

# Erhaltung stählerner Tragwerke – WS 2014/2015

12. Vorlesung / Übung

Daniel Pak

22.01.2015

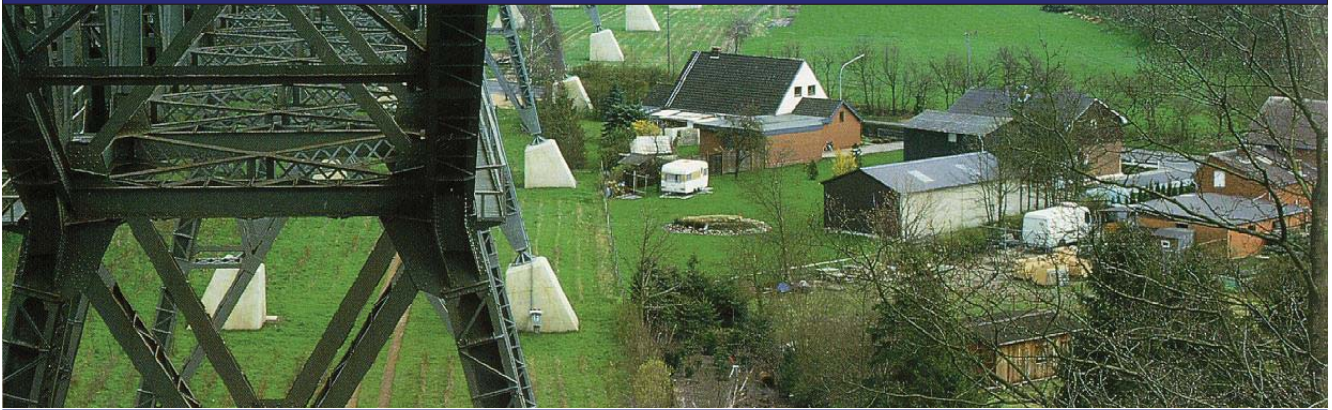


## Terminübersicht und Übungsinhalte

Termin	Thema	Inhalt
09.10.2014	Einführung ULS 1	Übersicht Stahlbau IV, Vorstellung der PVL, Allgemeines zum Verbundbau, Klassifizierung, Schnittgrößenermittlung
16.10.2014	ULS 2	plastische Momententragfähigkeit
23.10.2014	ULS 3	elastische Momententragfähigkeit, Biegung und Querkraft
06.11.2014	ULS 4, Verbundmittel	Verbundmittel
13.11.2014	Biegedrillknicken	Biegedrillknicken
20.11.2014	Verbundstützen 1	Einführung, Berechnungsverfahren
27.11.2014	Verbundstützen 2 Berechnung nach Elastizitätstheorie 1	Interaktion Biegung+Normalkraft
04.11.2014	Berechnung nach Elastizitätstheorie 2	Berücksichtigung zeitabhängigem Verhaltens, Gesamtquerschnittsverfahren
18.12.2014	Berechnung nach Elastizitätstheorie 3	Berücksichtigung zeitabhängigem Verhaltens, Gesamtquerschnittsverfahren
08.01.2015	Berechnung nach Elastizitätstheorie 4 Verbunddecken	Gesamtquerschnittsverfahren Einführung, Berechnungsverfahren
15.01.2015	Verbunddecken Anschlüsse im Verbundbau	Berechnungsbeispiel Entwurf von Anschlüssen
22.01.2015	Erhaltung stählerner Tragwerke	Richtlinien (Brückenbauwerke) Praxisbeispiel Eisenbahnhochbrücke Hochdonn



## Richtlinien zur Nachrechnung von Brückenbauwerken (Bestand)



3

Verbundbau / Wintersemester 2014/2015



## Straßenbrücken: Übersicht der Regelwerke für den Brücken- und Ingenieurbau



Quelle: BAST, Homepage

4

Verbundbau / Wintersemester 2014/2015



## Straßenbrücken: Übersicht der Regelwerke für den Brücken- und Ingenieurbau

### Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 22/2012

Sachgebiet 05.2: Brücken- und Ingenieurbau;  
Grundlagen

### Technische Baubestimmungen Brücken- und Ingenieurbau

- Einführung der Eurocodes für Brücken
  - Eurocode 0: „Grundlagen der Tragwerksplanung“
  - Eurocode 1, Teil 2: „Verkehrslasten auf Brücken“
  - Eurocode 2, Teil 2: „Betonbrücken“
  - Eurocode 3, Teil 2: „Stahlbrücken“
  - Eurocode 4, Teil 2: „Verbundbrücken“

