschleißrate führen können /9/. Möglicherweise positiv wirkende Einflüsse dieser Effekte auf den Schmierstofftransport sind derzeit ebenfalls unbekannt.

Für die Abschätzung des Verschleißverhaltens von Gleitlagern im praktischen Einsatz ist die Frage von wesentlichem Interesse, von welchen Verschiebewegen zwischen Lageroberteil und -unterteil an elastische Verformungen des PTFE und der Schmierstoffschicht in eine Gleitbewegung übergehen. Insbesondere bei oszillierenden Verschiebungen mit kleiner Amplitude, wie sie an den Brücken Brohltal, Eifeltor und Grunewald gemessen wurden, würden elastische Verformungen den Lagersummenweg (aufsummierter Gleitweg) erheblich reduzieren. Hierbei müßte jedoch berücksichtigt werden, ob und inwieweit elastische Verformungen oder der Übergang von elastischen Verformungen zum Gleiten zu einem Schwingungsverschleiß ("Radiergummieffekt") führen. Die in Modell-Lager-Versuchen beobachteten Verschleißerscheinungsformen des PTFE (Übertragung eines PTFE-Films auf das Gleitblech bzw. Relativbewegungen von Moleküleinheiten innerhalb des Gleitwerkstoffs /6, 8/) können unter Umständen als Ursache für tribochemische Reaktionen und Adhäsionsphänomene (bei Vorhandensein eines PTFE-Films) sowie Oberflächenzerrüttung in PTFE bei oszillierender Beanspruchung nicht ausgeschlossen werden.

Pauschal zusammenfassend kann als baupraktisch relevantes Resultat der Forschungsarbeit festgestellt werden:

- a) Temperaturbedingte Bewegungen des Überbaus spielen für die Lebensdauer eines Gleitlagers keine Rolle
- b) Schwingungsanteile aus dem Schwerlastverkehr sind vermutlich ohne Bedeutung
- c) Dynamische Brückenbewegungen (vermutlich vor allem Eigenschwingungen) verursachen einen wesentlichen Anteil an den gesamten Lagerbewegungen (translatorisch und rotatorisch)
- d) Die bisher üblichen Zulassungsversuche für Gleitlager erfassen die lebensdauerrelevanten Parameter nur sehr unvollkommen. Aus diesen Versuchen können keine gesicherten Angaben über temporäre Reibungszahlen oder die Betriebsdauer gewonnen werden.

10 ZUSAMMENFASSUNG

Die derzeitigen Kenntnisse über die Reibungs- und Verschleißmechanismen im "Tribosystem Brückengleitlager" erlauben keine gesicherten Aussagen über die zu erwartende Betriebsdauer eines Gleitlagers auf der Grundlage der derzeitigen Zulassungsversuche. Kenntnisse über die realen temporären Reibungszahlen und die temporäre Verschleißrate in Abhängigkeit vom Beanspruchungskollektiv sind von erheblichem baupraktischen Interesse:

- zur Optimierung von Lagerkonstruktionen
- zur Reduzierung von Lagerauswechslungen
- zur Optimierung der Wahl bestimmter Lagertypen

bei bestimmten Brückentypen.

Durch in situ-Messungen an einer Stahlbrücke (Grunewald) werden die wesentlichen Parameter des Beanspruchungskollektivs von Brückengleitlagern im praktischen Betrieb formuliert. Die Bauwerksuntersuchungen erlauben für die genannten Brückenbauwerke statistisch abgesicherte Daten über die

- Einzelverschiebungen und Auflagerdrehwinkel
- Gleit- und Winkelgeschwindigkeiten
- Lagerlasten in der Gleitebene.

Für die Durchführung der Meßaufgabe mußte eine spezielle Meßeinrichtung (Wegaufnehmersystem, Meßwerterfassung, Meßwertverarbeitung) konzipiert werden, um die zu erwartenden, sehr kleinen und hochfrequenten Lagerverschiebungen registrieren zu können. Gegenüber den Parametern der Zulassungsversuche ist für die Stahlbrücke

- die mittlere Lagerverschiebung um 3 Größenordnungen kleiner
- die mittlere Gleitgeschwindigkeit 1,5fach größer.

Der Lagersummenweg infolge Temperatur beträgt rd. 2 % des gesamten Lagersummenwegs.

Die Größe der Beanspruchungsparameter für Zulassungsversuche beruht vorrangig auf empirischen Annahmen und versuchstechnischen Randbedingungen, die mit dem realen tribologischen System nicht übereinstimmen. Zur Ermittlung von Reibungszahlen werden bei den Modell-Versuchen ausschließlich konstante Prüfparameter verwendet. Im Tribosystem Gleitlager wirken jedoch stochastisch verteilte, dynamische Translations-, Rotations- und Vertikalbeanspruchungen koinzident. Überwiegend oszillierende Bewegungen können angenommen werden.

Derzeit existieren jedoch keinerlei Anhaltspunkte über die Einflüsse derartiger Beanspruchungen auf die temporären Reibungszahlen, die Verschleißmechanismen und den temporären Verschleißbetrag, wodurch eine Angabe von realen Reibungszahlen im Bauwerk und der Betriebsdauer derzeit kaum möglich ist. Die in der Praxis zu beobachtenden, sehr unterschiedlichen Lagerlebensdauern finden hierin zumindest zu einem großen Anteil ihre Begründung. Modifizierte Zulassungsversuche unter Berücksichtigung der in diesem Forschungsbericht vorgestellten Versuchsergebnisse zur Klärung derartiger baupraktischer Fragestellungen sind wünschenswert.

11 LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Institut für Bautechnik: Bedingungen für die bauliche Durchbildung und Überwachung (Güteüberwachung) von PTFE-Gleitlagern. Institut für Bautechnik, Berlin, 1984

- /2/ E DIN 4141 Teil 12 06.89. Lager im Bauwesen - Gleitlager

- /3/ Standfuß, F.: Die Erhaltung von Straßenbrücken - Eine vordringliche Aufgabe der Straßenbauverwaltung. In: Beton- und Straßenbetonbau (1981), Nr. 11

- /4/ Hakenjos, V. et al.: Untersuchung des Reibungsverhaltens der Paarung PTFE weiß/austenitischer Stahl für Brücken-Gleitlager bei großen aufaddierten Gleitwegen in Abhängigkeit von der spezifischen Belastung. Staatliche Materialprüfanstalt, Stuttgart (MPA), Forschungsauftrag 15.084 R 79 G, 1981

- /5/ Breitbach, M. ; Fiebrich, M.; Müller-Rochholz, J.: Brückenbewegungen an Stahlbeton- und Spannbetonbrücken. Aachen : Institut für Bauforschung, 1987. Forschungsbericht Nr. F 195

- /6/ Uetz, H. ; Hakenjos, V.: Gleitreibungs- und Gleitverschleißversuche an Kunststoffen. In: Kunststoffe 69 (1969), Nr. 3

- /7/ Halach, G. ; VDI-Gesellschaft ; VDI: Gleitreibungs- und Gleitverschleißverhalten von Kunststoffen in Abhängigkeit von verschiedenen Einflußgrößen. Düsseldorf : VDI, 1975 - In: Belastungsgrenzen von Kunststoffbauteilen, S. 177-231

- /8/ Favre, R. ; Kropf, P.: Reibungsmessungen an Gleitlagern. Internationale Vereinigung für Brücken und Hochbau, Zürich, 1976

- /9/ Döpmeier, E. ; Schwamborn, B.: Ermittlung der vorhandenen Reibungszahlen bei PTFE-Gleitlagern nach langer Betriebsdauer. Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac), Forschungsvorhaben F 204, 1987

- /10/ Hakenjos, V. et al.: Untersuchung der Bewehrung von Brückenbauwerken infolge Temperatur und Verkehrsbelastung. Staatliche Materialprüfanstalt, Universität Stuttgart (MPA), Forschungsauftrag 15.065 R 78 G, 1983

