

Bremsversuch auf der Eisenbahnhochbrücke Hochdonn

Ronald Stein¹, Volkmar Quoos²

Zusammenfassung: Die Lasten aus Bremsen und Anfahren haben einen bedeutenden Einfluss auf die Bemessung der Rahmentragwerke und Fundamente der Eisenbahnhochbrücke Hochdonn. Aufgrund der durchlaufenden Schienen und der Reibung in den Lagern der Einhängeträger stellt sich eine günstige Verteilung der Brems- und Anfahrlasten auf mehrere Bauwerke ein, die für die statische Nachrechnung berücksichtigt wurde. Zur Absicherung der theoretischen Untersuchungen wurde 2008 ein Bremsversuch mit umfangreichem Messprogramm durchgeführt.

Abstract : The horizontal forces due to braking and traction of trains have significant influence on the design of the frame structures and foundations of the Hochdonn railway bridge. Due to the continuous rails and friction in the bearings a favourable distribution of brake and traction loads within the structure is present, which can be taken into account in the structural analysis. In 2008 a brake test with a comprehensive monitoring program was carried out to approve the analytical investigations.

¹ Dipl.-Ing. Ronald Stein, GMG Ingenieurgesellschaft mbH, George-Bähr-Straße 10, 01069 Dresden

² Dipl.-Ing. Volkmar Quoos, DB-Netz AG, Zentrale, Fahrwegmessung, Brückenmessung und -bewertung (I.NPT 2 (F)), Lüttgen-Salbker-Weg, 39122 Magdeburg

Einleitung

Die Eisenbahnhochbrücke über den Nord-Ostsee-Kanal in Hochdonn ist mit einer Gesamtlänge von 2.218 m nach der Eisenbahnhochbrücke in Rendsburg gegenwärtig die zweitlängste Eisenbahnbrücke Deutschlands. Sie wurde im Zuge der Kanalerweiterung in den Jahren 1912-13 geplant und in den Jahren 1915 - 1920 als genietete Stahlkonstruktion erbaut. Der Brückenzug besteht aus 19 rahmenartigen Fachwerk-Kragträgern und 20 Einfeldträgern. Die beiden sogenannten Eilersrahmen³ bilden zusammen mit dem Schwebeträger das Kanalbauwerk mit einer lichten Breite von ca. 143 m und einer lichten Höhe von ca. 42 m. Die auf den Kragträgern aufgelagerten kürzeren Einhängeträger werden als Blechträger bezeichnet. Die Brücke überführt die Strecke Hamburg-Westerland zweigleisig mit einer offenen Fahrbahn.

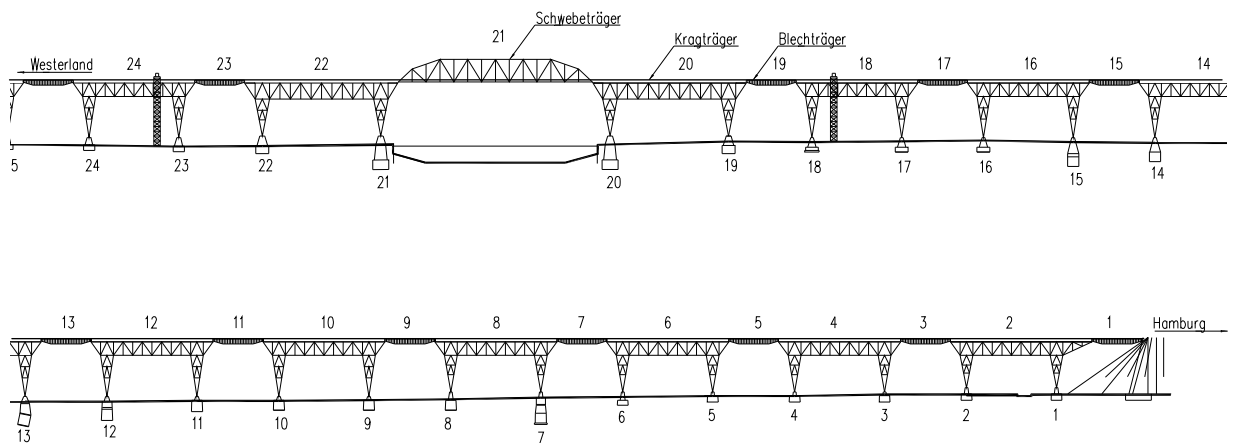


Bild 1: Eisenbahnhochbrücke Hochdonn, südliche Rampe, Ansicht von Westen

Fig. 1: Hochdonn railway bridge, southern ramp, west elevation

Das Bauwerk befindet sich, wie alle Eisenbahnbrücken über den Nord-Ostsee-Kanal, in der Verwaltung des WSV Kiel-Holtenau, während der Oberbau zur DB Netz AG gehört.

In den letzten Jahren wurde eine statische Nachrechnung der Brücke nach Richtlinie 805 [1] für die Lastenzüge D4 eingleisig und D2 / DRZ (definierter Reisezug) durchgeführt. Gegenüber der ursprünglichen Bemessung der Brücke für den preußischen Lastenzug A mit einer Bremslast = $1/7$ der vertikalen Lasten (in beiden Gleisen angesetzt) sind gemäß [1] die horizontalen Einwirkungen mit $1/4$ der vertikalen Lasten des Lastenzuges auf einem Gleis + 600 kN Anfahrlast im Nachbargleis anzusetzen. Dies führt zu ca. 40 % höheren horizontalen Beanspruchungen auf die Bauwerke. Für die Bemessung der Rahmenstiele und

³ Die beiden etwas größer ausgeführten Rahmentragwerke beiderseits des Kanals werden nach der ausführenden Baufirma Louis Eilers als Eilersrahmen bezeichnet, alle anderen als (normale) Kragträger

Fundamente waren Überlastungen abzusehen. Deshalb wurden – in Anlehnung an das Vorgehen bei der Nachrechnung der Eisenbahnhochbrücke in Rendsburg [2] – die günstige Längsverteilung der horizontalen Kräfte auf mehrere Bauwerke durch die Schiene und Reibung in den Lagern der Einhängeträger rechnerisch berücksichtigt.

An einem nichtlinearen Berechnungsmodell der gesamten Brücke wurde für verschiedene Lastenzüge und unter Variation aller wesentlichen Eingangsparameter die Längsverteilung aus Bremsen und Anfahren rechnerisch untersucht. Daraus wurde für alle Bauwerke ein einheitlicher Abminderungsfaktor für Bremsen von $\xi^* = 0,6$ und für Anfahren von $\xi^* = 0,4$ abgeleitet und anschließend mit diesen Werten die statische Nachrechnung durchgeführt.

Für diese Vorgehensweise, die sich an Abschnitt 5.5 der DS 804 orientierte, musste aufgrund der abweichenden Bauweise mit der offenen Fahrbahn und der schwimmenden Lagerung des Oberbaues eine ZiE [3] erwirkt werden. Darin wurde als Bedingung für die Anwendung der Abminderungsfaktoren ξ^* und damit für die Gültigkeit der statischen Nachrechnung die Bestätigung der theoretisch ermittelten Längsverteilung der Bremskräfte durch Messungen am Bauwerk gefordert.

Diese Messungen wurden im Rahmen des sogenannten Bremsversuches vom 13.05.2008 bis 17.05.2008 durch die DB Netz AG durchgeführt [4]. Die Leitung des Bremsversuches lag in den Händen des Bauherren WSA. Die Durchführung des Bremsversuches erfolgte durch die DB Netz AG, Niederlassung Nord, die Durchführung der Messungen durch die DB-AG I.NPT2(F). Die Konzeption und die Auswertung der Messungen erfolgte durch die GMG Ingenieurgesellschaft mbH.

An der Eisenbahnhochbrücke in Rendsburg wurde 2001 mit den gleichen Beteiligten ein ähnlicher Bremsversuch erfolgreich durchgeführt. Die konstruktiven Unterschiede der Tragwerke, insbesondere die sehr unterschiedliche Einflusslänge für horizontale Lasten (Rendsburg ca. 40 m, Hochdonn ca. 107 m) sowie die unterschiedliche Konstruktion des Oberbaues ließen eine einfache Übertragung der Erkenntnisse von Rendsburg nach Hochdonn jedoch nicht zu.

Durch die Nutzung der Erfahrungen in Organisation und Messkonzeption sowie der Fortschritte in der Messtechnik konnte der Bremsversuch in Hochdonn effektiv und erfolgreich durchgeführt werden. Die Fragen zur Längsverteilung der Bremskräfte auf die einzelnen Rahmen und insbesondere auch die Fragen zur Funktion des neuen Oberbaues konnten mit den Messdaten des Bremsversuches umfassend geklärt werden.

Konzeption der Messungen und Durchführung des Belastungsversuchs

Zur Ermittlung der Längsverteilung der Bremslasten wurden im Rahmen der Messungen zwei Ansätze verfolgt und umgesetzt.