**BEM-ING**  
Bemessung von  
Ingenieurbauten

- a) Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 8/2003  
vom 07.03.2003 - S 25/38.55.00/25 Va 03 -
- b) Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 6/2009  
vom 05.06.2009 – S 18/7192.10/81-1045620
- c) Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 26/2002  
vom 31.10.2002 - S 25/38.55.15-30/66 Va 02

Aktenzeichen: StB 17/7192.10/81-1811030  
Datum: Bonn, 26.11.2012

Quelle: BASt, Homepage

## Straßenbrücken: Übersicht der Regelwerke für den Brücken- und Ingenieurbau



Quelle: BASt, Homepage

## Straßenbrücken: Nachrechnungsrichtlinie

**Bundesministerium für Verkehr, Bau  
und Stadtentwicklung**

Abteilung Straßenbau

### **Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie)**

Ausgabe: 05/2011

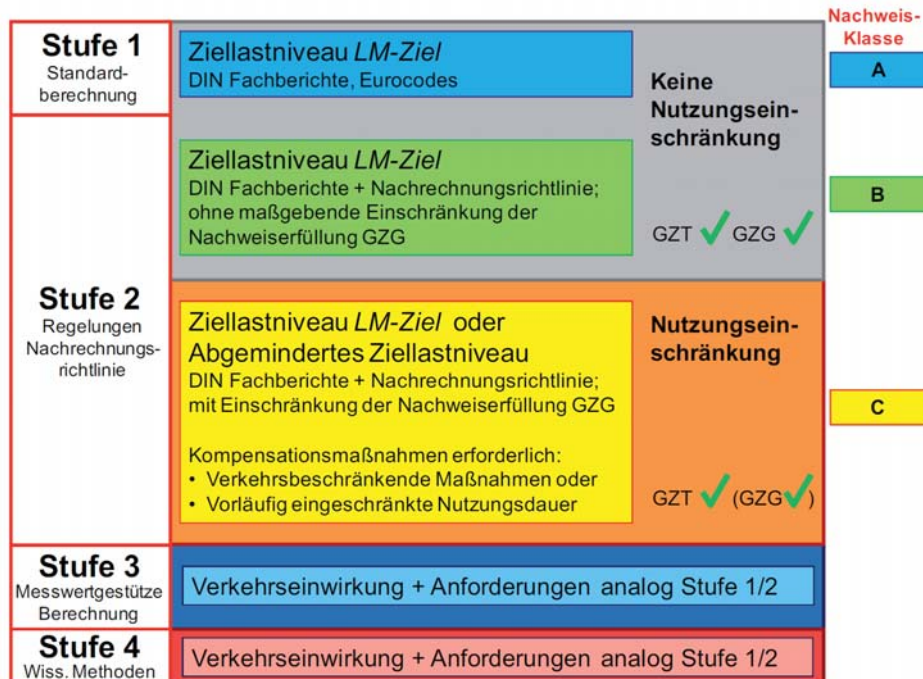
1	<b>Geltungsbereich und Grundlagen</b>
2	<b>Normative Verweise</b>
2.1	Grundsätzliches
2.2	Normen und Technisches Regelwerk
3	<b>Begriffe</b>
4	<b>Konzept der Nachrechnungsrichtlinie</b>
4.1	Allgemeines
4.2	Nachweisführung
4.3	Nachweisarten und Bewertungskriterien
4.3.1	Rechnerischer Nachweis
4.3.2	Bewertung auf Grundlage des Bauwerkzustands (Qualitative Bewertung)
4.3.3	Experimentelle Tragfähigkeitsermittlung
4.3.4	Bewertung der Nachrechnungsergebnisse
5	<b>Anforderungen an die Nachrechnung</b>
6	<b>Bestandserfassung</b>
6.1	Grundlagen und notwendige Unterlagen
6.2	Zustandserfassung
7	<b>Ablauf der Nachrechnung</b>
7.1	Ablaufdiagramm zur Nachrechnung
7.2	Inhalt und Gliederung der Nachrechnung (Empfehlung)
8	<b>Auswertung der Ergebnisse der Nachrechnung</b>
8.1	Bewertung
8.2	Machbarkeitsstudie zur Bauwerksertüchtigung
9	<b>Dokumentation</b>
10	<b>Grundlagen der Tragwerksberechnung</b>
10.1	Einwirkungen
10.1.1	Allgemeines
10.1.2	Vertikale Verkehrseinwirkung
10.1.3	Horizontale Verkehrseinwirkung
10.1.4	Verkehrseinwirkung zur Nachweisführung gegen Ermüdung
10.2	Teilsicherheitsbeiwerte
10.3	Grundlagen der Schnittgrößenermittlung
11	<b>Werkstoffkennwerte (Rechenwerte)</b>
12	Betonbrücken
13	Stahl- und Stahlverbundbrücken
14	Brücken aus Mauerwerk
15	Nachrechnung von Gründungen
16	Brückenlagern und Fahrbahnübergänge
17	Materialkennwerte aus Werkstoffuntersuchungen