- /11/ Sasse, H. R.: Gleit- und Vormungslager im Hoch- und Brückenbau. In: VDI-Berichte (1980), Nr. 384
- /12/ Craig, W. D.: PTFE Bearings for high Loads and Slow Oscillation. In: Lubrication Engineering, 04.1962
- /13/ Eggert, H. ; Grote, J. ; Kauschke, W.: Lager im Bauwesen, Bd. 1. Berlin : W. Ernst & Sohn, 1974
- /14/ DIN 1072 10.85. Straßen und Wegbrücken, Lastannahmen
- /15/ Siebke, H.: Über den Einfluß der Zeit auf die DB-Brückenbauwerke. In: beton 35 (1985), Nr. 12
- /16/ DIN 4141 Teil 1 09.84. Lager im Bauwesen - Allgemeine Regelungen
- /17/ Kehlbeck, F.: Einfluß der Sonnenstrahlung bei Brückenbauwerken. Düsseldorf : Werner Verlag, 1975
- /18/ Günther, G. H. ; Bild, St. ; Sedlacek, G.: Zur Frage der Haltbarkeit von Fahrbahnbelägen auf stählernen Straßenbrücken. In: Stahlbau (1985), Nr. 11
- /19/ Kirk, J. M.: Berechnung der Temperaturhöchstwerte im Asphalt. In: Bitumen (1985), Nr. 1
- /20/ Kappei, H.: Messungen von Bauwerkstemperaturen und Überbauverschiebungen an einem Brückenbauwerk. Auswirkungen auf das Traggerüst. In: Beton- und Stahlbetonbau 7 (1976)
- /21/ Stevenson, A. ; Price, A. R.: A Case Study of Elastomeric Bridge Bearings After 20 Years Service. American Concrete Institut, Detroit, 1986 (ACI SP-94, Vol. 1). In: Joints Sealing Bearing Systems for Concrete Structures
- /22/ Knabenschuh, H.: Messungen von Temperaturunterschieden an Betonbrücken, Wärmedehnungen des Überbaues der Rheinbrücke Köln-Deutz. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach, 01.1985, Fe 15.085 B 79 G

- /23/ Lebek, D. E.: Bridge Bearings. P. I. A. R. C. Technical Committee on Road Bridges, May 1985 (Vortrag, unveröffentlicht)

- /24/ Emerson, M.: Thermal Movements of Concrete Bridges: Field Measurements and Methods of Prediction. American Institute, Detroit, 1981 (ACI SP-70, Vol. 1). In: Joint Sealing and Bearing Systems for Concrete Structures

- /25/ Mortlack, I. D.: The Instrumentation of Bridges for the Measurement of Temperature and Movement. Crowthorne, Berkshire: Transport and Road Research Laboratory, 1984, TRRL Report 641

- /26/ Emerson, M.: Bridge Temperatures estimated from the Shade Temperature. Crowthorne, Berkshire: Transport and Road Research Laboratory, 1976, TRRL Report 696

- /27/ Shiu, K. N. ; Russel, H. G. ; Corley, W. G.: Long Term Movements of Concrete Bridges. American Concrete Institute, Detroit, 1986 (ACI SP-94, Vol. 1). In: Joint Sealing and Bearing Systems for Concrete Structures

- /28/ Emerson, M.: Extreme Values of Bridge Temperatures for Design Purposes. Crowthorne, Berkshire: Transport and Road Research Laboratory, 1976, TRRL Report 744

- /29/ Hantley-Smith, D. R. ; Kratz, R. ; Martin, I. D.: Slipping of PTFE Bearings on Long Bridges. In: The Civil Engineer in South Africa, 1981

- /30/ Knabenschuh, H. ; Eilers, M.: Messungen von Einflußparametern zur Ermittlung von Spannungen und Verformungen an Betonbrücken (Programm Brohltalbrücke), 1. Zwischenbericht. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach, 01.1986, FE 15.136 B 84 G

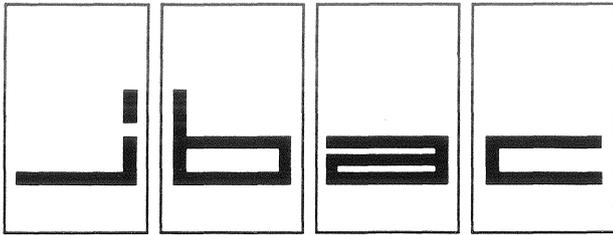
- /31/ Cantieni, R.: Dynamische Belastungsversuche an Straßenbrücken in der Schweiz, 60 Jahre Erfahrung der EMPA. Bericht Nr. 116/1, Juli 1983

- /32/ Price, W. I. J.: Transmission of Horizontal Forces and Movements by Bridge Bearing. American Concrete Institute, Detroit, 1981 (ACI SP-70, Vol. 2). In: Joint Sealings and Bearing Systems for Concrete Structures

- /33/ Moss, P. J. ; Carr, A. J. ; Pardoen, G. C.: The Vibrational Behaviour of Three Composite Beam -Slab Bridges. In: Engineering Structures, Vol. 4, 10.1982
- /34/ Ladda, V. ; Steinhilber, H.: Messung und statistische Beschreibung der Verkehrslasten einer Autobahn. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit (LBF), Darmstadt, FE 15.138 R 84 G
- /35/ Puche, M.: Absicherung eines Verkehrslastmodells durch Messungen von Spannglieddehnungen an der Brohltalbrücke. Institut für Massivbau der TH Darmstadt, Forschungsbericht Nr. 15.137 R 84 G, 12.1985
- /36/ Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung des Instituts für Bautechnik (IfBt), Berlin, vom 30.09.1972, Gesch.-Z.: I/2-1.16.2-1424
- /37/ Firma Fritz Kreuz, Erkrath: Lagerstatik für die Stahlbrücke Grunewald, LOS A, Teil V, Auftrag Nr. 74/120516, 1972
- /38/ Firma Novotechnik KG, Ostfildern: Leitplastik-Potentiometer-Wegaufnehmer, Typ LWH, 05.1985 (Firmenschrift)
- /39/ Luz, E.: Bestimmung von Bauwerksparametern und -zuständen mit Hilfe von Schwingungsmessungen unter stochastischer Anregung. In: Materialprüfung (1986), Nr. 6
- /40/ Sedlacek, G.: Verbesserung der Gebrauchseigenschaften von Brücken durch Mindeststeifigkeiten. Lehrstuhl für Stahlbau der RWTH Aachen, Forschungsvorhaben (unveröffentlicht)
- /41/ Karich, U. A. ; Hombogen, E.: Ursachen des Verschleißes von PTFE zwischen -4 und 23 °C. In: Kunststoffe 77 (1987), Nr. 3, S. 277-279
- /42/ DIN 50 281 10.77. Reibung in Lagerungen - Begriffe, Arten, Zustände, physikalische Größen
- /43/ DIN 50 281 10.79. Verschleiß - Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes
- /44/ DIN 50 321 10.79. Verschleiß - Meßgrößen

- /45/ DIN 53 375 09.86. Prüfung von Kunststoff-Folien; Bestimmung des Reibungsverhaltens
- /46/ DIN 1080 Teil 1 06.76. Begriffe, Formelzeichen und Einheiten im Bauingenieurwesen - Grundlagen
- /47/ DIN 55 350 Teil 11 05.87. Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik; Grundbegriffe

Aachen, 08.01.1990/Pj.-



INSTITUT FÜR BAUFORSCHUNG

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Direktoren: Professor Dr.-Ing. H. R. Sasse · Professor Dr.-Ing. P. Schießl

Schinkelstraße 3, D-5100 Aachen

Telefon (02 41) 80-5100 · Telex 832 704 thac d · Telefax (02 41) 80-5120

THEMA

Brückenbewegungen an
Stahlbrücken

ABSCHLUSSBERICHT

(Anhang)

Forschungsbericht Nr.

F 1 9 2

Projektleiter

Prof. Dr.-Ing. H. R. Sasse

Sachbearbeiter

Dipl.-Ing. M. Breitbach
Dr.-Ing. M. Fiebrich
Prof. Dr.-Ing. J. Müller-Rochholz
(FH Münster)

Auftraggeber/
Förderer

Institut für Bautechnik
Reichpietschufer 74-76

1000 Berlin 30

Auftragsdatum

06.04.1984

Aktenzeichen

IV/1-5-363

Dieser Bericht umfaßt **15** Seiten, davon — Textseiten.

