

Verkehrslastbeanspruchung von Übergangskonstruktionen in Straßenbrücken

Ch. Braun, Holzkirchen

Übersicht. Übergangskonstruktionen werden durch Verkehrslasten hoch beansprucht. Dabei kommt der Ermüdungsfestigkeit der Bauteile eine besondere Bedeutung zu. Zur sicheren Bemessung wird die Kenntnis des Lastverformungsverhaltens des Systems, der Maximalbeanspruchungen und der Beanspruchungskollektive sowie der Bauteilwiderstände benötigt. In diesem Beitrag wird ein Verfahren zur systemunabhängigen Ermittlung der Bauteilbeanspruchungen infolge der einwirkenden Verkehrsbelastung von Übergangskonstruktionen aufgezeigt. Auch erfolgt eine Angabe über die Größe der maximal zu erwartenden Einwirkungen sowie der für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis notwendigen Einwirkungs- bzw. Beanspruchungskollektive.

Strain on expansion joints for road bridges under traffic loads

Contents. Expansion joints are subject to high strain due to traffic loads. With this, the fatigue resistance of the structural components is of particular importance. For safe dimensioning it is essential to know the load deformation behaviour of the system, the maximum strains and the stress range spectra as well as the resistances of the structural members. This article presents a procedure for independent determination of the structural member strains resulting from the impact of traffic load on expansion joints. Reference is also made to the maximum size of stress that may be expected as well as to the strain and stress range spectra necessary for the proof of fatigue capacity.

1 Einleitung

Übergangskonstruktionen überbrücken Bewegungsfugen zwischen Brückentragwerken. Bei stetiger und möglichst zwängungsfreier Anpassung an die Verformungszustände der angrenzenden Bauwerke müssen auch im Bereich der Übergangskonstruktion die Fahrbahneigenschaften erhalten bleiben. Die dafür eingesetzten beweglich gelagerten oder verformbaren Bauteile müssen die Verkehrslasten sicher und dauerhaft in die Verankerungskonstruktionen und Bauwerksränder abtragen können.

Heute haben sich weltweit die sogenannten wasserdichten Lamellenkonstruktionen, hier moderner und wie im internationalen Sprachgebrauch üblich als Modular-Dehnfuge bezeichnet, durchgesetzt (Bild 1). Diese bestehen aus mehreren in Fugenlängsrichtung angeordneten Stahlträgern und dazwischenliegenden Dichtelementen zur Abdichtung der Einzelspalte. Die fahrtechnisch begründbare und national unterschiedliche maximal zulässige Einzelspaltweite von in Deutschland 70 mm erfordert für größere Dehnwege die Anordnung von mehreren Dichtelementen nebeneinander. Außer den im Bauwerksrand verankerten Randträgern sind

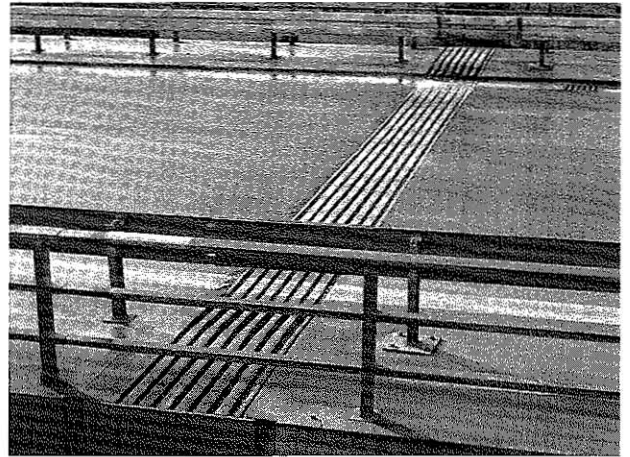


Bild 1. Modular-Dehnfuge

dann Mittelträger erforderlich, die relativ zu den Fugenrändern verschieblich auf einer Tragkonstruktion gelagert sind. Diese Tragkonstruktion dient zur Abtragung der vertikalen und teilweise der horizontalen Verkehrslasten. Durch Steuerungselemente wird eine gleichmäßige Aufteilung der Bewegung der Fugenränder auf die Einzelspalte bewirkt. Auch die Steuerungskonstruktion überträgt teilweise die horizontalen Verkehrslasten in die Bauwerksränder.

Abhängig von der Trag- und Steuerungskonstruktion unterscheidet man grundsätzlich folgende Bauarten, wobei die gebräuchlichen jedoch nicht exakten Begriffe „starr“ und „elastisch“ ein relatives Maß für die Bauteilverformungen darstellen:

- Vertikale Lagerung der Mittelträger und/oder der Tragkonstruktion (Traverse):
 - (s . .) starr
 - (e . .) elastisch
- Horizontale Lagerung der Mittelträger auf der Tragkonstruktion (Traverse):
 - (. s.) starr
 - (. g.) gleitend und drehelastisch
- Steuerung:
 - (. s) starr
 - (. e) elastisch

Bild 2 zeigt mögliche Kombinationen der Funktionen anhand von Ausführungsbeispielen.

Weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Art der Anordnung von Lagerungs- und Steuerungselementen, diese können am Mittelträger voneinander örtlich und funktional getrennt angebracht werden. Für die weiteren Ausführungen ist dies jedoch von sekundärer Bedeutung.

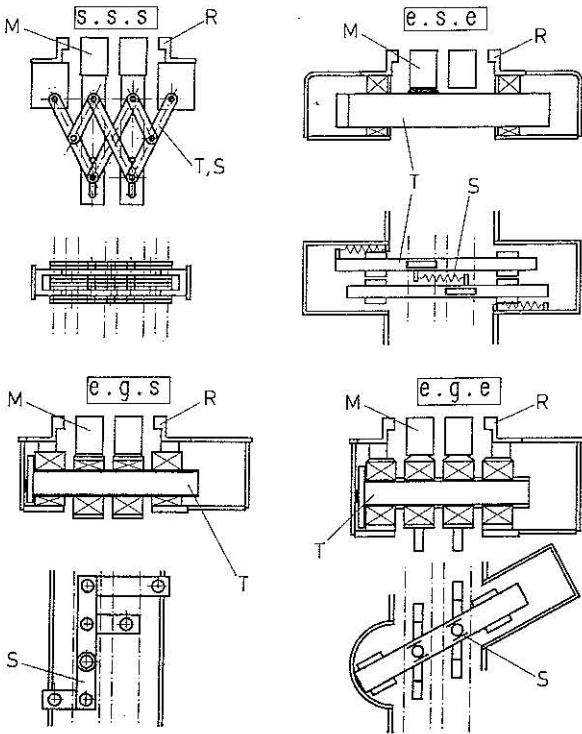


Bild 2. Funktionsprinzipien. *M* Mittelträger; *R* Randträger; *T* Tragkonstruktion; *S* Steuerung

In den letzten Jahren wurde in Deutschland der Bemessung von Übergangskonstruktionen immer mehr Beachtung geschenkt. Insbesondere der stark zunehmende Verkehr auf den Autobahnen, der hohe Auslastungsgrad des Schwerlastverkehrs auf den Fernstrecken, die Häufung von Ermüdungsschäden und die Forderung nach einer möglichst langen Lebensdauer zur Vermeidung von staubildenden Sanierungsbaustellen machten dies erforderlich.

Zur richtigen und somit sicheren Bemessung ist die genaue Kenntnis

- der äußeren Einwirkungen,
 - der daraus folgenden Bauteilbeanspruchung und
 - der Bauteilwiderstände
- erforderlich.