## Straßenbrücken: Nachrechnungsrichtlinie

- Genaue Bewertung des aktuellen Bauwerkzustandes
- Reihung und Auswahl der vorrangig zu untersuchenden Brücken:  
2.200 Brücken-Teilbauwerke mit höchster Priorität  
(entspricht 5% Anzahl Bauwerke, gleichzeitig 25% Gesamtbrückenfläche!)
- Objektbezogene Nachrechnung:  
Ermittlung der erforderlichen Maßnahmen
- Bewertung der Frage Instandsetzung/ Verstärkung vs. Ersatzneubau
- Erhaltungsplanung mit systematischer Brückenertüchtigungsplanung



## Straßenbrücken: Nachrechnungsrichtlinie



Quelle: Marzahn, Beton- und Stahlbetonbau, 11/2011

## Straßenbrücken: Nachrechnungsrichtlinie

- Die **Stufe 1** umfasst eine ausschließliche **Nachweisführung nach den DIN Fachberichten 102 bis 104** bzw. nach den Eurocodes DIN EN 1992 bis 1994 und 1996. Für Mauerwerk gilt für die Nachweisführung DIN 1053-100.
- Die **Stufe 2** berücksichtigt spezielle, die Stufe 1 **ergänzende Regelungen der Nachrechnungsrichtlinie**.
- Die **Stufe 3** berücksichtigt am Bauwerk ermittelte **Messergebnisse**. Im Regelfall finden die Messungen unter einer Probelast im Gebrauchslastbereich statt und betreffen Tragwerksverformungen an kritischen Stellen und Dehnungsmessungen an ausgewählten Bauteilen.  
Durch die Messung erfasst man das tatsächliche Tragverhalten unter Gebrauchslasten und erhält Hinweise für eine realistischere Beschreibung des Bauwerkverhaltens. Die Stufe 3 kann der Validierung des gewählten Tragmodells dienen, ist jedoch wegen des besonderen Aufwands **nur im Sonderfall** und in Abstimmung mit den Obersten Straßenbaubehörden der Länder anzuwenden.
- Die **Stufe 4** schließt **wissenschaftliche Methoden** zum Nachweis ausreichender Tragsicherheit ein, wie z.B. spezielle geometrisch und physikalisch nichtlineare Verfahren. Der Nachweis ausreichender Tragsicherheit darf ggf. durch direkte Ermittlung der rechnerischen Versagenswahrscheinlichkeit mit Hilfe probabilistischer Methoden geführt werden. Die Stufe 4 kann mit den Stufen 2 und 3 kombiniert werden, ist jedoch **nur im Sonderfall** und in Abstimmung mit den Obersten Straßenbaubehörden der Länder anzuwenden.

Quelle: Nachrechnungsrichtlinie

## Straßenbrücken: Nachrechnungsrichtlinie

### Beispiel: Werkstoffkennwerte

#### 11.6 Rechenwerte für Verbindungsmittel im Stahlbau

- (1) Für geschraubte Verbindungen gilt DIN-Fachbericht 103, II-3.3.2 und II-6.5. Es dürfen in Abhängigkeit von der Festigkeitsklasse die charakteristischen Werte der Streckgrenze und der Zugfestigkeit nach DIN-Fachbericht 103, Tabelle II-3.3.a verwendet werden.
- (2) Nietverbindungen sind in die Kategorie A nach DIN-Fachbericht 103, II-6.5.3 einzustufen. Für Niete gelten die charakteristischen Werte der Festigkeit nach Tabelle 11.8 unter Berücksichtigung der Zuordnungen zu den Grundwerkstoffen.