Soweit Versuchsmaterial nicht verbraucht ist, wird es nach 4 Wochen vernichtet.

Eine längere Aufbewahrung bedarf einer schriftlichen Vereinbarung.

Die auszugsweise Veröffentlichung dieses Berichtes, seine Verwendung für Werbezwecke sowie die inhaltliche Übernahme in Literaturdatenbanken bedürfen der Genehmigung des ibac.

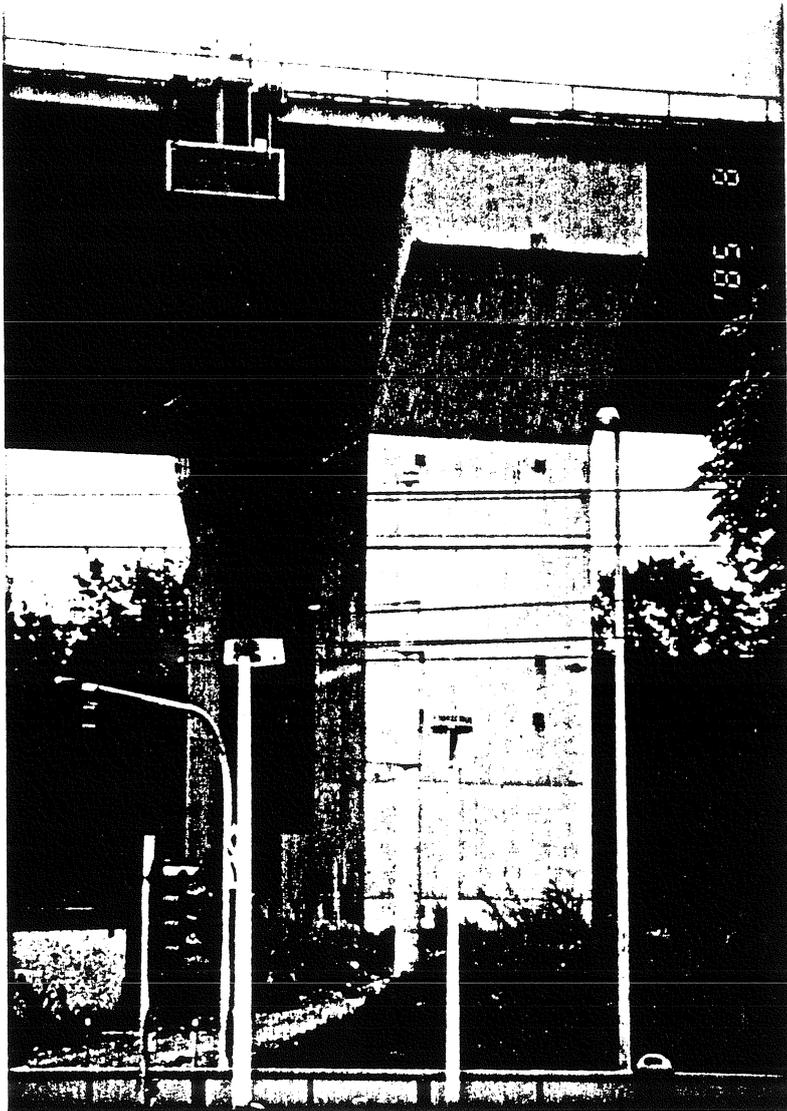


Bild A1: Gruppenpfeiler der Grunewaldbrücke

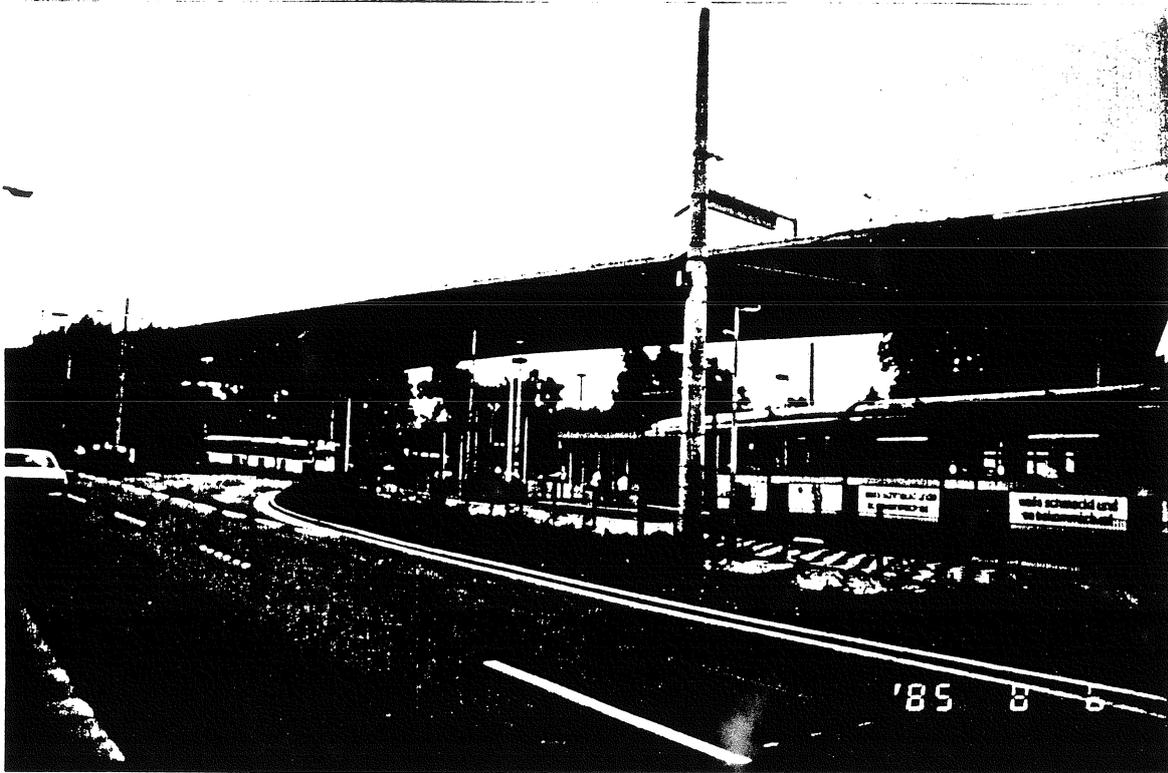


Bild A2: Endfeld mit Gruppenpfeiler

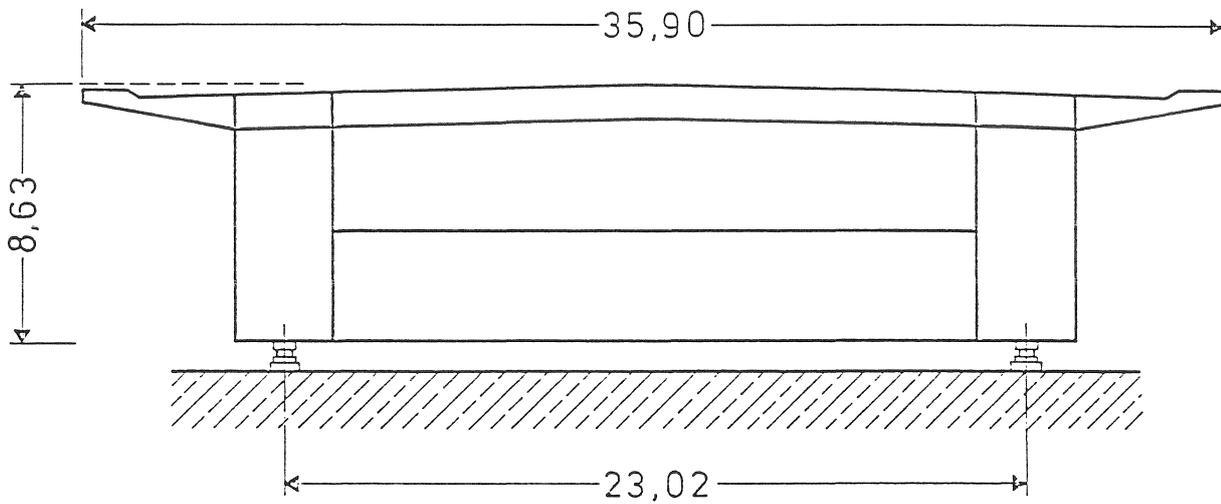


Bild A3: Stützquerschnitt der Grunewaldbrücke (Maße in mm)