Zum Ersten sollten die horizontalen Auflagerkräfte infolge Bremsen möglichst direkt gemessen und den Ergebnissen der theoretischen Voruntersuchungen gegenübergestellt werden. Entscheidend hierbei ist nicht unbedingt die Messung der absoluten Größe, sondern die Form der Verteilung der horizontalen Auflagerkräfte infolge Bremsen im Brückenzug. Der Auswahl geeigneter Bauteile zur Messung dieser Längsverteilung fiel daher eine große Bedeutung zu. Diesem ersten Ansatz dienten im Wesentlichen die Dehnmessstreifen (DMS) an den Stützenstielen und die Verschiebungsmesspunkte (Lasermessköpfe auf Stativen nebst Reflektoren am Bauwerk) an den Rahmenriegeln.

Von etwas nachgeordneter Bedeutung waren die Messungen zur Klärung der Verteilungswege der Bremskraft und der Beanspruchungen innerhalb des Fahrbahnsystems. Diesem Zweck dienten die Messpunkte an der Schiene, die Messung der Relativverschiebung zwischen Oberbau und Tragwerk und die Messung der Lagerwege. Bei diesem zweiten Ansatz ging es darum, die Eingangsparameter und Berechnungsannahmen der theoretischen Untersuchungen zu überprüfen.

Der Aufwand für die Durchführung der Messungen zum Bremsversuch war aufgrund der Länge des Bauwerks erheblich. Bei der Konzeption der Messungen war im Sinne einer wirtschaftlich sinnvollen Durchführbarkeit darauf zu achten, dass die Erreichbarkeit aller Messpunkte ohne Einrüstung gegeben war. Bezüglich der Anzahl der Messpunkte und der geometrischen Ausdehnung der Messanlage wurde in enger Abstimmung aller Beteiligten ein Kompromiss gefunden, welcher technisch umsetzbar war und den Anforderungen der Messaufgabe in vollem Maße gerecht wurde.

Die Messungen erfolgten in zwei Bauwerksbereichen, der Bereich am Kanalbauwerk (Bauwerke 14 bis 22) mit einer Gesamtlänge von ca. 620 m und der Bereich am südlichen Widerlager (Bauwerke 1 bis 4) mit einer Gesamtlänge von ca. 200 m. Der lichte Abstand zwischen den beiden Messbereichen betrug ca. 540 m.

Insgesamt wurden 89 Messpunkte an 9 Bauwerken installiert. Bei allen durchgeführten Messungen wurden die Messdaten aller Messpunkte simultan aufgezeichnet. Die Messdaten wurden dezentral in den beiden Bauwerksbereichen erfasst und über Glasfaserkabel an die Basisstation geleitet.

An den **Stützenstielen** wurden **DMS** jeweils etwas oberhalb der Stabmitte an den Diagonalen der Querwände appliziert. Der Querschnitt ist einfach und ohne Nietenfluss, die Biegung ist gering. Die Messpunkte konnten von einer Arbeitsbühne aus erreicht werden.

Die Beanspruchung der Querwanddiagonalen aus vertikalen Lasten sind wesentlich höher als die aus Bremslasten. Bei Bremspositionen direkt über dem Messpunkt, d.h. bei maximaler

Beanspruchung aus Bremsen, überlagern sich beide Beanspruchungen. Die Trennung der Lastanteile gelingt mit Hilfe einer Frequenzweiche jedoch relativ gut. Zur Feststellung und Quantifizierung von Biegeeinflüssen im Fachwerk-Gitterstab wurden in einer Bauwerksachse insgesamt 7 DMS installiert, in insgesamt 9 weiteren Bauwerksachsen jeweils 1 Messpunkt.

Zur Messung der **Verschiebungen der Rahmenriegel** wurden **Lasermessgeräte** (Vibrometer) eingesetzt. Die Basisstationen wurden am Boden aufgebaut. Gemessen wurden neben der Verschiebungen der Fachwerkrahmen in Höhe der Untergurte auch die Kopfverschiebungen zweier besonders hoher Fundamentkörper. Mit den eingesetzten Geräten ist die Messung der Verschiebungen mit sehr hoher Genauigkeit und hoher Abtastrate möglich, so dass auch der geringe Einfluss sehr weit entfernter Bremsungen noch erfasst werden kann. Ein weiterer Vorteil der Messung der horizontalen Verschiebungen besteht darin, dass diese Größe relativ unabhängig von den vertikalen Lasten ist.

Durch Messung der **Relativverschiebung** zwischen **Fahrbahn** und **Schiene** erfolgte mit **Wegaufnehmern**, die auf Stativen an den Querträgern befestigt wurden und gegen einen unter die Schiene geklebten Anschlag messen. Zusätzlich wurde die Bewegung in einem Stoß der Führungsschienen sowie die Bewegung der Schienen auf dem Damm gemessen.

Die Messung der **Lagerbewegungen** erfolgte ebenfalls mit Hilfe von **Wegaufnehmern**, welche an den längsverschieblichen Reibflächenlagern, den Lagern des Schwebeträgers sowie den Kalottengleitlagern auf dem Widerlager installiert wurden.

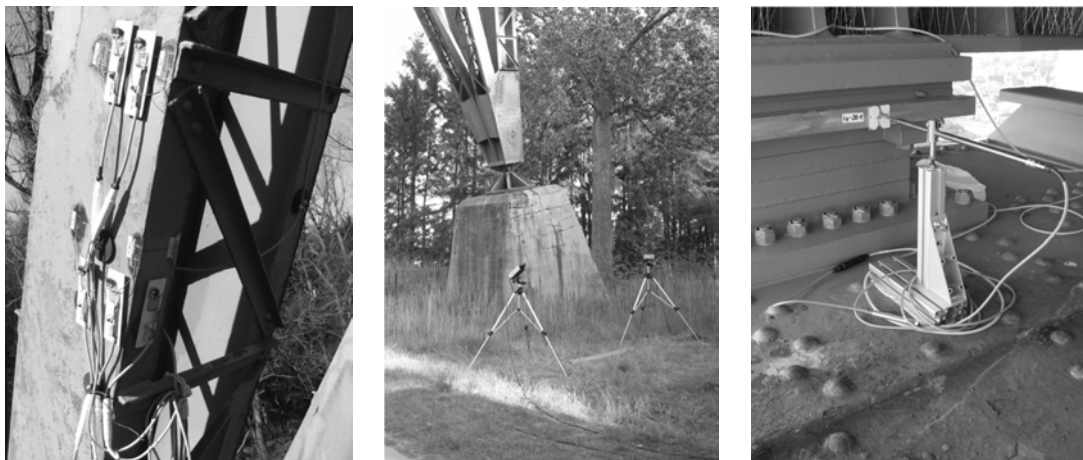


Bild 2: Messtechnik am Tragwerk: DMS, Lasermessgeräte, Wegaufnehmer mit Halterung

Fig. 2: Measurement instrumentation: strain gauges, laser distancemeters, displacement transducers

Die Messung der **Schienen Spannungen** erfolgte durch Installation von **DMS** in der neutralen Faser der Schienenprofile. Es ist zu beachten, dass an der EHB Hochdonn verschiedene Schienenprofile verlegt wurden: S54, UIC60, Vo1-60, Vo1-54. Die Messung erfolgte an den Fahrschienen beider Gleise und an den Entgleisungsschutzschienen. Insgesamt wurden an den Schienen 35 Messpunkte eingerichtet.

Für die Längsverteilung der Bremskräfte von Kragträger zu Kragträger gibt es 2 parallele Wege:

- a) den Oberbau, bestehend aus 4 durchgehenden Schienen der beiden Gleise sowie den Entgleisungsschutz aus 4 weiteren Schienen
- b) die Blechträger mit jeweils einem längsfesten und einem längsbeweglichen Lager. Die beweglichen Lager sind als Reibflächenlager ausgebildet. Durch die Auflast aus ständigen Lasten und ggf. Verkehrslasten können sie erhebliche horizontale Kräfte übertragen.

Besonderes Augenmerk galt daher den Schnitten, in denen die Lager keine nennenswerten Kräfte übertragen. Dies ist am Loslager des Schwebeträgers und an den Widerlagern der Fall, da diese Lager als Kalottengleitlager ausgebildet sind. Hier übernimmt die Schiene allein die Kraftübertragung und ist entsprechend hoch ausgelastet. Weiterhin sollte die Funktion der Brückenbalkenfesthaltekonstruktionen beobachtet werden. Hier sollen konzentriert Lasten aus der Schiene in die Überbauten eingeleitet werden. Durch Messung der Schienenspannung vor und hinter dieser Festklemmstrecke kann auf die übertragene Kraft geschlussfolgert werden.