**Anmerkung:** Bauteilen aus St 52 ist ein Nietwerkstoff St 44 und Bauteilen aus St 37 ein Nietwerkstoff St 34 zugeordnet. Mit der Einführung der DIN 1073:1974-07 wurde für Bauteile aus St 37 ein Nietwerkstoff St 36 gefordert. Es wird eine experimentelle Prüfung der Zugfestigkeit des Nietwerkstoffs empfohlen.

**Tabelle 11.8** Nietwerkstoffe und Zuordnung zu den Grundwerkstoffen

1	2		3
Grundwerkstoff	St 37		St 52
Nietwerkstoff	St 34 bis 1974	USt 36 ab 1974	RSt 44
Streckgrenze $f_{y,r,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	205		250
Zugfestigkeit $f_{u,r,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	330		440

Quelle: Nachrechnungsrichtlinie

## Straßenbrücken: Nachrechnungsrichtlinie

### Beispiel: Stahl- und Stahlverbundbrücken

#### 13.3.3 Teilsicherheitsbeiwerte auf der Widerstandsseite

- (1) Wenn keine genaueren Untersuchungen durchgeführt werden, gelten für Stahlbauteile beim Nachweis der Tragsicherheit die in Tabelle 13.1 angegebenen Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M$ .

**Tabelle 13.1** Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M$  für den Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit

1	2	3	4	5	6
Stahlgüte	Ständige und vorübergehende Bemessungssituationen			Außergewöhnliche Bemessungssituationen	
	$\gamma_{M,0}$	$\gamma_{M,1}$	$\gamma_{M,2}$	$\gamma_{M,0}; \gamma_{M,1}$	$\gamma_{M,2}$
Schweißbeisen und Flusseisen vor 1900	1,1	1,2	1,40	1,0	1,30
Flusseisen nach 1900 und Flussstahl	1,1	1,15	1,35	1,0	1,25
Baustahl St 37	1,0	1,1	1,25	1,0	1,15
Baustahl St 48	1,0	1,1	1,25	1,0	1,15
Baustahl St 52	1,0	1,1	1,25	1,0	1,15

Quelle: Nachrechnungsrichtlinie

## Straßenbrücken: Nachrechnungsrichtlinie

### Beispiel: Stahl- und Stahlverbundbrücken

#### 13.5 Verbindungsmittel, Schweißnähte und Anschlüsse

- (1) Für Verbindungsmittel, Schweißnähte und Anschlüsse gelten die Regelungen nach DIN-Fachbericht 103, II-5.6.
- (2) Nietverbindungen sind in die Kategorie A nach DIN-Fachbericht 103, I-6.5.3 einzustufen. Eine planmäßige Beanspruchung von Nietverbindungen auf Zug ist nicht zulässig. Es sind die folgenden Nachweise zu führen

- Abschertragfähigkeit je Scherfuge

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} \leq 1,0 \quad (13.1)$$

$$F_{V,Rd} = \alpha_t \cdot \frac{f_{tr,k} \cdot A_b}{\gamma_{M,2}} \quad (13.2)$$

- Lochleibung

$$\frac{F_{b,Ed}}{F_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (13.3)$$

$$F_{b,Rd} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot \frac{f_{u,k} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M,2}} \quad (13.4)$$

Quelle: Nachrechnungsrichtlinie

## Straßenbrücken: Nachrechnungsrichtlinie

### Beispiel: Stahl- und Stahlverbundbrücken

#### 13.6.2 Kopfbolzendübel und Bolzendübel

- (1) Für die Tragfähigkeit von Kopfbolzendübeln gilt DIN-Fachbericht 104, II-6.3.2.
- (2) Die Abschertragfähigkeit von Bolzendübeln ergibt sich aus dem kleineren Wert von

$$P_{Rd} = \frac{0,7 \cdot f_{yk} \cdot \pi \cdot d^2 / 4}{\gamma_v} \quad (13.5)$$

- (3) Bei Kopfbolzendübeln oder Bolzendübeln mit Wendeln darf keine Tragfähigkeits-erhöhung durch die Wendel in Rechnung gestellt werden.