Bisher erfolgte die Bemessung anhand unterschiedlichster, systemabhängiger Berechnungsmodelle mit Hilfe der für den Straßenbrückenbau geltenden Belastungsvorschriften, z. Z. DIN 1072 [1]. Die Bauteilwiderstände werden im wesentlichen den geltenden Stahlbaunormen entnommen, in den ZTV-K [2] wird zusätzlich ein Dauerfestigkeitsnachweis anhand der in der Bundesbahnvorschrift DS 804 [3] festgelegten Festigkeitswerte geregelt.

Auch die Straßenbrücken selbst wurden bisher nach Grundsätzen der Tragsicherheit bemessen. Inzwischen wurde die Bedeutung der Bauteilermüdung erkannt (z. B. [4 und 5]). Die in DIN 1072 für den Straßenbrückenbau festgelegten Lasten lassen für Übergangskonstruktionen nur eine qualitative Aussage über die Tragsicherheit zu, und es gibt kein zusammenhängendes Bemessungs- und Sicherheitskonzept für den Betriebsfestigkeitsnachweis. Andererseits scheint wegen des besonderen, dynamischen und kinematischen Lastverformungsverhaltens von Übergangskonstruktionen eine einfache Modellbildung des statischen Systems und somit eine rein rechnerische Ermittlung der Bauteilbeanspruchungen nicht möglich zu sein.

Im vorliegenden Beitrag wird ein Weg aufgezeigt, wie die Beanspruchungen der Bauteile von Übergangskonstrukti-

onen und deren Häufigkeit zuverlässig und systemunabhängig ermittelt werden können. Grundlage dafür sind umfangreiche Feldversuche, die hier näher beschrieben werden. Sind die Beanspruchungen bekannt, so kann durch Gegenüberstellung mit den am Bauteil ermittelten Widerständen [6] und Anwendung des z. B. in [7] geregelten Bemessungskonzeptes der Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis geführt werden.

2 Feldversuche

Bei starr gelagerten Systemen (s. s. s) ist eine einfache rechnerische Ermittlung der Beanspruchungen möglich. An zwei den Gruppen (e.g.e) und (e.s.e) zugehörigen Systemen wurde das Tragverhalten unter Verkehrslastbeanspruchung untersucht. Durch eine Blockierung der Steuerung am System (e.s.e) wurde auch das System (e.s.s) erfaßt. Somit kann eine allgemeingültige Aussage über die Bauteilbeanspruchungen gemacht werden.

Am System (e. g. e) wurden zur Voruntersuchung nur Verformungs- und Beschleunigungsmessungen (Versuchsreihe A) durchgeführt. Dazu diente eine Übergangskonstruktion vom Typ „Schwenktraverse“ mit 10 Dichtprofilen und somit einem zulässigen Dehnweg von 650 mm an der Werratalbrücke bei Hedemünden im Zuge der A7. Die zum Zeitpunkt der Messungen vorhandene mittlere Einzelspaltweite betrug 39,0 mm.

Unmittelbar neben den Auflagerungspunkten wurden an zwei Mittelträgern insgesamt 8 Beschleunigungsaufnehmer angebracht (Bild 3). Dadurch konnten an 4 Meßpunkten die vertikalen und horizontalen Beschleunigungen und durch doppelte Integration die Verformungen bestimmt werden.

Es wurden verschiedene Testfahrten (Anfahren, Bremsen, Überrollen) mit einem LKW nach Bild 4 durchgeführt.

An der Nettetalbrücke bei Plaiddt im Zuge der A61 wurden an einer Übergangskonstruktion vom Typ „Trägerrostfuge“, dem System (e.s.e) zugehörend, mit 7 Dichtprofilen und somit einem zulässigen Dehnweg von 455 mm umfangreiche Verformungs-, Beschleunigungs- und Dehnungsmessungen durchgeführt (Versuchsreihe B). Gemessen wurde im

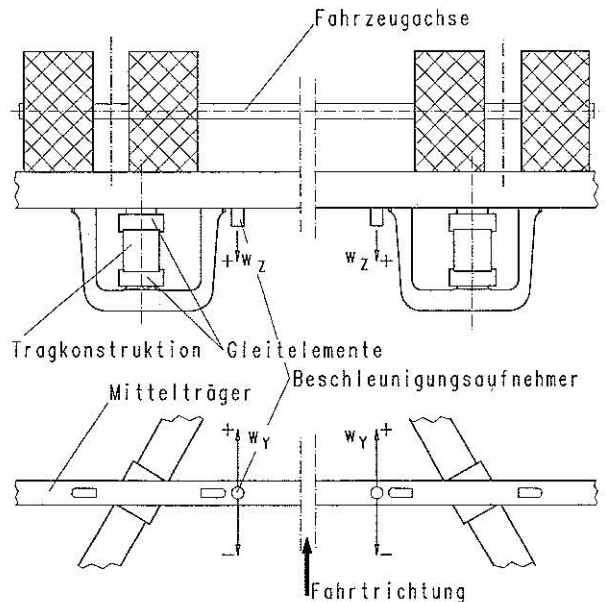


Bild 3. Anordnung der Meßpunkte für die Versuchsreihe A. w_z = Vertikalverschiebung; w_y = Horizontalverschiebung

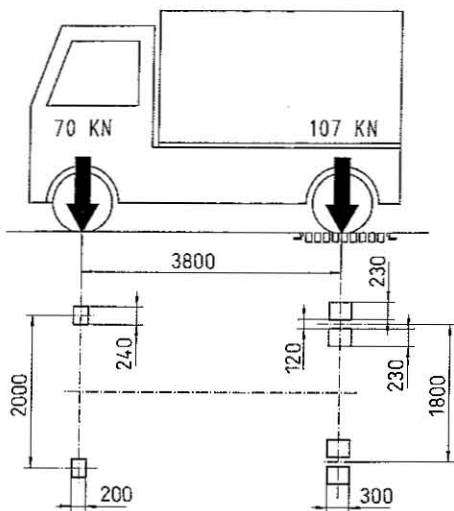


Bild 4. Testfahrzeug für die Versuchsreihe A

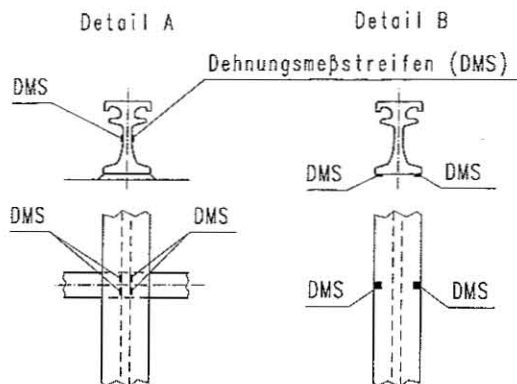


Bild 6. Details der Meßpunkte der Versuchsreihe B, C

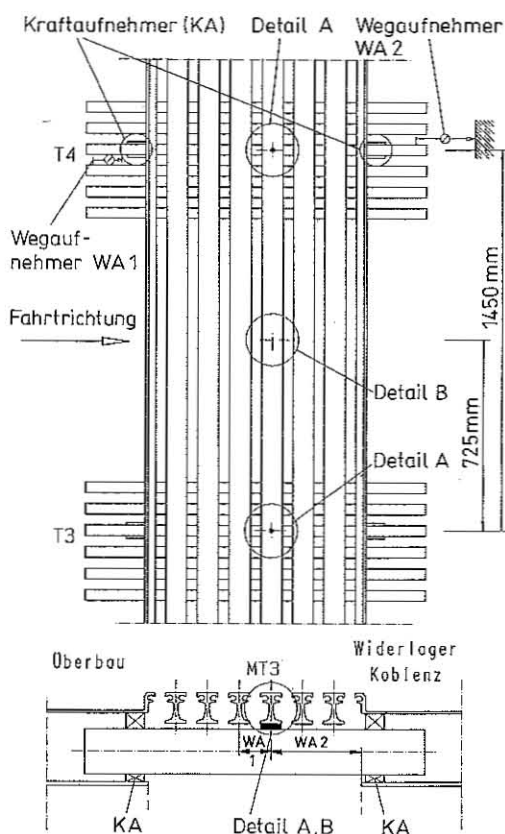


Bild 5. Anordnung der Meßpunkte für Versuchsreihe B, C

Bereich der zwei in der Hauptspur liegenden Traversen T3 und T4 (Bild 5). Die zum Zeitpunkt der Messungen vorhandene mittlere Einzelspaltweite betrug 39,6 mm.