Zusätzlich wurde mit einigen Messpunkten exemplarisch die Wirkung der Führungsschienen sowohl auf dem Bauwerk als auch an den Bauwerksübergängen untersucht. Die Führungsschienen sind in Abständen von ca. 30 m gestoßen, während die Fahrschienen lückenlos über die gesamte Brücke und den Damm durchlaufen.



Bild 3: Messung der Dehnungen und Bewegungen der Schiene, links: Festhaltekonstruktion

Fig. 3: Measurement of strains and displacements at the rails, left: fastening construction

Für die Tage (und Nächte) während der Durchführung des Bremsversuches wurden die Luftaußentemperaturen, die Witterungsverhältnisse sowie die Windgeschwindigkeiten für den Bereich der Hochbrücke aufgezeichnet. Darüber hinaus wurde an einigen Bauteilen (am Kanalbauwerk) die **Temperatur** gemessen. Durch Messung mehrerer Tagesgänge mit den in-

stallierten DMS und Wegaufnehmern konnten so wertvolle Rückschlüsse über das Tragwerksverhalten infolge Temperatur, Auf- und Abbau von Zwängungen etc. gezogen werden. In der Zeit den Bremsversuches waren die Tage sonnig und heiß, die Nächte klar und kalt, so dass erhebliche Temperaturschwankungen beobachtet werden konnten.

Die Bremsbeschleunigungen wurden mit **Beschleunigungsaufnehmern** im Zug gemessen.

Die Installation der Messaufnehmer nebst Verkabelung (ca. 16 km Kabel) erfolgte ab April 2008. Der Bremsversuch wurde in den Nächten zwischen dem 13.05.2008 und 17.05.2008 durchgeführt.



Bild 4: Messwarte im Wohnwagen (Basisstation) unter der Brücke, Messverstärker und -computer

Fig. 4: Measurement station in caravan (base station) underneath the bridge, measurement amplifiers and -computers

Um Beanspruchungen in messbarer Größenordnung zu erzeugen, die auch in weiter entfernt liegenden Bauwerksteilen noch feststellbar sind (und nicht durch Signalrauschen oder andere Beanspruchungen z.B. aus Wind überdeckt werden), war eine möglichst hohe Bremskraft erforderlich. Die **Belastung** erfolgte mit einem Zug aus **10 Loks⁴ BR 218** mit einer Gesamtmasse von ca. 800 t, der an verschiedenen definierten Stellen auf der Brücke aus verschiedenen Geschwindigkeiten heraus Bremsungen bis zum Stillstand durchführte.

Insgesamt wurden 64 Bremsfahrten im Baugleis (westliches Gleis) durchgeführt, davon 59 aus 30 km/h und 5 aus 70 km/h⁵. Während der Bremsfahrten war das Betriebsgleis unbelastet. Außerdem wurden 14 Überfahrten ohne Bremsung durchgeführt. Ergänzend erfolgte die Aufzeichnung einiger Überfahrten von Regelzügen im Betriebsgleis.

⁴ Zuglänge ca. 165 m (entspricht etwa dem Abstand zwischen 4 BW-Achsen bzw. der 1,5-fachen Einflusslänge eines Bauwerks), Bremslast ca. $0,15 \dots 0,25 \cdot 8000 \text{ kN} = 1200 \text{ kN} \dots 2000 \text{ kN}$ bzw. ca. 12 kN/m

⁵ Die Bremslasten aus 30 km/h sind gegenüber denen aus 70 km/h im Mittel ca. 25 % niedriger, jedoch kann die vorgesehene Bremsposition besser getroffen werden.



Bild 5: Belastungszug, bestehend aus 10 Loks BR 218

Fig. 5: Loading train, composed of 10 electric locomotives BR 218

Ergebnisse der Messungen und analytischen Auswertungen

Mit den Messdaten⁶ aus dem Bremsversuch Hochdonn steht eine fast unerschöpfliche Quelle von Informationen über das Systemverhalten des komplexen Bauwerks Eisenbahnhochbrücke Hochdonn zur Verfügung. Vor allem aus der Kombination der Messgrößen der verschiedenen Aufnehmer erschließt sich ein umfassendes Bild über das mechanische Verhalten des Bauwerks unter Bremslasten.

Zur Aufbereitung und Sichtung der Messdaten wurden zum großen Teil Algorithmen verwendet, die im Rahmen eines Forschungsprojektes [6] im Ingenieurbüro GMG entwickelt wurden.

Dehnungsmessstreifen (DMS) wurden an einer Reihe aufeinanderfolgender **Stützenstiele** installiert. Das Ziel bestand darin, die Verteilung der horizontalen Lagerkräfte aus Bremsen zu bestimmen, um sie mit den Ergebnissen der theoretischen Berechnungen vergleichen zu können.

In Bild 6 sind die gemessenen **Dehnungen** an 4 **Stützenstielen** in unterschiedlicher Entfernung zur Bremsposition dargestellt. Eine messbare Beanspruchung infolge des eigentlichen Bremsrucks (zum Zeitpunkt kurz vor dem Stillstand des Zuges in Bremsrichtung) ist nur in den Fällen feststellbar, in denen der Bremszug sich in der Nähe des jeweiligen Bauwerkes befindet. In den meisten Fällen ist auch dann die Beanspruchung aus dem Rückfedern größer, als aus dem eigentlichen Bremsruck, d.h. der maximale Wert der Lagerkraft wirkt der Bremsrichtung entgegen. In weiter entfernten Bauwerksachsen kommt der Bremsruck aufgrund der Elastizität und Massenträgheit der Fahrbahn verzögert in den Fundamenten an. Das führt dazu, dass bei diesen Bauwerksachsen die maximale Horizontalkraft nicht zum Zeitpunkt des Bremsrucks auftritt, sondern erst beim Rückfedern oder wenn der Brückenzug mehr oder weniger in eine harmonische Schwingung übergegangen ist. Die Verteilungsfunktion der horizontalen Stützkräfte wird mit zunehmender Schwingdauer immer flacher, das heißt, die Bremskraft verteilt sich immer besser im Brückenzug.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Bremsrucks bzw. der ersten Rückfederung im Brückenzug lässt sich z.B. aus dem Zeitversatz der maximalen Amplituden der Achsen 01 und 22 bestimmen. Sie beträgt ca. $1363 \text{ m} / 0,33 \text{ s} = 4130 \text{ m/s}$.

Die Schwingeigenfrequenz der Hochbrücke in Längsrichtung beträgt ca. 1,2 Hz. Der anfängliche Zeitversatz von 0,33 s bedeutet eine Phasenverschiebung von ca. 140° , d.h. die Bauwerke 02 und 22 bewegen sich zunächst nahezu in entgegengesetzter Richtung.

Interessant ist, wie deutlich die Auswirkung der Bremsung in Achse 24 nördlich des Kanalbauwerks noch in dem Bauwerk 02 am südlichen Widerlager, d.h. in einer Entfernung von ca. 1,5 km messbar ist. Nach spätestens einer Periode, d.h. ca. 0,8 Sekunden schwingt der gesamte Brückenzug vom südlichen bis zum nördlichen Widerlager. Das Zentrum der

⁶ 91 Fahrten · 82 Aufnehmer · 60.000 Messwerte (400 sec. mit 150 Hz Abtastrate) · 4 Byte = ca. 1,8 GByte

Schwingungen bleibt dabei relativ konstant an der Bremsposition bzw. verlagert es sich etwas in Richtung des Kanalbauwerks.

Die Empfindlichkeit der DMS-Messpunkte ist so hoch, dass noch Dehnungen von $< 1 \mu\text{m}/\text{m}$ \triangleq ca. $0,2 \text{ N}/\text{mm}^2$ sauber aufgelöst werden.