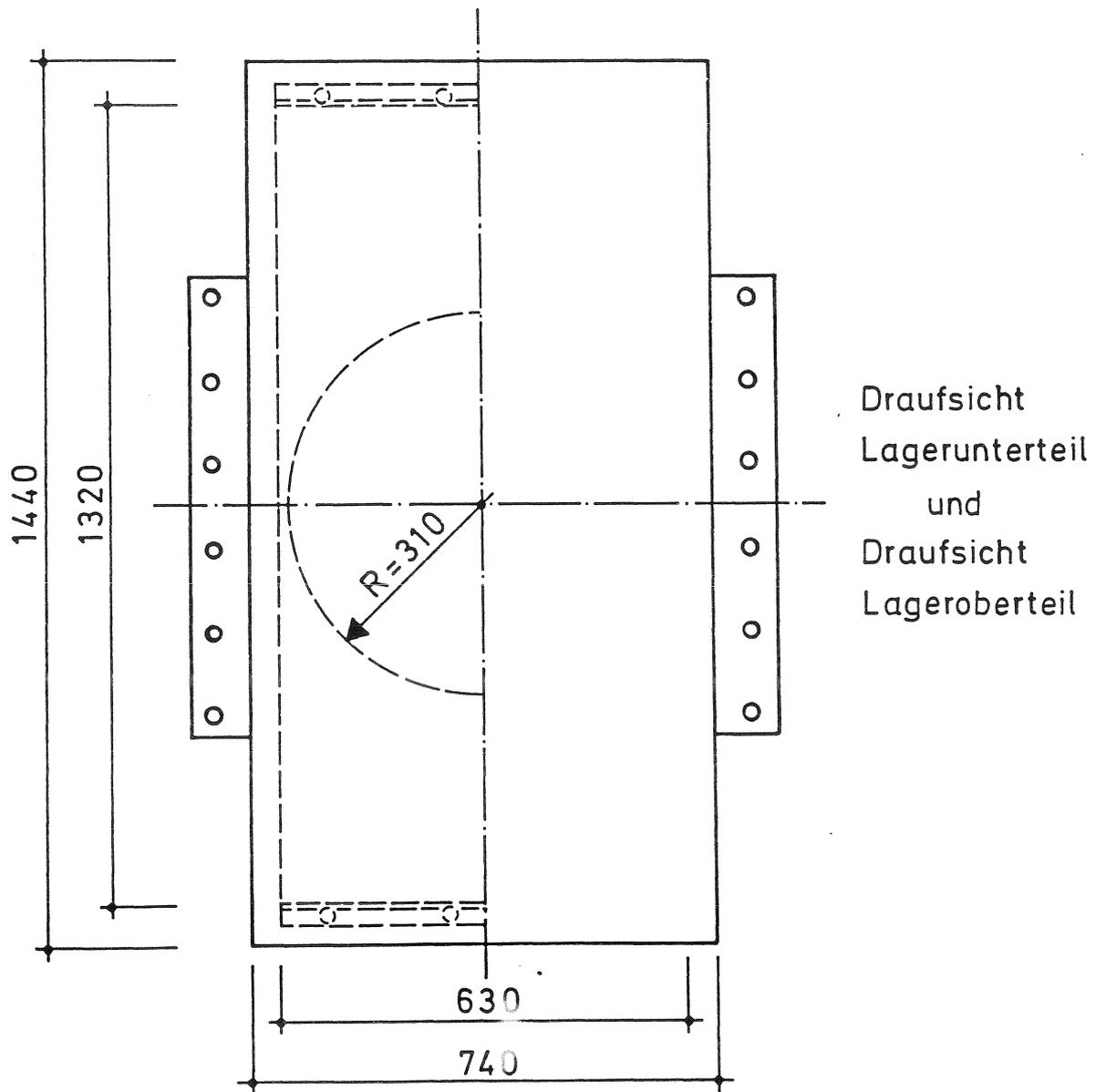
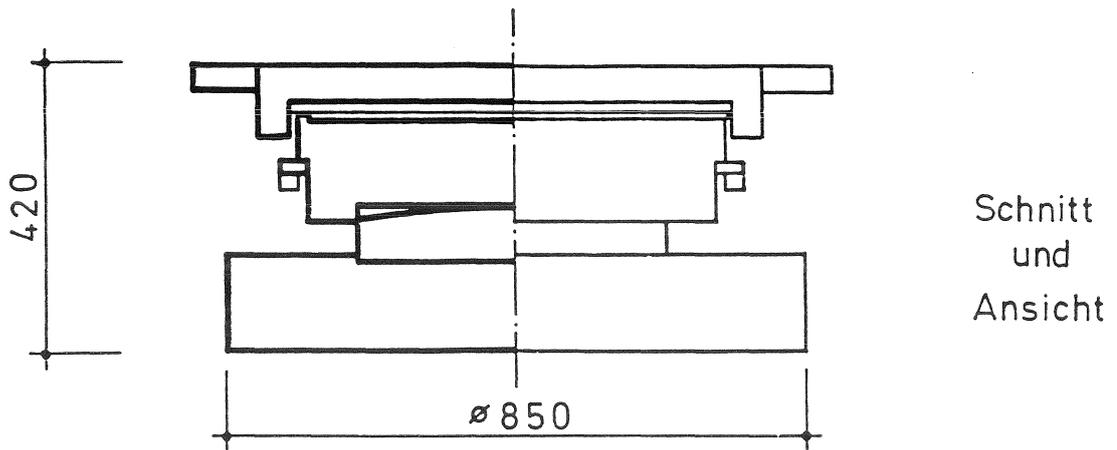


Bild A4: Einachsiger verschiebbares Punktkipp-Gleitlager
Fa. Kreuzt, PKLe, Typ 111 03 (Maße in mm)

Tabelle A1: Statistische Auswertung des stündlichen Lagersummenwegs, differenziert nach Tageszeit-Intervallen, rechtes Lager

Wochen- tag	Tages- zeit	Absolute Häufigkeit	Median	Spannweite	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
		n	x	R	\bar{x}	s	v
			m	m	m	m	
Fr. 13.12.85	0-6	6	0.553	0.130	0.530	0.059	0.003
	6-9	3	0.406	0.224	0.459	0.121	0.015
	9-11	2	0.497	0.110	0.497	0.078	0.006
	11-13	2	0.451	0.112	0.451	0.079	0.006
	13-16	3	0.530	0.245	0.537	0.123	0.015
	16-20	4	0.806	0.157	0.811	0.076	0.006
	20-24	4	0.616	0.358	0.591	0.159	0.025
Sa. 14.12.85	0-6	6	0.549	0.081	0.557	0.034	0.001
	6-9	3	0.573	0.045	0.569	0.023	0.001
	9-11	2	0.486	0.208	0.486	0.147	0.022
	11-13	2	0.563	0.038	0.563	0.027	0.001
	13-16	3	0.572	0.208	0.557	0.105	0.011
	16-20	4	0.611	0.191	0.646	0.089	0.008
	20-24	4	0.509	0.177	0.497	0.082	0.007
So. 15.12.85	0-6	6	0.554	0.336	0.515	0.135	0.018
	6-9	3	0.669	0.124	0.641	0.067	0.004
	9-11	2	0.493	0.079	0.493	0.056	0.003
	11-13	2	0.356	0.008	0.356	0.005	0.000
	13-16	3	0.363	0.106	0.384	0.056	0.003
	16-20	4	0.544	0.206	0.566	0.092	0.008
	20-24	4	0.754	0.067	0.754	0.033	0.001
Mo 16.12.85	0-6	6	0.633	0.141	0.640	0.057	0.003
	6-9	3	0.589	0.107	0.599	0.054	0.003
	9-11	2	0.689	0.077	0.689	0.054	0.003
	11-13	2	0.620	0.003	0.620	0.002	0.000
	13-16	3	0.569	0.086	0.585	0.045	0.002
	16-20	4	0.408	0.165	0.421	0.071	0.005
	20-24	4	0.332	0.002	0.332	0.001	0.000
Mi 18.12.85	0-6	6	0.524	0.107	0.535	0.043	0.002
	6-9	3	0.570	0.041	0.581	0.023	0.001
	9-11	2	0.641	0.056	0.641	0.040	0.002
	11-13	2	0.612	0.003	0.612	0.002	0.000
	13-16	3	0.471	0.122	0.488	0.063	0.004
	16-20	4	0.488	0.095	0.483	0.039	0.002
	20-24	4	0.552	0.052	0.553	0.027	0.001
Do. 19.12.85	0-6	6	0.636	0.120	0.637	0.040	0.002
	6-9	3	0.531	0.112	0.497	0.064	0.004
	9-11	2	0.391	0.035	0.391	0.025	0.001
	11-13	2	0.455	0.054	0.455	0.038	0.001
	13-16	3	0.523	0.054	0.520	0.027	0.001
	16-20	4	0.591	0.411	0.643	0.185	0.034
	20-24	4	0.554	0.301	0.584	0.131	0.017