Am Steg des Mittelträgers MT3 wurden oberhalb der beiden Traversen je 4 Dehnmeßstreifen angebracht. Zwei weitere Dehnmeßstreifen befanden sich am Untergurt des Mittelträgers 3 in Feldmitte zwischen den beiden genannten Traversen (Bild 6). Zwei induktive Wegaufnehmer in Höhe der Traversenachse dienten zur Bestimmung der horizontalen Relativbewegung zwischen den Mittelträgern 3 und 4 (WA1) sowie zwischen dem Mittelträger 3 und dem Fugenrand (WA2). Die unterhalb der Traverse 4 angeordneten Elastomer-Gleitlager konnten durch Dehnmeßstreifen an

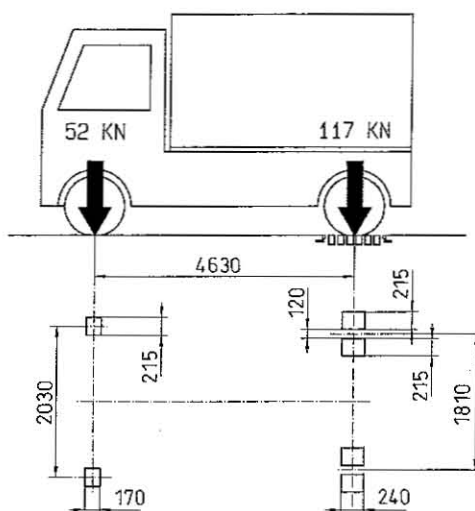


Bild 7. Testfahrzeug für Versuchsreihe B, C

den Bewehrungsblechen zur Messung der Auflast herangezogen werden. Die Aufzeichnungen der 8 an den Traversen angeordneten Beschleunigungsmessgeber wurden nicht ausgewertet und werden daher vernachlässigt.

Zuerst wurden ebenfalls verschiedene Testfahrten (Anfahren, Bremsen, Überrollen) mit einem beladenen LKW durchgeführt (Bild 7), daraufhin wurde unter laufendem Verkehr gemessen.

Dann wurden die Steuerungselemente blockiert und sämtliche Messungen wiederholt (Versuchsreihe C).

3 Bestimmung des Lastverformungsverhaltens

Das Lastverformungsverhalten der Bauteile unter Berücksichtigung der dynamischen und kinematischen Bedingungen bestimmt die Wahl des statischen Systems und ist somit für die spätere, rechnerische Ermittlung der Beanspruchungen von grundlegender Bedeutung.

Die einwirkenden Vertikal- und Horizontallasten werden an der Fahrbahnoberfläche über den Fahrzeugreifen in die Konstruktion eingeleitet. Unmittelbar beansprucht werden dabei die Mittel- und Randträger.

Die Randträger bleiben wegen ihres klaren Tragverhaltens bei den weiteren Ausführungen unberücksichtigt. Die Mittelträger stellen an den Trag- und Steuerungskonstruktionen weg- und drehelastisch gelagerte Durchlaufträger dar (Bild 8).

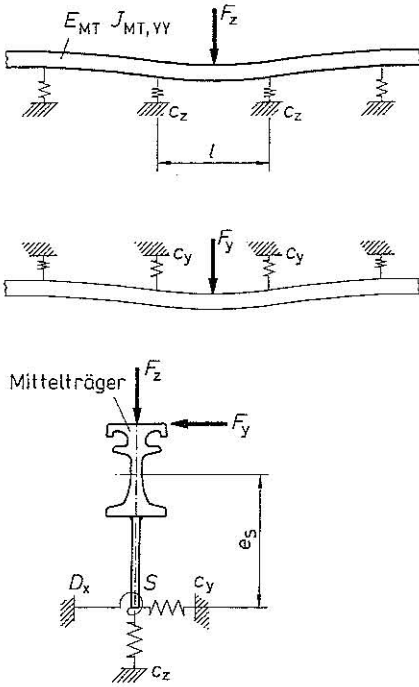


Bild 8. Mittelträger als elastisch gebetteter Durchlaufträger

Tabelle 1. Versuchsreihen

	c_y	$c_y \rightarrow \infty$
D_x	Versuchsreihe A	–
$D_x \rightarrow \infty$	Versuchsreihe B	Versuchsreihe C

Zu klären war die systemabhängige Größe der drei Federkennzahlen c_y , c_z und D_x . Die Federn können wie bereits gesagt, örtlich voneinander getrennt am Mittelträger angreifen.

Die Lagerungselemente für Vertikallasten müssen zur Vermeidung von unzulässigen Verformungen verhältnismäßig steif gewählt werden. Der Vorzug der in der Regel aus einem Elastomer bestehenden Gleitlager gegenüber einer starren Lagerung liegt hauptsächlich im Ausgleich von Baulinien und in der Anpassung an außerplanmäßige Verformungszustände. Für die gebräuchlichen Systeme gilt

$$k = \frac{c_z \cdot l^3}{E_{MT} \cdot I_{MT,yy}} > 100$$

Für die Bemessung der Mittelträger kann daher die vertikale Wegfeder grundsätzlich als starr angenommen werden ($c_z \rightarrow \infty$).

In den Versuchsreihen A, B und C (Tabelle 1) wurden die beiden weiteren Federkonstanten c_y , D_x untersucht.

Versuchsreihe A [8]: Bei den einzelnen Testfahrten wurden die absoluten, vertikalen und horizontalen Mittelträgerverschiebungen w_z und w_y unmittelbar neben der Tragkonstruktion gemessen. Die ermittelten Extremwerte werden in Tabelle 2 aufgelistet und den Ergebnissen verschiedener Vergleichsrechnungen gegenübergestellt (Bild 9):

a) am räumlichen Gesamtsystem, bestehend aus sämtlichen Mittelträgern, Gleitlagerungselementen und Traversen,

b) am räumlichen Teilsystem, bestehend aus einem Mittelträger und den zugehörigen Gleitlagerungselementen und

c) am quasiebenen Teilsystem, bestehend aus einem Mittelträger, der an den Auflagerungspunkten auf Ersatzfedern gelagert ist.