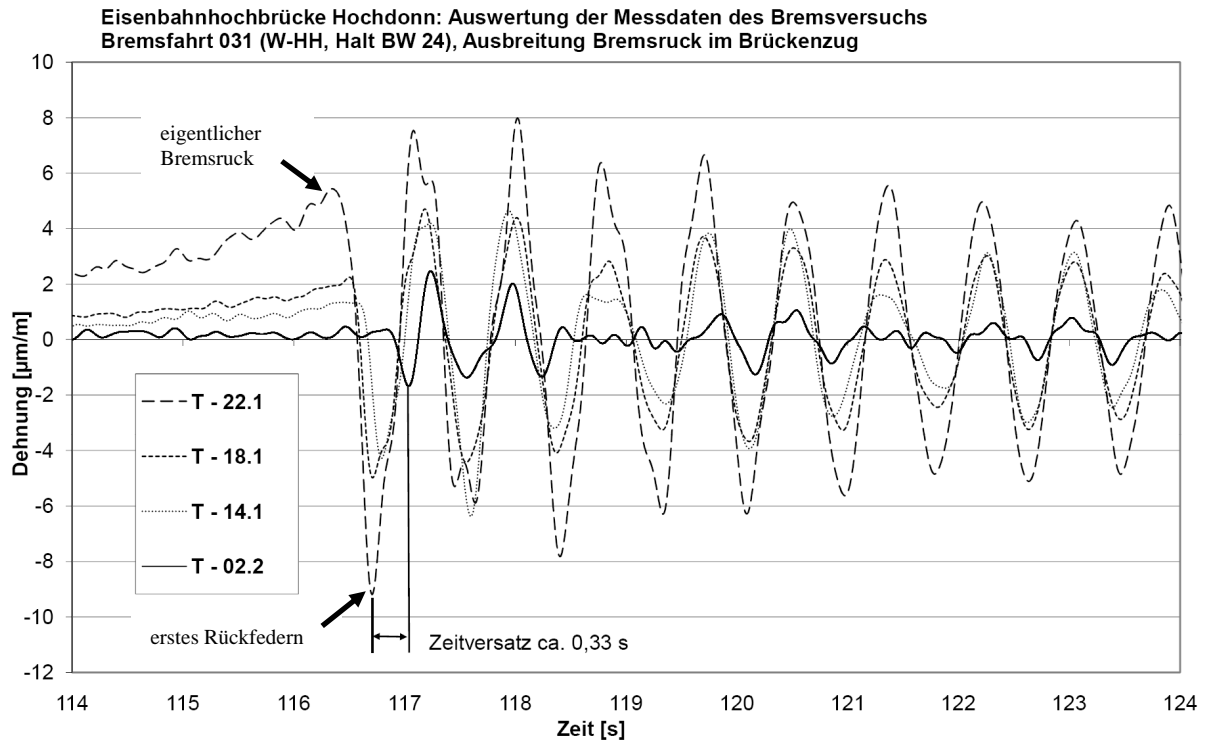


Bild 6: Messdaten der Dehnmessstreifen an den Stützenstielen – Bremsruck und Ausschwingen

Fig. 6: Measured data of the strain gauges at the frame stanchions - jerky braking movements prior to standstill and post-pulse oscillation

Zum Vergleich der Messergebnisse mit der analytischen Lösung (am statischen Modell) wird die in den jeweiligen Achsen gemessene maximale Beanspruchung zum jeweiligen Zeitpunkt des eigentlichen Bremsrucks verwendet.

Eine direkte Erfassung der horizontalen Lagerkräfte ist messtechnisch nicht realisierbar. Die Normalkräfte der Diagonalen in den Querwänden der Stützenstiele weisen einen linearen Zusammenhang zu den horizontalen Lagerkräften auf, d.h. es ist für jede Rahmgeometrie und jeden Querschnitt ein Faktor bestimmbar, mit dem die gemessene Spannung an der Querwanddiagonalen direkt in die horizontale Lagerkraft umgerechnet werden kann. Die Faktoren wurden mit den aus der statischen Nachrechnung vorhandenen detaillierten Stabwerksmodellen berechnet.

In Bild 7 ist die aus den Messungen abgeleitete Verteilung der horizontalen Auflagerkräfte je Bauwerksachse für 3 unterschiedliche Bremspositionen (Widerlager, Mitte südliche Rampe, Kanalbauwerk) aufgetragen. Es wird deutlich, dass die Verteilung der Bremslasten in allen Bereichen des Brückenzuges sehr gut ist. In der Summe kommen nur ca. 300 kN Bremskraft in den Fundamenten des unmittelbar belasteten Rahmens an, das ist ca. $\frac{1}{4}$ der Kraft, die sich rechnerisch ohne Berücksichtigung der Längsverteilung ergeben würde.

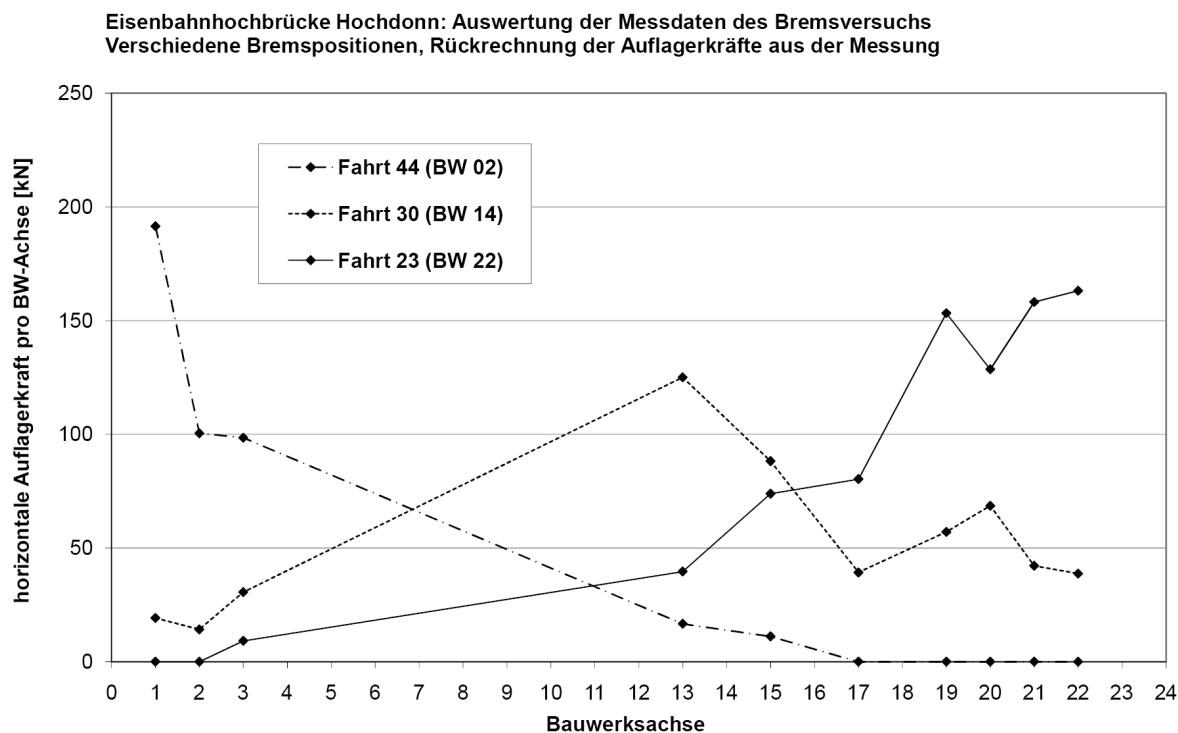


Bild 7: Gemessene Verteilung der horizontalen Auflagerkräfte aus Bremsen im Brückenzug

Fig. 7: Measured distribution of horizontal reaction due to braking forces

In den mit den **Lasern** gemessenen horizontalen Verschiebungen der Rahmen ist das langsame Anwachsen der Bremskraft, der eigentliche Bremsruck und das Ausschwingen des Systems besonders gut zu erkennen, siehe Bild 8.

Am Ausschwingvorgang lässt sich die Dämpfung des Systems ablesen, sie beträgt ausgedrückt als Lehrsches Dämpfungsmaß im Mittel ca. $D = 0,7\%$ (bei der Eisenbahnhochbrücke Rendsburg ca. $2,0\%$). Das logarithmische Dekrement Λ ist direkt nach dem Bremsruck zunächst höher und wird mit zunehmender Schwingdauer immer geringer. Dies ist zum einen auf die anfänglich stattfindende Ausbreitung der Schwingung im System (keine eigentliche Dämpfung), zum anderen auf den mit geringer werdenden Amplituden abnehmenden Einfluss Energie dissipierender Gleis- und Lagerverschiebungen zurückzuführen.

Die gemessenen horizontalen Verschiebungen der Rahmenriegel lassen sich äquivalent zu den Dehnungen in den Rahmenriegeln mit entsprechenden Faktoren ebenfalls in horizontale

Auflagerkräfte umrechnen. Die Übereinstimmung der Ergebnisse beider Verfahren, die auf zwei unabhängigen Messmethoden beruhen, war sehr zufriedenstellend.