Tabelle A2: Statistische Auswertung des stündlichen Lagersummenwegs, differenziert nach Tageszeit-Intervallen, linkes Lager

Wochen- tag	Tages- zeit	Absolute Häufigkeit	Median	Spannweite	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
		n	x	R	\bar{x}	s	v
			m	m	m	m	
Fr. 13.12.85	0-6	6	0.558	0.160	0.557	0.058	0.003
	6-9	3	0.441	0.122	0.481	0.070	0.005
	9-11	2	0.467	0.050	0.467	0.035	0.001
	11-13	2	0.488	0.089	0.488	0.063	0.004
	13-16	3	0.530	0.078	0.508	0.044	0.002
	16-20	4	0.663	0.043	0.663	0.022	0.000
	20-24	4	0.467	0.263	0.498	0.115	0.013
Sa. 14.12.85	0-6	6	0.585	0.097	0.586	0.035	0.001
	6-9	3	0.616	0.008	0.614	0.004	0.000
	9-11	2	0.468	0.226	0.468	0.160	0.026
	11-13	2	0.549	0.040	0.549	0.028	0.001
	13-16	3	0.574	0.153	0.540	0.082	0.007
	16-20	4	0.569	0.205	0.569	0.112	0.013
	20-24	4	0.411	0.127	0.413	0.053	0.003
So. 15.12.85	0-6	6	0.500	0.267	0.489	0.105	0.011
	6-9	3	0.628	0.093	0.610	0.049	0.002
	9-11	2	0.490	0.094	0.490	0.067	0.004
	11-13	2	0.374	0.013	0.374	0.009	0.000
	13-16	3	0.380	0.081	0.402	0.045	0.002
	16-20	4	0.528	0.116	0.530	0.051	0.003
	20-24	4	0.723	0.072	0.713	0.031	0.001
Mo 16.12.85	0-6	6	0.651	0.054	0.650	0.019	0.000
	6-9	3	0.554	0.122	0.589	0.068	0.005
	9-11	2	0.675	0.057	0.675	0.040	0.002
	11-13	2	0.648	0.022	0.648	0.015	0.000
	13-16	3	0.584	0.037	0.576	0.020	0.000
	16-20	4	0.462	0.078	0.462	0.037	0.001
	20-24	4	0.390	0.028	0.541	0.014	0.000
Mi 18.12.85	0-6	6	0.555	0.144	0.616	0.059	0.003
	6-9	3	0.612	0.037	0.652	0.019	0.000
	9-11	2	0.652	0.053	0.618	0.038	0.001
	11-13	2	0.618	0.004	0.448	0.003	0.000
	13-16	3	0.443	0.099	0.506	0.050	0.002
	16-20	4	0.490	0.081	0.534	0.038	0.001
	20-24	4	0.532	0.066	0.397	0.029	0.001
Do. 19.12.85	0-6	6	0.549	0.203	0.561	0.073	0.005
	6-9	3	0.552	0.167	0.550	0.084	0.007
	9-11	2	0.392	0.000	0.392	0.000	0.000
	11-13	2	0.492	0.059	0.492	0.042	0.002
	13-16	3	0.572	0.036	0.567	0.018	0.000
	16-20	4	0.650	0.232	0.658	0.112	0.013
	20-24	4	0.650	0.238	0.642	0.112	0.012

Tabelle A3 : Differenz des positiven und negativen Lagersummenweges , rechtes Lager

1985												1986												1987																					
Differenz zwischen positiven und negativen Lagerverschiebungen, Rechtes Lager																																													
Tag	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni
1	-			-0,051				0,045						0,237	0,131	0,072				0,013			0,039																						
2	0,042			0,043				0,001					0,042	0,167		-0,373							0,040																						
3						0,074		0,014					0,027	-0,069									0,116																						
4						0,038		-0,031					-0,006	0,092									-0,074																						
5		-0,023				0,056		-0,058			0,026		-0,002	0,117									-0,121																						
6	-0,026	-0,034				0,028		-0,022			0,046		-0,004	0,044									-0,003																						
7	-0,034	-0,169						0,093					0,005	0,156					0,080				0,022																						
8	-0,046	-0,048						-0,065				-0,031	-0,031	0,248		0,031			0,016				-0,002																						
9	-0,050	-0,028						-0,042					0,003	0,038		-0,093			-0,030	0,049			0,246																						
10	-0,019	-0,022		-0,013				-0,068					0,000	0,151		-0,096			-0,061	-0,037			0,083																						
11	-0,033	-0,007		-0,027				-0,062					-0,019	0,034		-0,072			-0,044	0,035			-0,113																						
12	-0,057	0,003		-0,040	-0,013			-0,025			0,066		0,125	-0,106		-0,080			0,096	-0,130			0,074																						
13	-0,090	-0,001		0,027	0,097			-0,034			0,085		-0,006	0,092					0,073	-0,102	0,098		0,107																						
14	-0,042	0,014		-0,059	-0,109			-0,035			0,010		0,038	0,098					-0,033	0,124			0,044																						
15	-0,020	0,020		-0,042	0,004						0,042		0,012	-0,013					0,065	-0,036	0,125		0,015																						
16	0,066	0,074			0,016								-0,063	-0,024					-0,047	0,065	-0,069		-0,029																						
17	0,068	0,031											0,071	-0,022	-0,125				0,090	0,214	0,203		0,013																						
18	0,069	0,110			0,071								0,146	-0,023	0,031				0,089	-0,013			-0,249																						
19	0,012	0,029			-0,106							-0,018	0,138	0,089	0,002				-0,105	0,018	0,103		-0,088																						
20	0,033	0,013			-0,201							0,015	-0,071	0,013	0,104				-0,004	-0,058	0,178		-0,135																						
21	0,076	0,028		0,110							0,056		-0,198	0,028	-0,068				-0,047	0,081	0,059		0,206																						
22	0,065			0,002							0,033		-0,001	-0,078	-0,118				0,036	0,136	0,185		-0,160																						
23	0,071			-0,027									-0,031	-0,039	-0,110				-0,041	0,093	0,080		-0,263																						
24	0,086												0,051	0,044	0,015				-0,047	-0,037	0,112		-0,072																						
25	0,058												-0,102	0,019	-0,023				0,197	-0,022	0,127		-0,083																						
26	0,037											0,086	-0,041	-0,196	0,046				0,016	0,210	-0,026		0,033																						
27	0,015										0,056		-0,034	-0,104	-0,007				0,159	-0,117	-0,055		-																						
28	0,017										0,037		-0,025	-0,029	-0,025					0,156	-0,062		-																						
29											0,061		0,124	0,024	-0,024					-0,017	0,033		-																						
30														0,088	0,048					0,014	0,008		-																						
31															-0,028								-0,063																						

☐ Sonntag ☐ Feiertag



Tabelle A4 : Differenz des positiven und negativen Lagersummenweges , linkes Lager