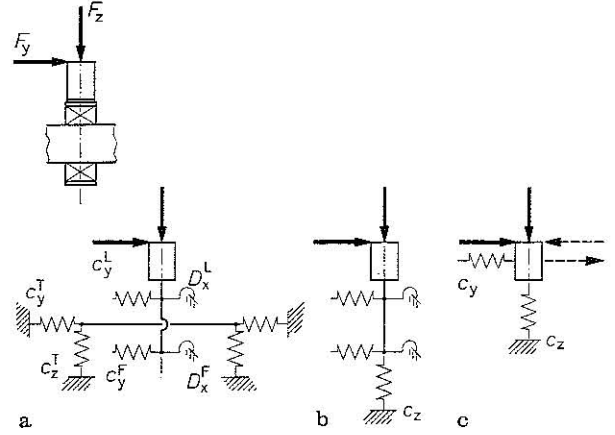


Bild 9. Berechnungsvarianten a, b und c

Tabelle 2. Mittelträgerverschiebungen für Versuchsreihe A (in mm)

Versuch	vertikal		horizontal	
	$w_{z,max}$	$w_{z,min}$	$w_{y,max}$	$w_{y,min}$
scharfes Anfahren	0,80	– 0,70	8,00	– 6,00
scharfes Bremsen	1,20	– 0,65	14,25	– 18,25
Überrollen (70 km/h)	2,40	– 2,00	2,60	– 2,20

Rechnung

	vertikal	horizontal				
	$w_{z,max}$	$w_{y,ext}$	$w_y(Q)$	$w_y(M)$	$w_y(G)$	$w_y(T)$
a.1.)	1,51	± 21,18	+ 3,63	± 10,56	–	± 6,99
b.1.)	0,25	± 14,91	± 4,13	± 10,77	–	–
b.2.)	0,27	± 32,17	± 3,48	± 11,42	17,27	–
c.1.)	0,25	± 19,63	–	–	–	–
c.2.)	0,25	± 26,37	–	–	–	–

$w_y(Q)$ Horizontalverschiebung infolge Schubverformung der Gleitelemente

$w_y(M)$ Horizontalverschiebung infolge Drehverformung der Gleitelemente

$w_y(G)$ Horizontalverschiebung infolge Gleiten der Gleitelemente

$w_y(T)$ Horizontalverschiebung infolge Verformung der Tragkonstruktion

Die Radlasten, die Aufstandsflächen und die Lastverteilung auf die einzelnen Mittelträger wurden anhand der am Testfahrzeug vermessenen und gewogenen Hinterachse in Übereinstimmung mit den geltenden deutschen Vorschriften angesetzt. Die Federkennwerte der Elastomerteile wurden gemäß den Regeln für Brückenlager ermittelt, wobei für die dynamische Versteifung der Multiplikationsfaktor 2,0 angesetzt wurde: $c_{dyn} = 2,0 \cdot c_{stat}$. Die Vergleichsrechnungen wurden für die beiden Varianten

1. Reibung verhindert Gleiten sowie
2. freies Gleiten zwischen Gleitelement und Traverse durchgeführt.

Die Vertikalverformungen werden hauptsächlich durch die Traversendurchbiegung bestimmt, deshalb sind die an den Teilsystemen errechneten Werte wesentlich geringer als die beobachteten. Für die Mittelträgerbemessung ist dieser Unterschied jedoch ohne Bedeutung. Die Ergebnisse zeigen, daß bei Berücksichtigung der Reibung auch für die Horizon-

talverformungen eine ausreichende Übereinstimmung der Systeme a bis c mit den Meßergebnissen erzielt wird. Wegen der durch den koppelnden Reifen erzeugten kinematischen und dynamischen Randbedingungen kann keine ungehinderte Verschiebung der Mittelträger auftreten. Dieser Effekt wird hier durch den Ansatz einer Gleitbehinderung mitberücksichtigt. Die Horizontalverschiebungen werden hauptsächlich durch die Drehnachgiebigkeit der Elastomerteile bestimmt. Da der mehrere Mittelträger koppelnde Reifen dieser Verformung nur unwesentlich entgegenwirken kann, sind die gemessenen Werte entsprechend groß.

Versuchsreihe B [9]. Die absolut und relativ zum benachbarten Mittelträger gemessenen horizontalen Mittelträgerverschiebungen für die einzelnen Testfahrten und unter laufendem Verkehr (2754 LKW-Achsen) werden den Ergebnissen der derzeit in Deutschland gebräuchlichen Berechnungssysteme gegenübergestellt (Tabelle 3). Dabei wird davon ausgegangen, daß die horizontale Lagerung der Mittelträger im wesentlichen von der Steifigkeit der Kette hintereinandergeschalteter Federn der Steuerungskonstruktion abhängt. Die in der Regel sehr weichen Steuerfedern (hier $c_y = f(c_F)$, $c_F = 290 \text{ kN/m}$) führen demzufolge rechnerisch zu sehr großen Horizontalverschiebungen. Vertikalverformungen wurden wegen ihrer geringen Bedeutung für die Bemessung vernachlässigt.

Die Größenordnung der absoluten Verschiebungen unter laufendem Verkehr zeigt die graphische Darstellung der Spitzen-Zählung [10] (Bild 10).

Die Versuchsreihe B zeigt eine deutliche Abweichung der Berechnungsergebnisse für das System (e. s. e). Im Unterschied zum System (e. g. e) kann hier einerseits die Nachgiebigkeit der Steuerfedern erst nach Überwindung der Reibung

Tabelle 3. Mittelträgerhorizontalverschiebungen für Versuchsreihe B (in mm)

Versuch	absolut		relativ	
	$w_{y,max}$	$w_{y,min}$	$w_{y,max}$	$w_{y,min}$
scharfes Anfahren	0,04	- 0,85	0,75	- 0,58
scharfes Bremsen	0,81	- 0,07	0,99	- 0,60
Überrollen (50 km/h)	0,14	- 0,03	0,09	- 0,14
Rechnung	$c_F = 290 \text{ kN/m}$		$c_F = 10000 \text{ kN/m}$	
$c_y = f(c_F)$	$w_{y,abs}$	$w_{y,rel}$	$w_{y,abs}$	$w_{y,rel}$
	$\pm 90,18!$	$\pm 32,75!$	$\pm 4,29$	$\pm 1,47$

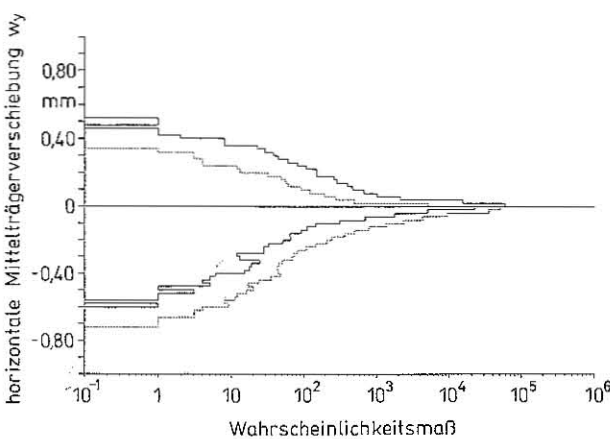


Bild 10. Spitzenzählung [10]

an den Gleitelementen aktiviert werden, andererseits führt die kinematische Kopplung der Mittelträger an den Reifen zu einer Verformungsbehinderung. Hier führt erst die Annahme von $c_F \geq 10000 \text{ kN/m}$ zu annehmbaren Berechnungsergebnissen.

Versuchsreihe C [9]. Die Versuchsreihe B wurde bei Blockierung der Steuerungskonstruktion wiederholt. Wegen der auch ohne Blockierung sehr geringen Horizontalverformungen erübrigt sich eine Gegenüberstellung der Meßwerte.

Die Versuchsreihen A bis C haben gezeigt, daß die statischen Systeme zu realistischen Mittelträgerverformungen führen, wenn

- die z. B. aus Laborversuchen ermittelten „dynamischen“ Verformungswiderstände der Lagerungs- und Steuerungselemente berücksichtigt werden, jedoch
- theoretisch in den Gleitebenen keine Relativverschiebungen angenommen werden.

Für die Praxis ergeben sich zur Bemessung der Mittelträger relativ einfache Durchlaufträgersysteme mit vertikal starren Auflagern und horizontalen fiktiven Ersatzfedern, die in vielen Fällen ebenfalls durch starre Auflager ersetzt werden können. Die Tragkonstruktion muß selbstverständlich unter Berücksichtigung der exzentrischen Lasteinleitung bemessen werden. Hier ergibt die Annahme starrer Lagerungselemente für den Mittelträger realistische und auf der sicheren Seite liegende Beanspruchungen.