Eisenbahnhochbrücke Hochdonn: Auswertung der Messdaten des Bremsversuchs
Bremsfahrt 030 (HH-W, Halt BW 14), Lasermesspunkte an Rahmenriegeln

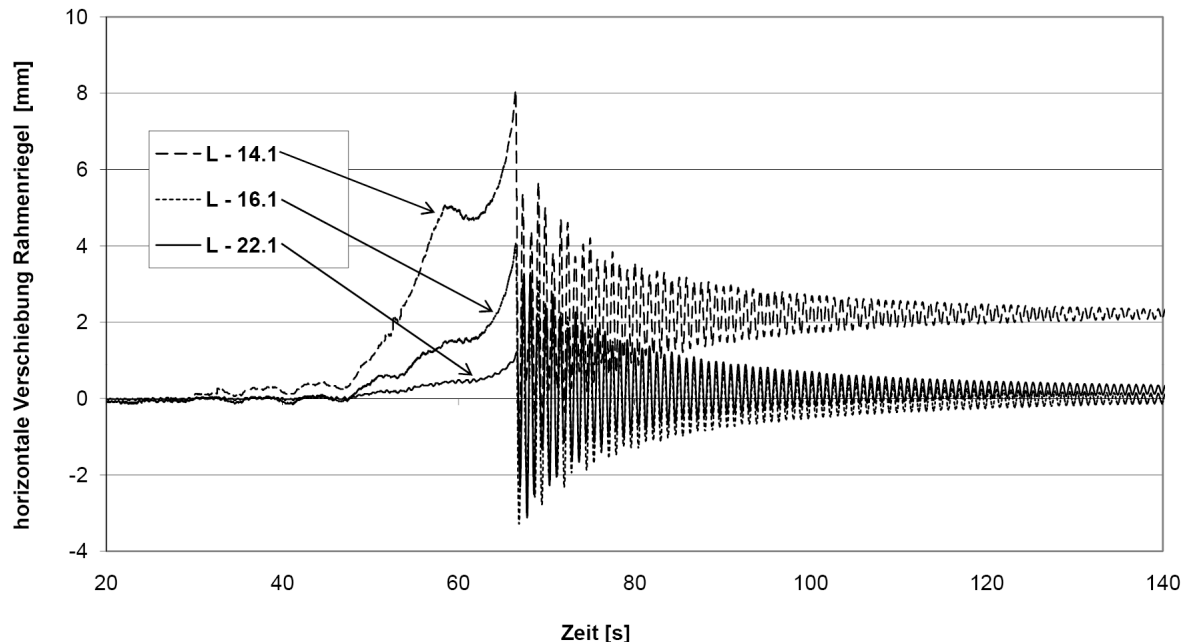


Bild 8: Gemessene horizontale Verschiebungen ausgewählter Rahmenriegel infolge Bremsen

Fig. 8: Measured horizontal displacement of selected frames due to braking forces

In Bild 9 ist die Auswirkung des Bremsrucks auf das **Lager** in der Achse 13 aus verschiedenen Bremspositionen dargestellt. Es zeigt sich, dass die Verschiebungen gering bleiben, wenn die Bremsung direkt auf dem Blechträger erfolgt. Durch die Verkehrslasten erhöht sich die Grenzkraft des Lagers erheblich und es kommt trotz maximalem Bremsruck zu keinen nennenswerten Verschiebungen (Fahrt 30).

Befindet sich der Zug außerhalb des Bauwerkes, werden durch den Bremsruck größere Verformungen ausgelöst. Dabei ist die Richtung der Verformungen unabhängig von der Richtung der Bremsfahrt. Im Lager 14.1 konnte dies für alle Bremsfahrten festgestellt werden. Innerhalb von ca. 3 Stunden ergibt sich hier eine Gesamtverschiebung von ca. 4 mm.

Der Grund für dieses zunächst überraschende Verhalten besteht darin, dass sich bei jedem größeren Ruck die aus Temperaturdehnung vorhandenen Zwängungen entladen, da sich das Bauwerk in der Nacht abkühlt.

Die Höhe der Lagerverschiebungen infolge des Bremsrucks hängt demzufolge nicht von der Höhe der Bremskraft ab, sondern vielmehr von der Zwängung infolge behinderter Temperaturdehnung.

Eisenbahnhochbrücke Hochdonn: Auswertung der Messdaten des Bremsversuchs
Aufnehmer Lg - 14.1 bei verschiedenen Bremsfahrten

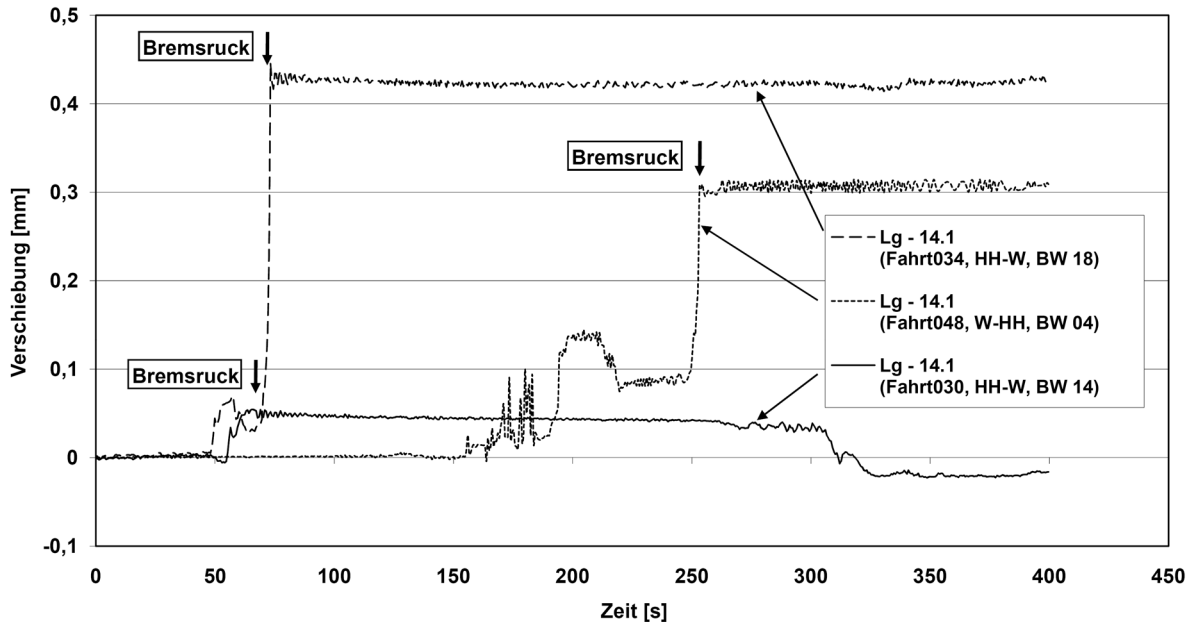


Bild 9: Gemessene horizontale Relativverschiebungen im Lager (Achse 13) infolge Bremsen

Fig. 9: Measured relative horizontal displacement in bearing (axis 13) due to braking forces

Bereits der Zwang aus einer Temperaturdifferenz von ca. 1,0 K kann nicht mehr durch Reibung von den Lagern aufgenommen werden. Wird in der Summe aus Bremsruck und Temperaturzwang eine Kraft von ca. 200 kN erreicht, wird die Reibung im Lager überwunden. Die durchschnittlichen gemessenen Sprünge lagen bei ca. 0,3 bis ca. 1,5 mm, d.h. ca. 0,25 bis 1,15 K. Hier zeigt sich die große Streubreite der Reibungszahlen der Lager. Der durchschnittliche Reibungsbeiwert der Lager lag bei ca. 0,4. Die großen Sprünge traten immer dann auf, wenn die zeitlich vorangegangenen Bremspositionen so weit entfernt waren, dass der Bremsruck nicht ausreichend zum Lösen der Zwängungen war. Die Temperaturdifferenz von 1 K stellt sich bei entsprechenden klimatischen Verhältnissen teilweise sehr schnell ein ($< \frac{1}{2}$ h). Das Vorhandensein von Zwängungen kann daher für nahezu jede Zugüberfahrt vorausgesetzt werden.

Mit dem Lösen von Zwangsspannungen in den Lagern lässt sich auch erklären, warum die Verläufe der Auflagerlasten infolge Bremsruck, die aus den Spannungen an den Stützenstielen zurückgerechnet wurden, nicht ganz gleichmäßig verlaufen. Infolge Entladung von Temperaturzwängen an den Lagern kommt es zu zusätzlichen Spannungsanteilen, die sich von denen infolge des Bremsrucks kaum trennen lassen.

Der Erfassung der **Schienen Spannungen** wurde im Rahmen des Bremsversuches sehr viel Aufmerksamkeit gewidmet. Neben den Fragen der Bremskraftverteilung ging es auch darum,

die Beanspruchungen der Schienen infolge vertikaler Verkehrslasten und infolge Temperatur zu beobachten und dabei insbesondere die Funktion der neuartigen von der DB-AG entwickelten Festhaltekonstruktionen. Eine interessante Frage bestand auch darin, inwieweit sich die Entgleisungsschutzschienen an der Weiterleitung der Bremskraft beteiligen, da sie in regelmäßigen Abständen unterbrochen sind, über den Loslagern der Einhängeträger und an den Widerlagern aber bewusst durchgeführt wurden. Dass eine gute Verteilung der Bremskräfte auf die Schienen des Nachbargleises erfolgt, war nach den Ergebnissen der Messungen an der Eisenbahnhochbrücke Rendsburg zu erwarten.

Die Messung der Schienenbeanspruchungen erfolgte durch Dehnmessstreifen, die etwa in der neutralen Faser der Profile installiert wurden. Spannungen infolge Biegebeanspruchungen sind daher zwischen den einzelnen Messpunkten nicht vergleichbar. Bei der Auswertung der Messdaten war zu beachten, dass die Profile der Fahrschienen im Brückenzug unterschiedlich sind.