1985												1986												1987													
Differenz zwischen positiven und negativen Lagerverschiebungen, Linkes Lager																																					
Tag	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni			
1	-	-	-	0,051	-	-	-	0,023	-	-	0,196	-0,002	-0,392	0,080	0,039	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	0,082	-	0,024	-	-	0,146	-	0,012	-	-	-0,037	-	-0,150	-	0,252	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3	-	-	-	-	-	0,071	-	0,012	-	-	-0,042	-	0,112	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	0,063	-	-0,023	-	-	-0,051	-	0,027	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	0,036	-	-	-	-0,617	-	-0,011	-	-	-	-0,042	-0,078	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	0,158	0,087	-	-	-	-	-	0,040	-	-	-	0,006	0,007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	0,072	0,144	-	-	-	-	-	0,397	-	-	-0,036	0,007	-0,140	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	0,012	-0,053	-	-	-	-	-	0,057	-	-	-0,024	0,023	-0,387	-	-0,003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	0,016	0,086	-	-	-	-	-	-0,021	-	-	0,002	-	0,065	-	-0,028	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	0,088	-	0,029	-	-	-	0,010	-	0,004	0,035	-0,072	-	0,065	-	-0,034	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	0,060	-	0,050	-	-	-	-0,008	-	0,018	0,265	-0,063	0,074	-	-0,010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	0,030	-	0,091	0,028	-	-	-0,042	-	-0,034	-	0,083	0,094	-	-0,033	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	-	0,044	-	0,088	0,029	-	-	-0,027	-	-0,035	-	-0,097	-0,030	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	0,020	-	0,027	0,001	-	-	-0,052	-	-	0,021	-0,056	-0,084	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	0,028	-	0,118	0,048	-	-	-	-	-	0,021	0,049	0,002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	0,077	-0,045	-	-	-0,054	-	-	-	-	0,014	-0,034	0,110	0,029	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	0,014	0,065	-	-	-	-	-	-	-	-0,068	-0,062	0,043	0,115	0,081	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	0,027	-0,050	-	-	-	-	-	-	-	-0,114	-0,011	0,012	0,245	0,014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	0,084	0,024	-	-	-	-	-	-	-	-0,043	-	-0,170	0,065	0,055	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	0,052	0,056	-	-	-0,016	-	-	-0,049	-	-	-0,027	0,016	-0,041	0,212	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	0,021	0,057	-	0,011	-	-	-	-0,026	-	-	-0,001	0,169	-0,031	-0,039	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-0,013	-	-	0,049	-	-	-	-0,023	-	-	-0,024	-0,026	-0,060	-0,089	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	0,039	-	-	-0,084	-	-	-	0,024	-	-	-0,022	0,102	-0,063	0,111	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	0,055	-	-	-	-	-	-	0,004	-	-0,058	-0,048	-0,311	-0,005	0,037	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	0,017	-	-	-	-	-	-	0,042	-	-0,033	-0,027	-0,452	0,112	0,013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	0,035	-	-	-	-	-	-	0,043	-	-0,040	-	-0,104	-0,166	-0,008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	0,012	-	-	-	-	-	-	0,016	-	-0,053	-	-0,012	-0,077	-0,010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	0,035	-	0,026	-	-	-	-	-0,005	-	-	-0,091	0,100	-0,062	-0,022	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	-	-	0,028	-	-	-	-	-	-	-	-0,071	-0,459	0,026	0,021	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	0,024	-	-	-	-	-	-	-	-0,067	0,029	-	0,052	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	-	-	0,045	-	-	-	-	-	-	-	-0,056	-	-	0,012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Legend: Sonntag Feiertag

Tabelle A5.1: Täglicher Lagersummenweg, differenziert nach Wochentagen; rechtes Lager

Mo		Di		Mi		Do		Fr		Sa		So	
		Datum	ΣS_d										
12.08.85	11.887	06.08.85	10.133	07.08.85	10.144	08.08.85	10.263	02.08.85	13.710	10.08.85	11.183	11.08.85	11.594
19.08.85	10.640	13.08.85	11.827	14.08.85	11.951	15.08.85	14.304	09.08.85	10.242	17.08.85	10.414	18.08.85	10.745
26.08.85	14.423	20.08.85	10.692	21.08.85	11.923	22.08.85	12.459	16.08.85	17.072	24.08.85	15.319	25.08.85	14.594
09.09.85	15.068	27.08.85	12.766	28.08.85	13.433	05.09.85	16.406	23.08.85	12.580	07.09.85	15.635	08.09.85	13.877
16.09.85	11.841	10.09.85	11.816	11.09.85	14.570	12.09.85	15.017	06.09.85	11.421	14.09.85	16.676	15.09.85	12.106
28.10.85	14.622	17.09.85	12.039	18.09.85	14.792	19.09.85	12.395	13.09.85	11.655	21.09.85	11.266	10.11.85	13.632
11.11.85	14.845	29.10.85	13.193	30.10.85	13.501	31.10.85	15.817	20.09.85	13.344	02.11.85	13.219	15.12.85	13.141
16.12.85	13.484	12.11.85	13.417	13.11.85	13.668	14.11.85	15.848	01.11.85	14.520	23.11.85	13.987	-	-
-	-	-	-	18.12.85	13.065	21.11.85	13.954	15.11.85	12.179	14.12.85	13.625	-	-
-	-	-	-	-	-	12.12.85	12.305	22.11.85	14.256	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	19.12.85	13.474	13.12.85	13.674	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	20.12.85	13.726	-	-	-	-

1985

Täglicher Lagersummenweg ΣS_d in m
Rechtes Lager

Tabelle A5.2: Täglicher Lagersummenweg, differenziert nach Wochentagen, rechtes Lager

Mo		Di		Mi		Do		Fr		Sa		So	
Datum	ΣS _d												
06.01.86	13.245	25.02.86	12.404	19.02.86	14.392	20.02.86	13.675	03.01.86	12.212	04.01.86	13.829	05.01.86	12.800
24.02.86	13.380	04.03.86	13.703	26.02.86	13.611	27.02.86	13.323	21.02.86	13.655	22.02.86	15.358	23.02.86	13.488
03.03.86	13.230	11.03.86	14.979	05.03.86	13.836	06.03.86	12.750	28.02.86	14.005	01.03.86	13.294	02.03.86	12.812
10.03.86	13.378	05.08.86	10.395	12.03.86	13.479	13.03.86	13.044	07.03.86	11.648	08.03.86	12.619	09.03.86	13.590
04.08.86	19.240	12.08.86	13.422	06.08.86	12.025	07.08.86	11.255	14.03.86	11.637	14.06.86	9.065	15.06.86	9.656
11.08.86	14.354	19.08.86	12.777	13.08.86	14.696	14.08.86	14.399	08.08.86	13.905	21.06.86	9.494	22.06.86	9.868
18.08.86	12.711	26.08.86	14.343	20.08.86	13.912	21.08.86	13.867	15.08.86	14.354	28.06.86	10.874	29.06.86	11.074
25.08.86	14.832	02.09.86	14.431	27.08.86	13.202	28.08.86	13.051	22.08.86	13.433	05.07.86	9.692	06.07.86	9.986
01.09.86	13.202	09.09.86	13.778	03.09.86	15.744	04.09.86	14.101	29.08.86	14.284	12.07.86	9.448	13.07.86	9.821
08.09.86	13.815	16.09.86	12.116	10.09.86	12.919	11.09.86	13.793	05.09.86	12.497	19.07.86	9.232	20.07.86	9.594
15.09.86	15.637	23.09.86	12.901	17.09.86	12.691	18.09.86	12.775	12.09.86	12.178	26.07.86	9.045	27.07.86	17.633
22.09.86	15.508	30.09.86	13.799	24.09.86	14.495	25.09.86	12.860	19.09.86	13.739	02.08.86	18.007	03.08.86	18.756
29.09.86	14.315	21.10.86	13.514	01.10.86	12.259	23.10.86	18.383	26.09.86	13.726	09.08.86	13.978	10.08.86	12.962
20.10.86	20.865	28.10.86	14.214	22.10.86	19.290	30.10.86	14.940	17.10.86	17.734	16.08.86	13.294	17.08.86	13.764
27.10.86	13.984	11.11.86	14.015	29.10.86	13.945	-	-	24.10.86	21.050	23.08.86	14.774	24.08.86	14.130
10.11.86	13.741	-	-	12.11.86	13.479	-	-	31.10.86	13.902	06.09.86	13.209	07.09.86	13.674
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13.09.86	14.189	14.09.86	12.518
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20.09.86	15.478	21.09.86	14.315
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27.09.86	13.120	28.09.86	12.943
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18.10.86	19.061	19.10.86	19.697
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25.10.86	16.837	26.10.86	13.357
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	01.11.86	13.888	02.11.86	14.238
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	08.11.86	13.181	09.11.86	13.177