Da bereits beim Überrollen der Mittelträger durch eine geeichte LKW-Achse mittels einfachster Meßmethoden die Lagerungsart beurteilt werden kann, empfiehlt sich eine Bestimmung der Ersatzfedersteifigkeit c_H durch einen standardisierten Feldversuch. Dabei wird bei einer bestimmten Achslast sowie konstanter Überfahrgeschwindigkeit die horizontale Auslenkung der Mittelträger und damit die fiktive Federsteifigkeit c_H bestimmt. In [11] wird bereits ein entsprechender Nachweis geregelt.

4 Bauteilbeanspruchungen

Im Rahmen theoretischer Untersuchungen wurde immer wieder auf das spezielle dynamische Tragverhalten von „elastisch“ gelagerten Übergangskonstruktionen hingewiesen. Die stoßartig einwirkenden Verkehrslasten werden durch die Lagerungselemente abgedämpft. Am Beispiel des Einmassenschwingers wurden Berechnungsmodelle hergeleitet, die infolge bestimmter Einwirkungen in Abhängigkeit von angeregter Masse, Mittelträgerspannweite und den elastischen Eigenschaften der Lagerungselemente mehr oder minder reduzierte Systemantworten und somit Beanspruchungen ausweisen.

Grundlegender Fehler dabei war vor allem für Horizontalkrafteinwirkungen die Nichtbeachtung der kinematischen Bedingungen. Im Einwirkungszeitraum wird das dynamische Lastverformungsverhalten im wesentlichen durch die Kinematik des den Mittelträger berührenden und an ihn starr koppelnden Reifenlatschs bestimmt. Nur im darauffolgenden Zeitraum der freien Schwingung können die Dämpfungseigenschaften, dort allerdings sehr effektiv, genutzt werden.

Während die Maximalbeanspruchungen somit von den elastischen Eigenschaften nahezu unabhängig sind, bewirkt die elastische Lagerung einen sehr schnellen Abbau der Nachschwingungen und somit eine Reduzierung der Schadensakkumulation. Diese wirkt sich äußerst günstig auf die Ermüdungsfestigkeit aus.

Für die Versuchsreihen B und C wurden für die einzelnen Testfahrten und unter laufendem Verkehr Bauteilbeanspru-

chungen ermittelt. Dadurch kann eine eindeutige Aussage über das Zusammenspiel zwischen äußerer Einwirkung und Bauteilbeanspruchung gemacht werden.

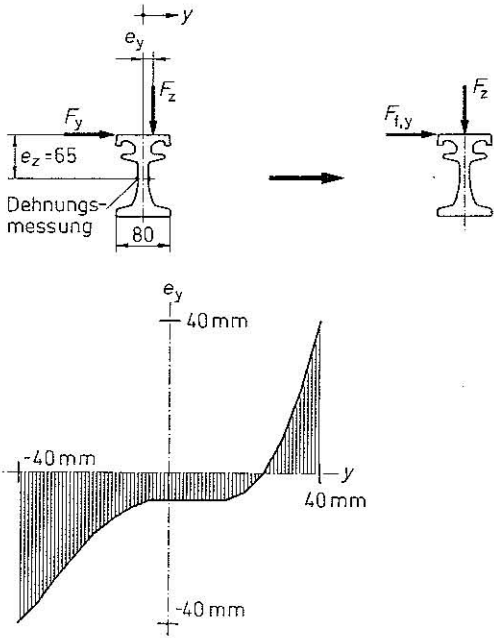


Bild 11. Exzentrizität e_y als Polynom fünften Grades.
 $A = -7,00000 E + 00$, $B = -1,86935 E - 02$,
 $C = -1,26706 E - 02$, $D = 7,89471 E - 04$,
 $E = 1,06535 E - 05$, $F = -9,54925 E - 08$

Gemessen wurden durch Dehnmeßstreifen die Auflagerreaktionen des Mittelträgers an zwei benachbarten Tragkonstruktionen und die Biegebeanspruchung der Mittelträger in Feldmitte zwischen den beiden Auflagern. Zur Eichung wurde die genaue Lage der Dehnmeßstreifen fixiert und im Laborversuch Umrechnungsfaktoren zwischen Dehnungsmessung und Auflagerreaktion bestimmt. Die Faktoren sind unabhängig von der Lage der einwirkenden Achslast. Durch einen Vergleich der Auflagerreaktionen an den benachbarten Tragkonstruktionen konnte auch eine Aussage über die Lage der einwirkenden Achse gemacht werden.

- die Stützfahrt, d. h. ein Rad der Achse lag oberhalb der Tragkonstruktion 4, und
- die Feldfahrt, d. h. ein Rad der Achse lag genau in der Mitte zwischen den Tragkonstruktionen 3 und 4.

Die Numerierung T3 und T4 bezieht sich dabei auf die Zahl der vom benachbarten Schrammbord bis zur Meßstelle vorhandenen Tragkonstruktionen.

Durch Addition bzw. Subtraktion der Dehnungen der 4 Dehnmeßstreifen im Mittelträgersteg konnten die Auflagerreaktionen A_z , M_y und M_x bestimmt werden. M_x setzt sich dabei aus den Anteilen $F_y \cdot e_z$ und $F_z \cdot e_y$ zusammen. Die Maxima der Funktionen $F_y(t)$ und $F_z(t)$ weisen eine zeitliche Phasenverschiebung auf. Durch Näherungslösung [9, 12] wurde der Zusammenhang

$$e_y = A + B \cdot y + C \cdot y^2 + D \cdot y^3 + E \cdot y^4 + F \cdot y^5$$

ermittelt (Bild 11).

Anhand dieser Annahme kann das gemessene Moment M_x in die Anteile $F_z \cdot e_y$ und $F_y \cdot e_z$ zerlegt werden. Den