**Eisenbahnhochbrücke Hochdonn: Auswertung der Messdaten des Bremsversuchs
Bremsfahrt 050 (W-HH, Halt am südlichen Widerlager), Aufnehmer S-01.1 bis S-01.4**

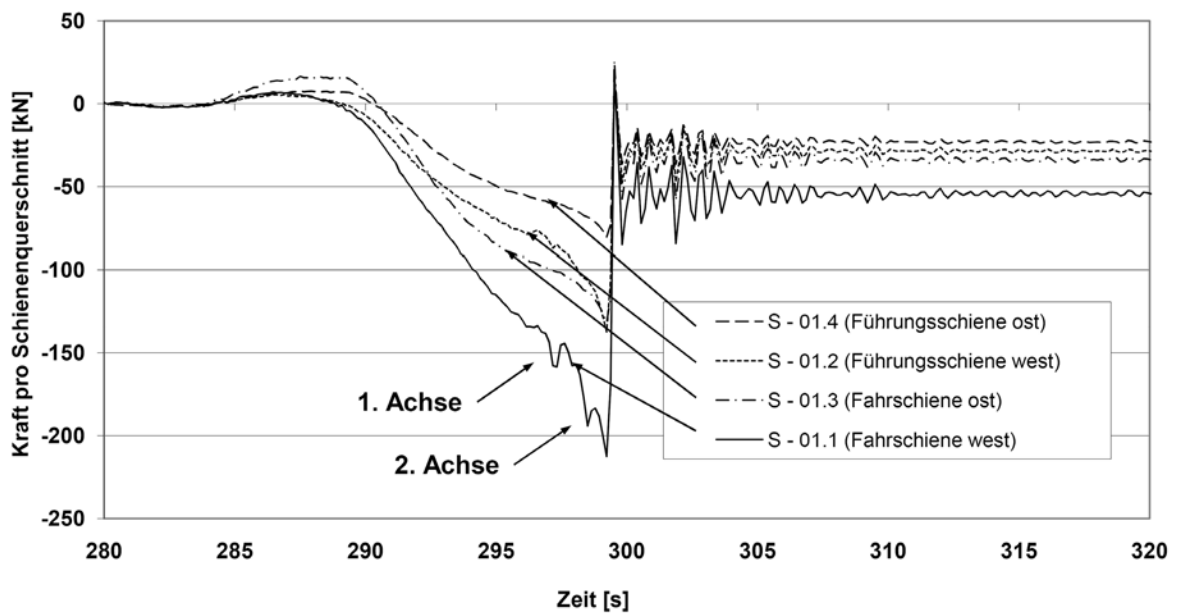


Bild 10: Gemessene Kraft infolge Bremsen in 4 Schienenquerschnitten am Widerlager

Fig. 10: Measured force due to braking in 4 rail profiles, section close to abutment

Ein wichtiger Parameter bei der Berechnung der Bremskraftverteilung im Bereich der Widerlager war die Steifigkeit der Schienenauflagerung im Damm. Davon abhängig ist, welcher Anteil der Bremskraft über die Schiene direkt in den Damm geleitet wird und welcher Anteil

in die Tragwerke geht. Dies ist insbesondere für den Bauwerkstyp BW02 (Kragträger mit langem Kragarm) und für die Höhe der Schienenspannung von Bedeutung.

Dazu wurden im Damm an einer Fahrschiene 4 Messpunkte S-00.1 bis S-00.4 installiert, mit Abständen von ca. 1,0 m, 7,0 m, 15,0 m und 25,0 m vom Widerlager. Erstaunlich ist, dass selbst bei Bremsposition 24.1 (Bremsen auf Bauwerk 24 in Richtung Hamburg, d.h. in einem Abstand von ca. 1,5 km) an Messpunkt S-00.4 noch ein eindeutiges Signal von ca. 1,5 N/mm² (erstes Rückfedern) registriert wird. Der eigentliche Bremsruck kommt im Widerlager nicht an. Der Abbau der Schienenkraft im Dammbereich erfolgt relativ unabhängig von der Höhe der Beanspruchung auf ca. 40 % in einem Abstand von ca. 25 m.

In Bild 10 ist die Verteilung der Bremskraft auf die Entgleisungsschutzschienen und die Schienen des Gegengleises für den Schnitt am Widerlager unmittelbar vor der Bremsposition dargestellt. Es zeigt sich, dass der Entgleisungsschutz ein hohem Maße an der Lastabtragung beteiligt wird. Zur besseren Deutbarkeit der Messergebnisse wurden hier die gemessenen Spannungen mit der jeweiligen Querschnittsfläche des Schienenprofils in Normalkräfte umgerechnet.

Die maximalen gemessenen Schienennormalspannungen infolge Bremsruck betragen ca. 20 N/mm² und treten in der Mitte des Einhängeträgers 01 am Widerlager auf. Hier hat die Schiene Normalprofil S54 und der Entgleisungsschutz ist an dieser Stelle gestoßen. Am Widerlager erfolgt der Kraftabtrag in den Damm fast ausschließlich über die Schiene, in den übrigen Rampenbereichen vorrangig über die steiferen Blechträger und die Lager, so dass die Schienenspannung dort wesentlich geringer ist. Sie beträgt maximal ca. +/- 7 N/mm², wobei das Spannungsniveau vor und hinter dem Bremszug etwa gleich ist.

Die eigentlich nur als Ergänzung vorgesehenen **Langzeitmessungen** in den Tagen während des Bremsversuches erwiesen sich als besonders interessant und aussagekräftig. Es wurden alle Sensoren außer die Laser simultan aufgezeichnet, wobei 3 volle Tagesgänge erfasst wurden.

Die gemessenen Temperaturbereiche betragen für die Schiene 6°C (6:00 Uhr) bis 41°C (15:00 Uhr) und für die Bauwerke (gemittelt) ca. 7°C (7:30 Uhr) bis 23°C (17:00 Uhr).

Die DMS sind durch Halbbrückenschaltung temperaturkompensiert. Bei der Dehnung in Bild 11 handelt es also nicht um die freie Dehnung der Schiene aus Temperaturbeeinflussung (spannungsfrei), sondern um die Dehnungsbehinderung, die zu Spannungen führt. Dementsprechend sind die Dehnungen bei positiven Temperaturdifferenzen negativ. Da die Fahrschiene durchgeschweißt und gerade ist, und sich aus Temperatur nicht ausdehnen kann, entsprechen im Mittel die gemessenen Stauchungen der behinderten freien Dehnung:

$$35 \text{ K} \cdot 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1} = 0,00042 = 420 \text{ } \mu\text{m/m}$$

Dass die Fahrschienen unterschiedliche Dehnungen aufweisen, liegt an der Abstufung der Querschnitte und an den Unterbrechungen der Führungsschienen, d.h. die Kraft im Schienenstrang ist etwa konstant.

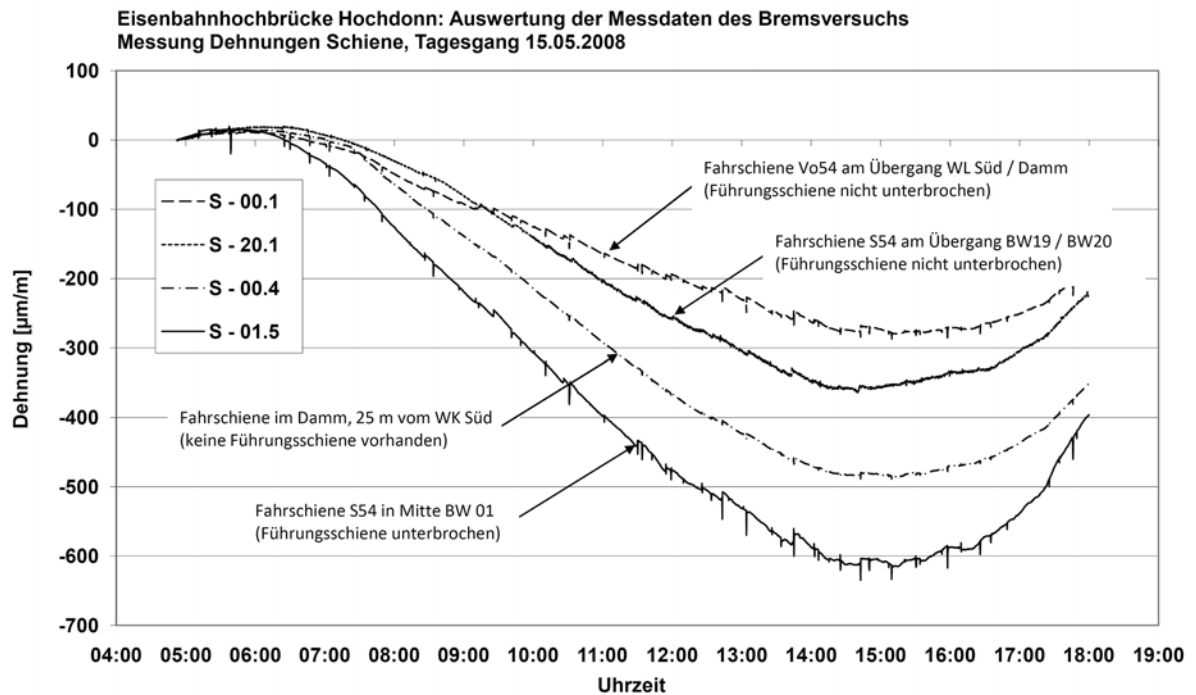


Bild 11: Gemessene Dehnung der Fahrschiene in 4 Querschnitten infolge Temperaturzwang

Fig. 11: Measured strain in the rail due to temperatur restraint

Die maximalen Beanspruchungen aus Temperatur wurden am Messpunkt S-01.5 in der Mitte des Bauwerks 01 festgestellt mit ca. $\Delta\sigma = 130 \text{ N/mm}^2$. An dieser Stelle ist die Führungsschiene unterbrochen und übt zusätzlichen Zwang auf die Fahrschiene aus.