Täglicher Lagersummenweg ΣS_d in m
Rechtes Lager

1986

Tabelle A5.3: Täglicher Lagersummenweg, differenziert nach Wochentagen; rechtes Lager

Mo		Di		Mi		Do		Fr		Sa		So	
Datum	ΣS_d												
09.02.87	13.620	10.02.87	13.701	11.02.87	13.694	12.02.87	13.736	13.02.87	13.371	07.02.87	14.148	08.02.87	13.444
16.02.87	14.016	17.02.87	14.062	18.02.87	13.809	19.02.87	14.181	20.02.87	14.028	14.02.87	14.043	15.02.87	13.258
23.02.87	13.430	24.02.87	14.222	25.02.87	13.393	26.02.87	12.435	27.02.87	16.639	21.02.87	14.316	22.02.87	13.612
09.03.87	13.006	10.03.87	11.145	11.03.87	15.806	12.03.87	14.013	13.03.87	14.187	14.03.87	12.931	01.03.87	11.662
16.03.87	13.015	17.03.87	14.604	18.03.87	13.019	19.03.87	12.242	20.03.87	13.540	21.03.87	13.416	15.03.87	13.853
23.03.87	12.910	24.03.87	14.036	25.03.87	16.498	26.03.87	13.551	27.03.87	15.223	28.03.87	12.215	22.03.87	13.266
30.03.87	14.076	21.04.87	14.134	15.04.87	14.425	16.04.87	14.559	17.04.87	16.780	25.04.87	13.387	29.03.87	13.088
13.04.87	15.337	28.04.87	14.375	22.04.87	13.227	23.04.87	13.958	24.04.87	13.431	02.05.87	14.223	19.04.87	13.233
20.04.87	13.351	05.05.87	14.508	29.04.87	13.292	30.04.87	13.555	01.05.87	13.543	09.05.87	13.706	26.04.87	13.270
27.04.87	13.491	12.05.87	13.558	06.05.87	14.359	07.05.87	14.467	08.05.87	14.099	16.05.87	13.656	03.05.87	14.359
04.05.87	14.375	19.05.87	13.228	13.05.87	13.265	21.05.87	13.847	22.05.87	13.812	23.05.87	13.081	10.05.87	14.288
11.05.87	13.750	26.05.87	13.510	20.05.87	14.128	28.05.87	14.024	29.05.87	13.488	30.05.87	14.420	17.05.87	13.744
18.05.87	13.653	02.06.87	14.363	27.05.87	13.108	04.06.87	14.250	05.06.87	11.134	06.06.87	12.444	24.05.87	13.837
25.05.87	13.665	16.06.87	13.750	03.06.87	13.619	11.06.87	13.922	12.06.87	14.200	13.06.87	13.356	31.05.87	14.073
01.06.87	13.266	23.06.87	10.409	17.06.87	13.406	18.06.87	13.226	19.06.87	13.908	20.06.87	13.642	07.06.87	14.229
08.06.87	13.458	-	-	24.06.87	11.539	25.06.87	13.671	26.06.87	13.260	-	-	14.06.87	13.797
15.06.87	13.417	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21.06.87	10.694
22.06.87	11.537	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Täglicher Lagersummenweg ΣS_d in m
Rechtes Lager

1987

Tabelle A6.1: Täglicher Lagersummenweg, differenziert nach Wochentagen; linkes Lager

Mo		Di		Mi		Do		Fr		Sa		So	
		Datum	ΣS _d										
19.08.85	14.276	06.08.85	19.790	07.08.85	15.702	08.08.85	12.643	02.08.85	15.199	17.08.85	12.904	18.08.85	13.770
26.08.85	16.428	20.08.85	13.584	21.08.85	13.915	22.08.85	14.214	09.08.85	11.187	24.08.85	16.621	25.08.85	16.279
09.09.85	12.285	27.08.85	14.618	28.08.85	15.251	05.09.85	12.030	16.08.85	12.548	07.09.85	13.834	08.09.85	11.547
16.09.85	11.514	10.09.85	12.850	11.09.85	11.778	12.09.85	11.519	23.08.85	14.528	14.09.85	12.849	15.09.85	14.002
28.10.85	13.381	17.09.85	13.302	18.09.85	14.623	19.09.85	14.628	06.09.85	13.428	21.09.85	12.931	10.11.85	13.728
11.11.85	15.897	29.10.85	12.966	30.10.85	13.865	31.10.85	12.383	13.09.85	13.465	02.11.85	14.927	15.12.85	12.671
16.12.85	13.852	12.11.85	14.373	13.11.85	13.682	14.11.85	12.819	20.09.85	12.007	23.11.85	14.175	-	-
-	-	-	-	18.12.85	13.092	21.11.85	13.254	01.11.85	12.087	14.12.85	13.167	-	-
-	-	-	-	-	-	12.12.85	13.537	15.11.85	13.892	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	19.12.85	13.686	22.11.85	13.168	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	13.12.85	12.860	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	20.12.85	12.878	-	-	-	-

Täglicher Lagersummenweg ΣS_d in m
Linkes Lager

1985

Tabelle A6.2: Täglicher Lagersummenweg, differenziert nach Wochentagen; linkes Lager

Mo		Di		Mi		Do		Fr		Sa		So	
Datum	ΣS _d												
06.01.86	14.532	25.02.86	15.112	19.02.86	12.294	20.02.86	12.153	03.01.86	12.603	04.01.86	13.349	05.01.86	13.891
24.02.86	14.600	04.03.86	14.035	26.02.86	15.333	27.02.86	13.138	21.02.86	16.003	22.02.86	12.384	23.02.86	13.795
03.03.86	14.618	11.03.86	14.818	05.03.86	14.455	06.03.86	13.311	28.02.86	13.664	01.03.86	15.684	02.03.86	14.497
10.03.86	12.195	10.06.86	16.920	12.03.86	14.171	13.03.86	13.002	07.03.86	15.298	08.03.86	14.157	09.03.86	13.000
16.06.86	18.547	17.06.86	17.232	11.06.86	17.620	12.06.86	17.303	14.03.86	11.373	16.08.86	13.029	17.08.86	12.448
23.06.86	18.404	24.06.86	18.872	18.06.86	16.353	19.06.86	17.383	13.06.86	17.132	23.08.86	12.466	24.08.86	15.405
30.06.86	20.185	01.07.86	15.438	25.06.86	19.266	26.06.86	19.291	20.06.86	17.964	06.09.86	12.409	07.09.86	14.053
07.07.86	17.879	08.07.86	18.102	02.07.86	16.858	03.07.86	16.768	27.06.86	19.269	13.09.86	12.922	14.09.86	12.846
14.07.86	17.720	15.07.86	17.744	09.07.86	18.392	10.07.86	18.721	04.07.86	16.495	20.09.86	14.426	21.09.86	15.080
21.07.86	19.512	22.07.86	18.781	16.07.86	17.038	17.07.86	16.764	11.07.86	17.120	27.09.86	13.819	28.09.86	14.725
28.07.86	19.282	29.07.86	20.016	23.07.86	19.081	24.07.86	19.229	18.07.86	17.907	18.10.86	12.654	19.10.86	14.973
11.08.86	14.856	05.08.86	11.554	30.07.86	18.104	31.07.86	19.139	25.07.86	19.454	25.10.86	16.158	26.10.86	14.099
18.08.86	12.726	12.08.86	13.262	06.08.86	13.647	07.08.86	13.356	01.08.86	10.522	01.11.86	12.326	02.11.86	12.776
25.08.86	15.492	19.08.86	15.325	13.08.86	12.979	14.08.86	12.697	08.08.86	15.258	08.11.86	13.254	09.11.86	12.584
01.09.86	13.433	26.08.86	13.067	20.08.86	13.565	21.08.86	13.348	15.08.86	13.163	-	-	-	-
08.09.86	14.082	02.09.86	15.158	27.08.86	14.960	28.08.86	13.323	22.08.86	12.683	-	-	-	-
15.09.86	15.652	09.09.86	13.852	03.09.86	12.768	04.09.86	12.743	29.08.86	13.440	-	-	-	-
22.09.86	15.733	16.09.86	12.691	10.09.86	12.662	11.09.86	13.793	05.09.86	13.812	-	-	-	-
29.09.86	14.845	23.09.86	14.492	17.09.86	14.409	18.09.86	14.020	12.09.86	13.949	-	-	-	-
20.10.86	15.435	30.09.86	13.350	24.09.86	13.836	25.09.86	13.343	19.09.86	15.700	-	-	-	-
27.10.86	13.963	21.10.86	14.462	01.10.86	12.156	23.10.86	14.166	26.09.86	15.799	-	-	-	-
10.11.86	12.683	28.10.86	13.901	22.10.86	13.569	30.10.86	14.017	17.10.86	12.975	-	-	-	-
-	-	11.11.86	12.551	29.10.86	13.798	-	-	24.10.86	15.983	-	-	-	-
-	-	-	-	12.11.86	12.836	-	-	31.10.86	13.060	-	-	-	-