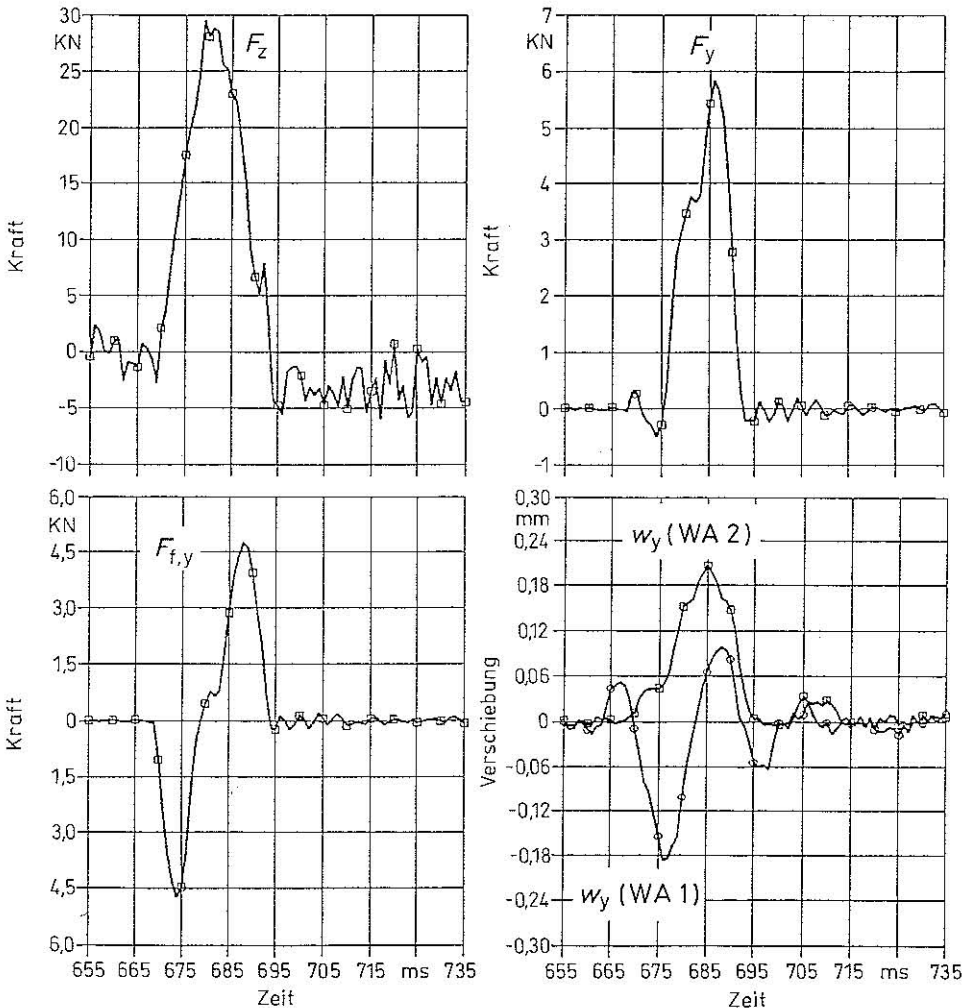


Bild 12. Zeitverläufe von F_z , F_y , $F_{f,y}$ und w_y

Messungen kann somit die einwirkende Horizontalkraft F_y und die die Exzentrizität der Vertikallast mitberücksichtigende fiktive Horizontalkraft $F_{f,y}$ entnommen werden, wobei

$$F_{f,y}(y) = F_y(y) + F_z(y) \cdot e_y(y)/e_z$$

gilt. Die zeitlichen Verläufe von F_z , F_y , $F_{f,y}$ und w_y sind beispielhaft für den Überrollvorgang durch die Hinterachse des Testfahrzeugs in Bild 12 wiedergegeben. Bild 13 zeigt den zeitlichen Verlauf von $F_{f,y}$ für den Brems- und Anfahrvorgang.

Die bei den Testfahrten gemessenen Extremwerte der Einwirkungen sind der Tabelle 4 zu entnehmen, wobei in jedem Falle die Stützfahrt, bei der ein Rad über der Tragkonstruktion stand, maßgebend war. Zur Bestimmung des Spaltweiteinflusses wurden die Überrollversuche auch bei einer künstlich veränderten Einzelspaltweite von 60 statt der vorhandenen 40 mm durchgeführt. Die Ergebnisse werden den nach den rechnerisch ermittelten, theoretischen Beanspruchungen gegenübergestellt (gemessene Achslast 117 kN; Schwingbeiwert $\varphi = 1,4$; Lastanteile je Mittelträger 51% vertikal, 50% horizontal; $F_y = 0,60 \cdot F_z$). Dabei wird wie in Abschn. 3 zwischen der theoretisch sehr nachgiebigen „elastischen“ und der praktisch beobachteten „starr“en Horizontallagerung unterschieden. Derselbe Rechengang wird auch für die nach DIN 1072 geregelten Achslasten des SLW 60 und die Lastverteilung nach ZTV-K durchgeführt.

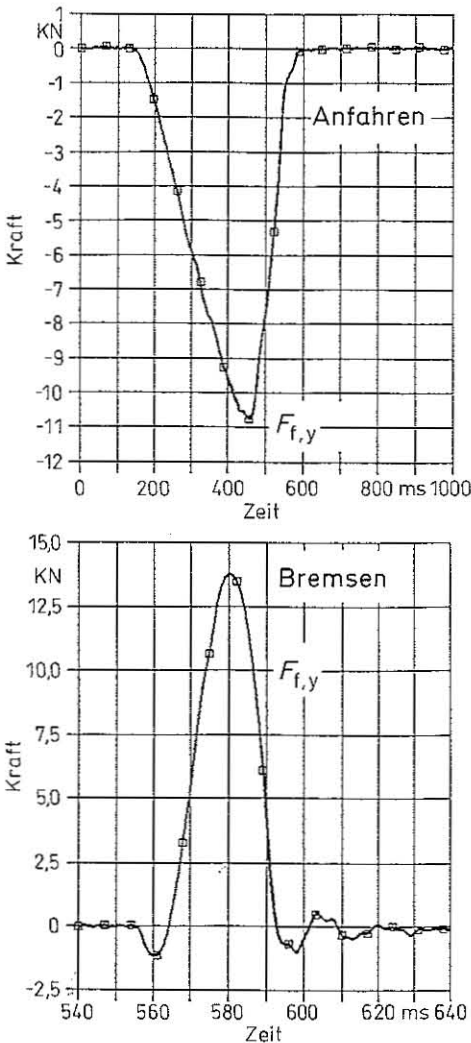


Bild 13. Zeitverläufe von $F_{f,y}$

Tabelle 4. Auflagerreaktionen für Versuchsreihe B und C

Auflagerreaktionen	F_z [kN]	$F_{f,y}$ [kN]	F_y [kN]	F_z [kN]	$F_{f,y}$ [kN]	F_y [kN]
Versuch						
Steuerung	elastisch (Reihe B)			starr (Reihe C)		
Stand	30,87			30,87		
Anfahren	29,31	-10,97		28,39	-10,48	
Bremsen	28,97	13,58		28,67	14,98	
Überrollen ($s = 40$ mm)	29,57	4,65	5,79	29,63	5,13	5,31
Überrollen ($s = 60$ mm)	29,46	4,46	5,56			
Rechnung						
$c_y = f(c_F)$	$c_F = 290$ kN/m		$c_F = 10000$ kN/m			
Achse	36,58	9,30		36,58	14,70	
Einzelrad	36,30	6,14		36,30	12,70	
DIN 1072	73,57	10,33		73,57	16,33	

Die Versuche wurden mit Achslasten durchgeführt, die über den in Deutschland zulässigen liegen. Folgende Schlüsse können aus dem Vergleich gezogen werden:

- Der Vergleich der Auflagerreaktion im Stand $F_z = 30,87$ kN mit dem Radlastanteil je Mittelträger von 29,84 kN rechtfertigt für die Stützstellung des Rades die Gleichsetzung der gemessenen Auflagerbeanspruchung mit der Radlasteinwirkung je Mittelträger. Dies gilt wegen der vernachlässigbaren Verformungen auch für die Horizontallasten. Die Rechnung zeigt, daß es keinen wesentlichen Einfluß des zweiten Rades der Achse gibt.
- Wie bei den Verformungen bestätigt sich auch bei den Beanspruchungen, daß es keinen wesentlichen Unterschied zwischen den verschiedenen „elastischen“ Lagerungsarten gibt.
- Die laut Rechnung etwas höheren Auflagerreaktionen sind auf die bei den versuchstechnisch bedingten Geschwindigkeiten von 50 km/h des Testfahrzeugs geringeren Schwingbeiwerte ($\varphi = 1,2$) zurückzuführen.
- Die maximal zu erwartenden Horizontallasten werden für Gebrauchslasten mit 60% der statischen Vertikallast und 50% Lastanteil je Mittelträger richtig abgeschätzt.
- Es ist kein merklicher Unterschied in den Auflagerreaktionen zwischen einer Spaltweite von 40 und 60 mm festzustellen.
- Die Beanspruchungen können an einfachen statischen Systemen zuverlässig aus den Einwirkungen errechnet werden. Voraussetzung ist der richtige Ansatz des Lastverformungsverhaltens, eine falsche Systemwahl kann wie das „elastische“ System im vorliegenden Falle geringere und somit auf der unsicheren Seite liegende Beanspruchungen ergeben.