Die maximalen Relativverschiebungen infolge Dilatation wurden im längsverschieblichen Lager des Schwebeträgers gemessen. Bezüglich der Beurteilung der Funktionalität des Oberbaues ist insbesondere die Relativverschiebung zwischen Schiene und Fahrbahn im Bereich des Schwebeträgers interessant. Auf dem im November 2006 durch einen Neubau ersetzten Schwebeträger wurden die Schienen direkt aufgelagert, wobei Klemmplatten verwendet wurden, die einen freien Durchschub der Schiene gewährleisten (KPo B). Die rechnerisch infolge freier Temperaturdehnung des Schwebeträgers bestimmte Verschiebung beträgt 36 mm, gemessen wurden 35 mm. Es zeigt sich, dass die Durchschieblichkeit gewährleistet ist, die Sprünge infolge Verklemmen der Schiene liegen bei maximal ca. 4 mm.

Aus der Messung der Relativverschiebung eines Spaltes im Entgleisungsschutz konnte durch Vergleichsrechnung mit einem nichtlinearen Modell auf den Durchschubwiderstand der Schiene geschlossen werden.

Es zeigte sich, dass dieser Widerstand an den jeweils in der Mitte der Rahmen angeordneten Festklemmstrecken durch Bremskräfte nicht überwunden wird.

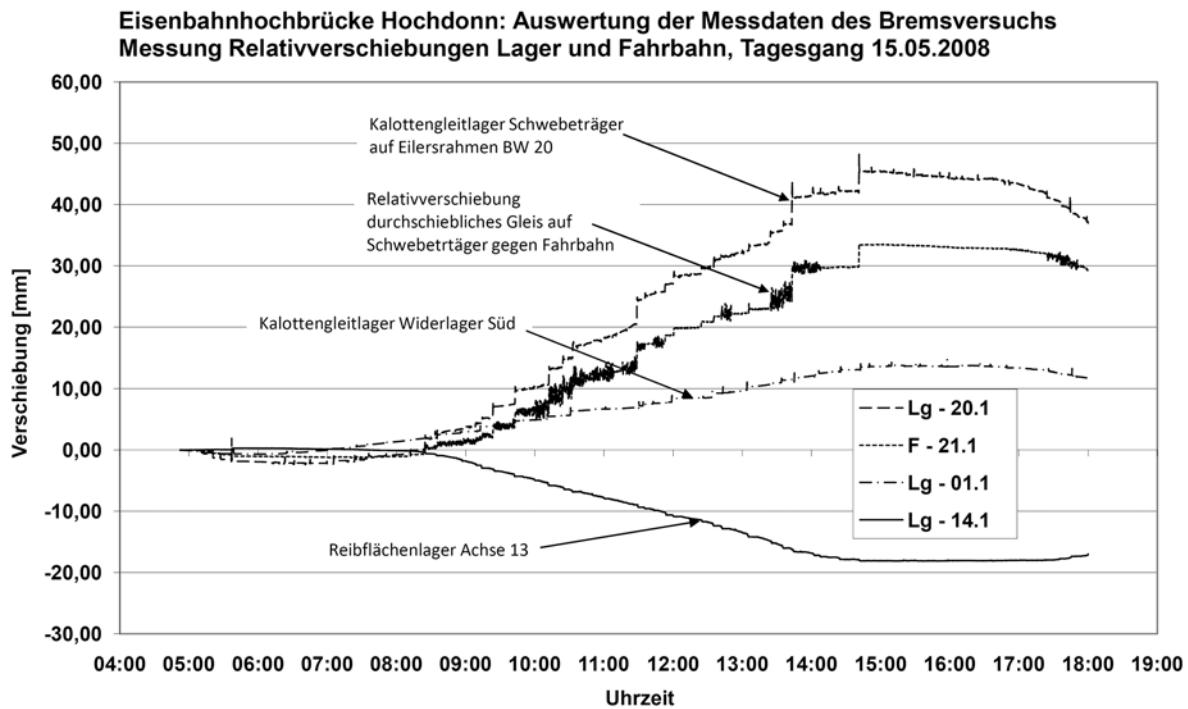


Bild 12: Gemessene Relativverschiebungen in Lagern und Fahrbahn infolge Dilatation

Fig. 12: Measured relative displacements in bearings and trackway due to dilatation

Zum Vergleich mit den Messergebnissen wurden einige Bremspositionen anhand des nichtlinearen aber rein statischen Berechnungsmodells analytisch nachvollzogen, vgl. Bild 13. Mit dem Modell konnten sowohl die Verteilung der Bremslasten auf die Fundamente, die Verschiebungen der Rahmen und sogar die Schienenspannungen gut nachvollzogen werden, vergleiche Bild 14 mit Bild 7.

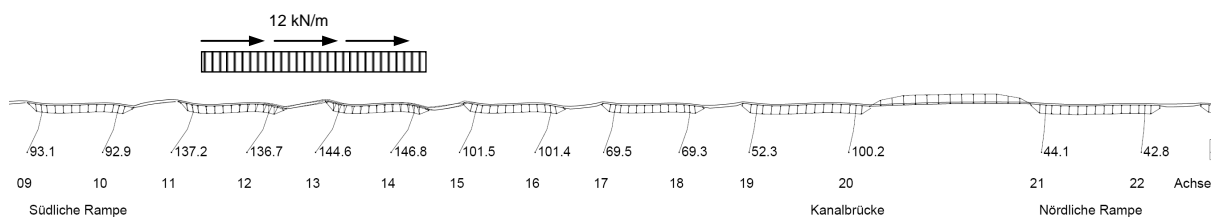


Bild 13: Ausschnitt aus dem Berechnungsmodell (horizontale Auflagerkräfte in kN)

Fig. 13: Extract of the mechanical model (horizontal reactions in kN)

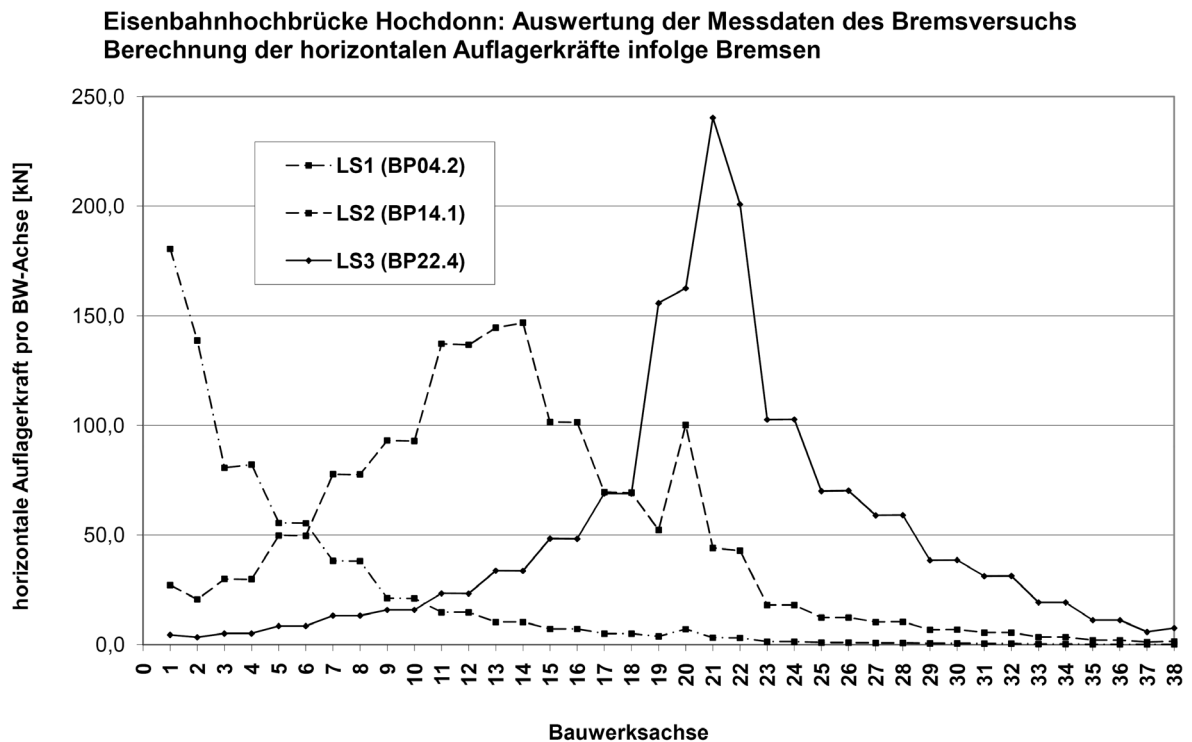


Bild 14: Analytische Ermittlung der horizontalen Auflagerkräfte infolge Bremslasten