Tabelle A6.3: Täglicher Lagersummenweg, differenziert nach Wochentagen; linkes Lager

Mo		Di		Mi		Do		Fr		Sa		So	
Datum	ΣS _d												
09.02.87	16.331	10.02.87	12.339	11.02.87	10.927	12.02.87	11.379	13.02.87	12.793	07.02.87	12.747	08.02.87	11.421
16.02.87	14.823	17.02.87	12.216	18.02.87	11.516	19.02.87	12.532	20.02.87	13.305	14.02.87	12.226	15.02.87	11.755
23.02.87	16.234	24.02.87	13.022	25.02.87	6.860	05.03.87	8.375	06.03.87	10.305	21.02.87	13.359	22.02.87	13.209
02.03.87	16.501	03.03.87	19.057	04.03.87	9.114	12.03.87	11.994	13.03.87	12.022	28.02.87	10.850	01.03.87	14.239
09.03.87	11.692	10.03.87	12.156	11.03.87	11.967	19.03.87	12.681	20.03.87	15.270	07.03.87	10.133	08.03.87	11.270
16.03.87	10.063	17.03.87	16.722	18.03.87	13.359	26.03.87	16.327	27.03.87	14.971	14.03.87	12.028	15.03.87	11.913
23.03.87	10.158	24.03.87	14.285	25.03.87	14.148	16.04.87	13.227	17.04.87	16.774	21.03.87	12.246	22.03.87	18.206
30.03.87	11.487	21.04.87	10.421	15.04.87	11.934	23.04.87	11.294	24.04.87	11.357	28.03.87	10.469	29.03.87	11.946
13.04.87	12.322	28.04.87	11.983	22.04.87	11.421	30.04.87	11.876	01.05.87	10.415	18.04.87	11.418	19.04.87	10.308
20.04.87	10.674	05.05.87	12.046	29.04.87	12.173	07.05.87	13.496	08.05.87	13.528	25.04.87	11.276	26.04.87	11.366
27.04.87	11.286	12.05.87	14.481	06.05.87	13.136	21.05.87	18.208	22.05.87	10.988	09.05.87	13.483	03.05.87	10.424
04.05.87	12.796	19.05.87	15.571	13.05.87	11.241	28.05.87	10.365	29.05.87	20.240	16.05.87	10.268	10.05.87	13.348
11.05.87	14.603	26.05.87	18.271	20.05.87	19.698	04.06.87	12.739	05.06.87	14.685	23.05.87	10.333	17.05.87	19.830
25.05.87	11.962	02.06.87	13.505	27.05.87	10.402	11.06.87	18.800	12.06.87	18.480	30.05.87	10.348	24.05.87	15.273
01.06.87	11.897	09.06.87	10.440	03.06.87	11.530	18.06.87	11.341	19.06.87	10.904	13.06.87	15.858	31.05.87	11.101
08.06.87	17.391	16.06.87	11.877	10.06.87	18.556	25.06.87	15.710	26.06.87	10.795	20.06.87	15.482	07.06.87	18.805
15.06.87	11.683	23.06.87	13.882	17.06.87	11.078	-	-	-	-	27.06.87	12.721	14.06.87	15.219
22.06.87	10.576	-	-	24.06.87	14.262	-	-	-	-	-	-	21.06.87	12.051
29.06.87	12.417	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28.06.87	10.759

Täglicher Lagersummenweg ΣS_d in m
linkes Lager

1987

Telefon:

Vermittlung (02 41) 80-5100

Durchwahl (02 41) 80- 67 84

Datum 23.10.1990

Br/Gr/Pj.-F 192

A B S T R A C T

=====

Theme: Steel-Bridge bearing movements

Present knowledge about friction and wear allows no suitable informations about life time and the real temporary coefficient of friction of bridge sliding bearings in service. Knowledge about the stress collective of bridge bearings is important for the

- optimization of bearing constructions
- optimization of the choose of bearing types in the structure
- reduction of bearing replacement.

In situ-measurements took place at a representative steel bridge to describe the stress collective

- single displacements and rotations
- velocity of sliding and rotation
- loads in the friction plane

due to temperature, wind and traffic. A special equipment was developed to dedect very small movements with high frequency.

In comparison with the laboratory test parameters the

- single displacements are three times smaller
- sliding velocity is 1,5 times higer.

The total annual displacement as the addition of any measured single one can be estimated to an amount of 5000 m, but most of the displacements result of oszillation with elastic deformations in the polymer sliding material (PTFE). The influence of the much different stress collective in servive on the coef-ficient of friction is presently unknown, and laboratory tests under real stress parameter are demanded for bridge and bearing design.

Telefon:

Vermittlung (02 41) 80-5100

Durchwahl (02 41) 80-67 84

Datum 29.10.1990

Br/Fk.-F 192

RESUME

Sujet: Mouvements dans les ponts en acier.

Les connaissances actuelles sur les mécanismes d'usure et de frottement dans "l'appui libre des ponts à tribosystème" ne permettent pas de tirer aucune conclusion certaine quant à la durée de vie possible d'un appui libre sur base des essais d'agrération actuels. Des données concernant les coefficients de frottement temporaires réels et les vitesses d'usure temporaire en fonction de l'ensemble des forces de contrainte sont d'un intérêt pratique considérable pour la construction.

Des mesures effectuées in-situ sur un pont d'acier (Grunewald) ont permis d'établir les paramètres essentiels de l'ensemble des forces de contrainte des appuis libres des ponts en utilisation réelle. Les recherches de la construction ont permis d'établir pour la construction des ponts, des données statistiques sûres concernant les déplacements individuels et l'angle de rotation de l'appui et les vitesses angulaires et de glissement.

Par rapport aux paramètres du laboratoire d'agrération, pour les ponts en acier, le déplacement moyen de l'appui est trois fois plus petit et la vitesse de glissement moyenne est 1,5 fois plus élevée. La trajectoire totale de l'appui en fonction de la température est d'environ 2 % de la trajectoire totale possible de l'appui.

Il n'existe cependant pour l'instant aucun consensus concernant l'influence de telles forces sur les coefficients de frottement temporaires, les mécanismes d'usure et le niveau temporaire d'usure; ainsi une prévision des coefficients de frottement réels dans l'ouvrage et de la durée de vie de celui-ci est pour l'instant à peine possible. Les durées de vie très différentes des appuis qui sont observées dans la pratique trouvent ici, du moins en grande partie, leur raison d'être. Il est donc souhaitable d'établir des tests d'agrération modifiés tenant compte entre autres des résultats obtenus dans ce rapport de recherche pour éclaircir ces problèmes pratiques de la construction.