5 Beanspruchungs- und Einwirkungskollektive

Maßgebend für die Bemessung von Übergangskonstruktionen ist die Ermüdungsfestigkeit der einzelnen Bauteile. Zur richtigen Beurteilung benötigt man die genaue Kenntnis der Beanspruchungskollektive, d. h. der Häufigkeit, mit welcher die einzelnen Beanspruchungsniveaus auftreten. Aus diesem Grunde wurden die Versuchsreihen B und C an einer der am stärksten durch Schwerlastverkehr beanspruchten Autobahnen Deutschlands, der A61 zwischen Köln und Koblenz, durchgeführt. Für die zwei Fahrspuren beider Fahrtrich-

tungen beträgt zur Zeit der KFZ-DTV-Wert ca. 50 000 Fahrzeuge/Tag, der LKW-DTV-Wert ca. 13 000 LKWs/Tag. Neben den Testfahrten wurden unter laufendem Verkehr bei der Verkehrscharakteristik nach Tabelle 5 die Bauteilbeanspruchungen aufgezeichnet. Am Tag der Messungen wurde das Verkehrsaufkommen nach Bild 14 registriert.

Nach der Digitalisierung und Bereinigung der insgesamt $4 \cdot 10^8$ Meßdaten wurden die Meßwertverläufe getrennt über eine Spitzenwertzählung klassiert. Aus den Meßwertverläufen wurden für jeden Zeitschnitt Z_i (Takt 0,5 ms) analog zu den Testfahrten die Beanspruchungen ermittelt. Die Schnittgrößenverläufe wurden nach dem Rainflow-Verfahren klassiert. Dem Konzept z. B. des Eurocode 3 folgend, nach dem ein Mittelspannungseinfluß nicht zu berücksichtigen ist, wurden nur die Amplituden bzw. Schwingweiten ohne Berücksichtigung der Mittellagen ermittelt [10]. Den Überlegungen nach Abschnitt 4 folgend entsprechen die Kollektive der Auflagerreaktionen den Radlasteinwirkungskollektiven je Mittelträger. In Bild 15 sind die Häufigkeitslinien der Schwingweiten der Einwirkungen dF_z und dF_y für die Versuchsreihe B (Linie a), Versuchsreihe C (Linie b) und einer unabhängig davon an einem System (s. s. s) durchgeführten Messung [13] (Linie c) wiedergegeben. Überraschend ist die hervorragende Übereinstimmung der getrennten Untersuchungen an unterschiedlichsten Systemen. Unter Berücksichtigung des hier generell anzusetzenden Lastanteils von 50% je Mittelträger und wegen der Übereinstimmung von Einwirkung und Beanspruchung kann deshalb daraus ein einheitliches Radlastkollektiv ermittelt werden. Zu berücksichtigen ist, daß es sich in der Darstellung um Schwingwei-

Tabelle 5. LKW-Arten und -Anzahl im Messungszeitraum

Versuchsreihe	B (140 Minuten)		C (143 Minuten)	
	Anzahl	Achsen	Anzahl	Achsen
2-Achser	121	242	103	206
3-Achser	20	60	24	72
4-Achser	136	544	134	536
5-Achser	366	1830	321	1605
6-Achser	9	54	11	66
7-Achser			2	14
9-Achser			1	9
Sonstige	12	24	8	16
Durchschnitt/LKW	4,15		4,18	
Gesamt	2754		2524	

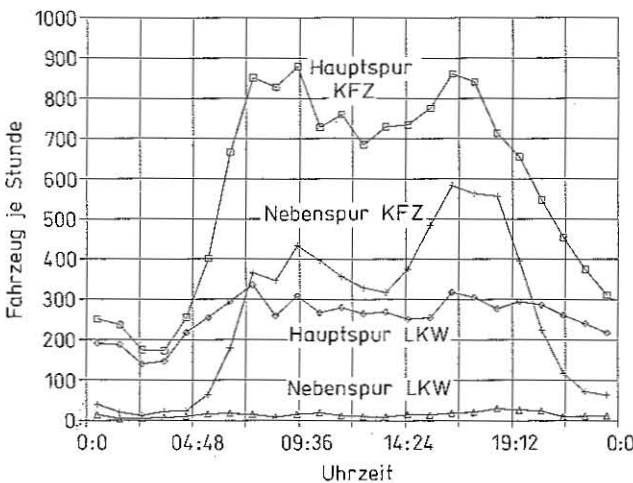


Bild 14. Verkehrsaufkommen

ten und nicht um Extremwerte handelt. Zum Vergleich sind in Tabelle 6 die gemessenen Extremwerte den Rechenergebnissen nach DIN 1072 und ZTV-K gegenübergestellt.

Für den Mittelträgersteg wurden auch die Spannungskollektive ermittelt. Die Maximalwerte der gemessenen Spannungen sind um mindestens 17,5% geringer als die rechnerisch aus den Einwirkungen F_z und F_y über die den Auswertungen zugrunde liegenden Umrechnungsgesetze ermittelten (Tabelle 7). Grund dafür ist die Phasenverschiebung der Zeitfunktionen $F_z(t)$ und $F_y(t)$ sowie eine zeitliche Unabhängigkeit der Ereignisse $F_{z,max}$ und $F_{y,max}$. Diese begünstigenden Effekte sind bauteilabhängig und daher nicht zu verallgemeinern.

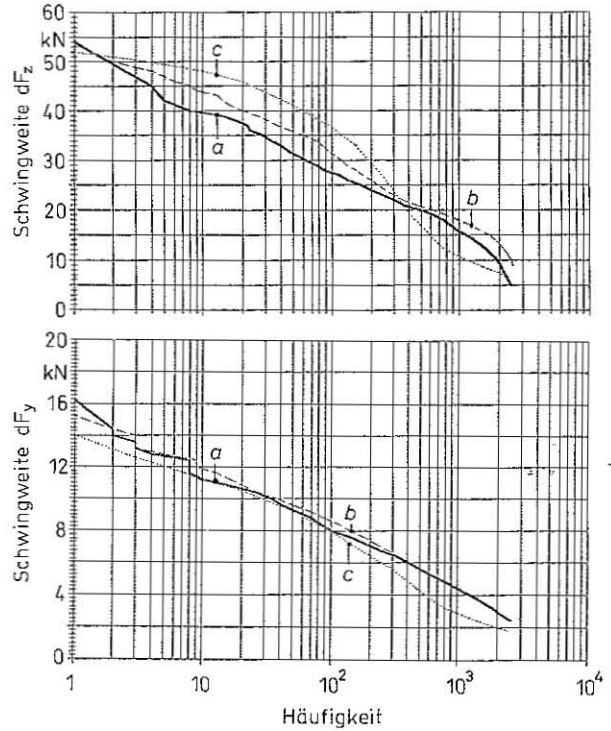


Bild 15. Schwingweiten dF_y und dF_z

Tabelle 6. Extrembeanspruchungen

	F_z [kN]	F_y [kN]	F_z [kN]	F_y [kN]
Versuchsreihe	B		C	
Steuerung	elastisch		starr	
Maximum	49,20	7,39	48,10	8,86
Minimum	- 5,32	- 7,83	- 5,90	- 7,39
Berechnung nach DIN 1072 und ZTV-K 88				
$c_y = f(c_F)$	$c_F = 290$ kN/m		$c_F = 10000$ kN/m	
Maximum	50,40	2,59	50,40	4,88

Tabelle 7. Stegspannungen σ_z im Mittelträger

	σ_z [N/mm ²]	σ_x [N/mm ²]	σ_z [N/mm ²]	σ_x [N/mm ²]
Versuchsreihe	B		Rechnung C	
Steuerung	elastisch		starr	
Maximum	32,50	43,99	39,00	49,72
	73,88%		78,43%	
Minimum	- 51,50	- 62,39	- 55,80	- 67,42
	82,55%		82,76%	

6 Bauteilbemessung

Für eine zuverlässige Bauteilbemessung ist ein Tragsicherheits- und Ermüdungsfestigkeitsnachweis erforderlich. Für beide Nachweise ist eine realistische Systemannahme Grundvoraussetzung. Den Überlegungen nach Abschnitt 3 folgend empfiehlt sich im Zweifelsfalle eine versuchsmäßige Ermittlung des Lastverformungsverhaltens, z. B. nach [11]. Für Konstruktionen, bei denen die Mittelträger starr mit der Tragkonstruktion verbunden sind, können die Schnittgrößen unabhängig von der Steuerungskonstruktion an starr gelagerten Durchlaufträgersystemen ermittelt werden. Bei dreh- und wegeelastisch gelagerten Mittelträgern kann die Nachgiebigkeit der Verbindung berücksichtigt werden, doch steht der Rechenaufwand in keiner Relation zum erzielten Ergebnis. Vor allem deshalb, weil an den für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis relevanten Bauteilen eine starre Lagerung zu rechnerisch höheren und somit auf der sicheren Seite liegenden Ergebnissen führt.