Fig. 14: Analytical calculation of the horizontal reactions due to braking forces

Die Berechnung der Längsverteilung der Bremslasten mit dem statischen Modell kann nur für den Zeitraum mit mehr oder weniger konstanter Bremsbeschleunigung bis zum Augenblick des eigentlichen Bremsrucks zufriedenstellende Ergebnisse liefern. Hier liegen quasi statische Verhältnisse vor, die Lasten verteilen sich entsprechend der Steifigkeiten der an der Lastabtragung beteiligten Bauteile, wobei nichtlineare Effekte (Reibung) berücksichtigt werden können. Ab dem Zeitpunkt des Stillstandes des Zuges kann das Tragwerksverhalten infolge Bremsen, d.h. der Ausschwingvorgang nur durch eine dynamische Berechnung ermittelt werden. Streng genommen ist die statische Berechnung auch schon für den Zeitpunkt des eigentlichen Bremsrucks nicht mehr geeignet, da das Maximum der Bremskraft nur für einen sehr kurzen Zeitraum unmittelbar vor dem Stillstand des Zuges auf die Schiene einwirkt und so die Massenträgheit der Fahrbahn aktiviert wird.

Für die **dynamische Berechnung** spielen neben den Steifigkeiten der Bauteile auch die Massenverteilung und der Zeitverlauf der Einwirkung eine wichtige Rolle. Der Aufwand für die Durchführung von dynamischen Berechnungen im Zeitbereich ist recht hoch. Ziel der durchgeführten dynamischen Berechnungen war es daher, mit einem sehr vereinfachten linear-elastischen Modell zu versuchen, bestimmte messtechnisch erfasste dynamische Tragwerksreaktionen der Eisenbahnhochbrücke auf rechnerischem Wege qualitativ richtig nachzuvollziehen. Dazu wurde ein stark vereinfachtes 2-dimensionales Stabwerksmodell des gesamten Brückenzuges, bestehend aus Rahmenstielen und Rahmenriegeln mit den reellen Stützweiten

und einer gemittelten Tragwerkshöhe entwickelt und die dynamische Berechnung mit dem Zusatzmodul DYNAM 2004 des Stabwerksprogramms RSTAB durchgeführt.

Es zeigte sich, dass trotz der stark vereinfachten Modellierung die Wirkung des Bremsrucks im Zeitbereich recht gut nachvollzogen werden konnte, vgl. Bild 15.

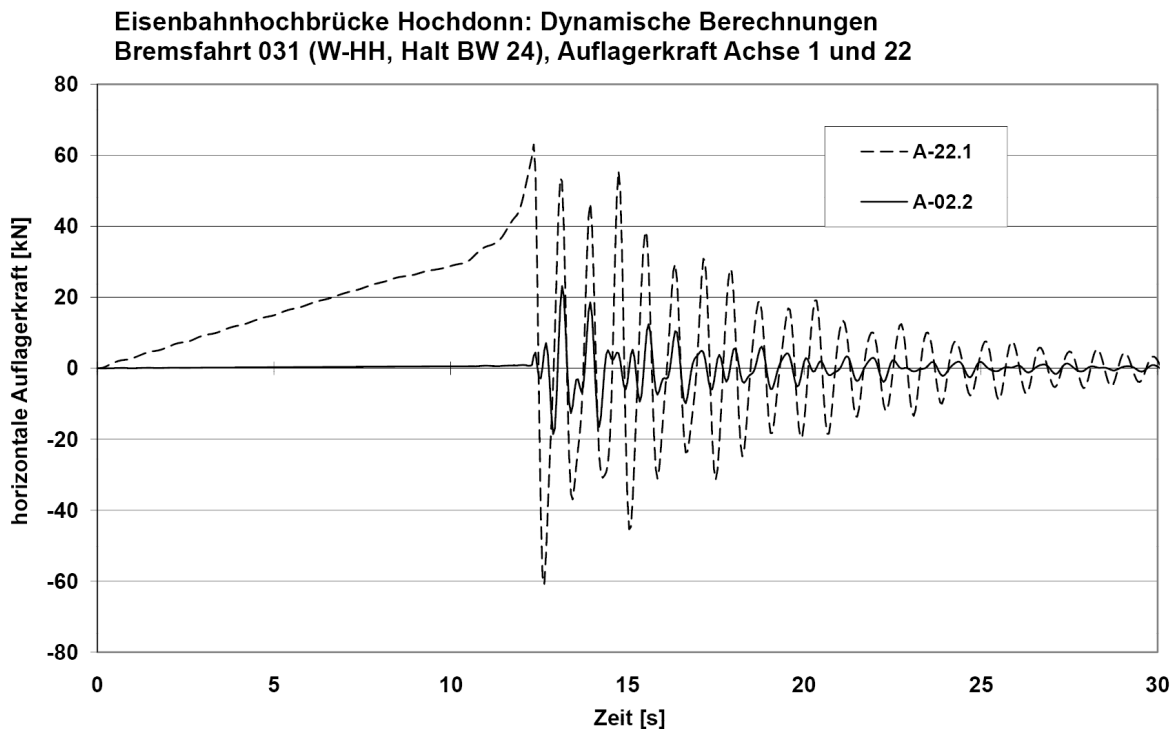


Bild 15: Dynamische Berechnung des zeitlichen Verlauf der Auflagerkräfte in den Achsen 1 und 21

Fig. 15: Dynamical calculation of the reactions in axis 1 and 21 in the time domain

Im **Ergebnis der Messungen** konnten die Eignung des vorhandenen nichtlinearen statischen Modells des Brückenzuges zur Ermittlung der Verteilung der Bremskräfte sowie die festgelegten **Abminderungsfaktoren ξ^* bestätigt** werden. Damit wurden die Forderungen der ZIE erfüllt und die statische Nachrechnung musste nicht modifiziert werden.

Die durch die Messungen ermittelte reale Verteilung der Bremslasten war im Allgemeinen etwas (jedoch nicht signifikant) besser, als im Rahmen der analytischen Voruntersuchungen angenommen wurde. Zur Ausnutzung dieser festgestellten Reserven wurden unter der Prämisse der Beibehaltung des ursprünglich gewählten Sicherheitsniveaus die zugelassenen maximalen Zuglängen neu bestimmt. Im Ergebnis konnten die Zuglängen gegenüber den gegenwärtigen Festlegungen um ca. 30 % vergrößert werden.

Quellen

- [1] NORM RICHTLINIE 805: Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken., 2002
- [2] GEIBLER, K.; GRABE, W.; SCHMACHTENBERG, R.; STEIN, R.: Zur meßwertgestützten Ermittlung der Verteilung der Brems- und Anfahrkräfte an der Eisenbahnhochbrücke Rendsburg., *Der Stahlbau*, 2002
- [3] EBA ZENTRALE: Zustimmung im Einzelfall über die Verwendung von der DS 804 und der Richtlinie 805 abweichender Rechenannahmen zur Ermittlung der Längskraftverteilung und -ableitung für die Eisenbahnhochbrücke Hochdonn der Strecke 1210 Elmshorn – Westerland., 2004
- [4] DB NETZ AG, I.NPT 2 (F) MAGDEBURG: Bericht 08/58 Messungen im Rahmen des Bremsversuches an der Eisenbahnhochbrücke Hochdonn, Strecke 1210 Elmshorn – Westerland, km 86,875 bis 89,093., 2008
- [5] GMG INGENIEURGESELLSCHAFT MBH: Eisenbahnhochbrücke Hochdonn: Auswertung der Messdaten des Bremsversuches., 2008
- [6] GMG INGENIEURGESELLSCHAFT MBH: Integrale Systemlösung für die wirtschaftliche Dauerüberwachung bestehender Bauwerke. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsprojekt KU 0394601AT6., 2009