Der Tragsicherheitsnachweis kann mit den Radlasten nach DIN 1072 geführt werden. Allerdings sind die dort genannten fiktiven Ersatzlasten des SLW 60 überhöht und entsprechen nicht, wie die Messungen zeigen, den nationalen Achslastbegrenzungen. Für den Nachweis der Mittelträger ist sinnvollerweise das im Stahlbau übliche Verfahren EP anzuwenden, d. h. den am elastischen System ermittelten Beanspruchungen sind die plastischen Widerstände gegenüberzustellen. Bei der Ermittlung der Radlastanteile für die einzelnen Mittelträger ist zu berücksichtigen, daß sich mit zunehmender Radlast der Reifenlatsch vergrößert. Die in den ZTV-K genannten maximalen Anteile von vertikal 60% für den SLW 60 bzw. 75% für den SLW 30 und die 130-kN-Achse sowie horizontal generell 50% entsprechen den Ergebnissen nach [14] bei einer Einzelspaltweite von 80 mm.

Der Ermüdungsfestigkeitsnachweis wird in Deutschland durch einen Dauerfestigkeitsnachweis mit den in den ZTV-K geregelten Ersatzlasten geführt. Der Vergleich der daraus ermittelten Beanspruchung mit den Widerständen nach DS 804 führt zwar bei richtiger Systemannahme wahrscheinlich zu sicheren Ergebnissen aber wegen der Vermischung von zwei unabhängigen Regelwerken und durch willkürlich festgelegte Abminderungsfaktoren zu einer falschen Beurteilung der Konstruktion. Eine genaue Aussage ist wegen der bauteilabhängig unterschiedlichen Auswirkungen nicht möglich. Wenn das Verfahren der DS 804 gewählt wird, muß auch auf der Beanspruchungsseite eine äquivalente Ersatzlast unter Berücksichtigung der Streckenbelastung, der realistischen Kollektivform, der Teilsicherheit auf der Einwirkungsseite, der festzulegenden Lebensdauer usw. bestimmt werden. Aus heutiger Sicht ist es zweckmäßiger, einen Betriebsfestigkeitsnachweis mit dem Verfahren nach EC3 [7] zu führen. Als Grundlage dafür können die Radlastanteilkollektive nach Bild 15 verwendet werden. Zur Vereinfachung kann die in Deutschland maximal zu erwartende Streckenbelastung als Bemessungsgrundlage herangezogen werden, wobei eine Zweiteilung in hochbelastete und mäßig belastete Strecken sowohl sachlich als auch wirtschaftlich gesehen anzustreben wäre. In beiden Fällen wäre dann bei Kenntnis der Bauteilwiderstände eine bauwerksunabhängige, typisierte Bemessung möglich.

Die Ermüdungsfestigkeit der Bauteile von Übergangskonstruktionen ist keine lineare Querschnittsfunktion. Deshalb kommt der in [6] vorgeschlagenen versuchsmäßigen Ermittlung der Widerstände eine ebenso große Bedeutung zu.

7 Ausblick

Die in den einzelnen Versuchsreihen ermittelten charakteristischen Werte der Einwirkung dienen als Grundlage für eine schlüssige und sichere Bemessungsmethode. In [15] wird anhand dieser Untersuchungen ein Vorschlag für eine Bemessungsvorschrift von Übergangskonstruktionen gemacht. Es ist anzustreben, mit diesen Ansätzen sämtliche am Markt befindlichen Übergangskonstruktionen einer Regelprüfung zu unterziehen. Dieses Verfahren würde die heute teilweise sehr zäh, weil bauwerksabhängig verlaufende Prüfung erleichtern und vor allem der Ausführungsqualität dienen. In jedem Falle ist das heute gängige Bemessungsverfahren zu überdenken. Nicht zu vergessen und vielleicht sogar ein Ansporn ist dabei das vereinte Europa mit einer Menge von neuen Vorschriften und Produkten.

Abschließend sei hiermit Univ. Prof. Dr. F. Tschemmerneegg und Dipl. Ing. A. Pattis vom Institut für Stahl- und Holzbau, Univ. Prof. Dr. J. Majer und Dr. G. Niederwanger vom Institut für Festigkeitslehre und Flächentragwerke, alle Universität Innsbruck, sowie Dr. P. Heuler von der IABG, Ottobrunn, Dank für die fachliche Unterstützung ausgesprochen.

Literatur

1. DIN 1072: Straßen- und Wegbrücken; Bemessung, Konstruktion, Herstellung. Ausg. 12.1985
2. ZTV-K 88: Teil 9.3, Übergänge. Der Bundesminister für Verkehr, Ausg. 1989
3. DS 804: Vorschrift für Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke. Deutsche Bundesbahn, Ausg. 1983.
4. König, G.; Gerhardt, H.-C.: Verkehrslastmodell für Straßenbrücken. Bauingenieur 60 (1985) 405-409.
5. Sedlacek, G.; Jacquemoud, J.: Herleitung eines Lastmodells für den Betriebsfestigkeitsnachweis von Straßenbrücken. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 430, 1984
6. Tschemmerneegg, F.: Zur Bemessung von Fahrbahnübergängen. Bauingenieur 63 (1988) 455-461.
7. Eurocode 3: design of steel structures. Teil 1, 1989.
8. Untersuchungen an einer Schwenktraversenkonstruktion der Werratalbrücke bei Hedemünden im Zuge der A7 (BW Nr. 151). Inst. f. Festigkeitslehre und Flächentragwerke, Univers. Innsbruck 1990
9. Bericht über die Messungen am Fahrbahnübergang der Nettetalbrücke der Autobahn BAB61. Inst. f. Stahl- und Holzbau, Univers. Innsbruck 1991
10. Auswertung von Beanspruchungsmessungen am Fahrbahnübergang einer Autobahnbrücke. Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH, Ottobrunn 1991
11. RVS 15.451: Brückenausrüstung, Übergangskonstruktionen. Forschungsgesellschaft für das Verkehrs- und Straßenwesen, Wien, Entwurf 1991
12. Pattis, A.: Auswertung von Messungen an einem Fahrbahnübergang. Diplomarb. a. Inst. f. Stahl- und Holzbau, Univers. Innsbruck 1990
13. Belastungsversuche mit einer zwillingsbereiften LKW-Achse an einer Dehnfugenkonstruktion zur Bestimmung der Radlastverteilung auf die Lamellen. Prüfamf für Bau von Landverkehrswegen, Bericht Nr. 1230. TU München 1988
14. Tschemmerneegg, F.: Messung von Vertikal- und Horizontallasten beim Anfahren, Bremsen und Überrollen von Fahrzeugen auf einem Fahrbahnübergang. Bauingenieur 48 (1973) 326-330
15. Tschemmerneegg, F.: Design of modular expansion joints. Third World Congress on Joint Sealing and Bearing Systems for Concrete Structures, Toronto 1991.