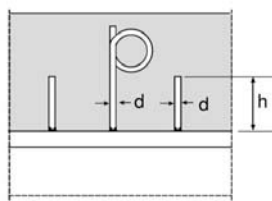
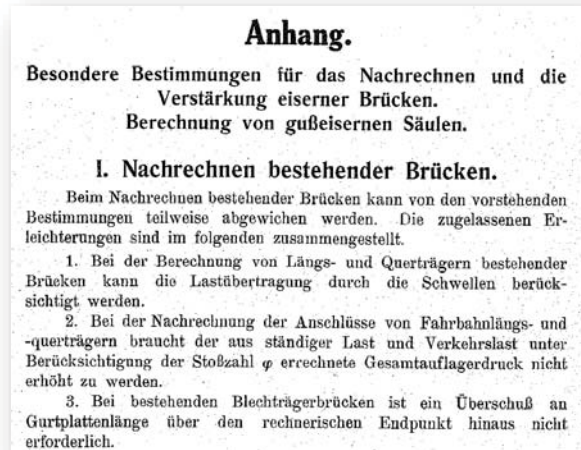


Bild 13.1 Bolzendübel

Quelle: Nachrechnungsrichtlinie

### Eisenbahnbrücken / Eisenbahnüberführungen

Für Eisenbahnbrücken existieren bereits seit 1925 Ansätze zur Nachrechnung in den „Berechnungsgrundlagen für Eisenbahnbrücken (BE)“ im Abschnitt „Besondere Bestimmungen für das Nachrechnen und die Verstärkung eiserner Brücken. Berechnung von gußeisernen Säulen“. Hier waren gewisse Erleichterungen gegenüber den Neubauten festgelegt.



Quelle: Historische Vorschriften im Bauwesen,  
<http://www.hivobau.de/>

21. Bei bestehenden Brücken können die im Abschnitt D. X. genannten zulässigen Spannungen von Auflagersteinen usw. um 10 % erhöht werden. Auflagersteine brauchen nur ausgewechselt zu werden, wenn sie bedenkliche Schäden aufweisen.  
22. Wegen Überschreitung der zulässigen Durchbiegung ist im allgemeinen keine Verstärkung bestehender Brücken nötig, wenn sich der Überbau im Betriebe einwandfrei verhält.  
23. Bei bestehenden Brücken, die auf Grund dieser Erleichterungen eingestuft sind, ist dies besonders durch Einklammerung der Brückenklasse, z. B. [G], kenntlich zu machen.

### Eisenbahnüberführungen

#### **Richtlinie 805: Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken**

Bewertung der Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken (älter als 6 Jahre)

→ geschlossenes Nachweissystem, basierend auf dem Teilsicherheitskonzept

→ differenzierte und getrennte Berücksichtigung von Einflüssen auf

- die Beanspruchung (z.B. Genauigkeit der Erfassung von Konstruktions- und Schotterlasten)
- die Beanspruchbarkeit (z.B. Alter und baulicher Zustand)

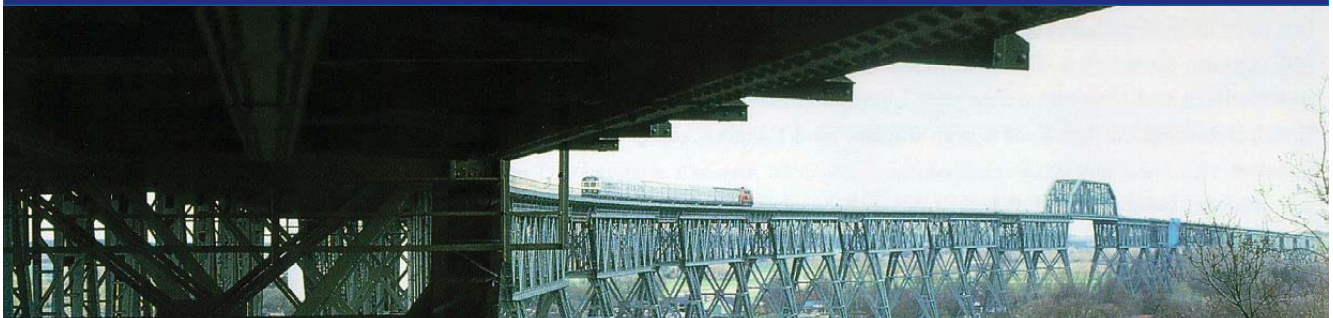


### Eisenbahnüberführungen

#### **Richtlinie 805: Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken**

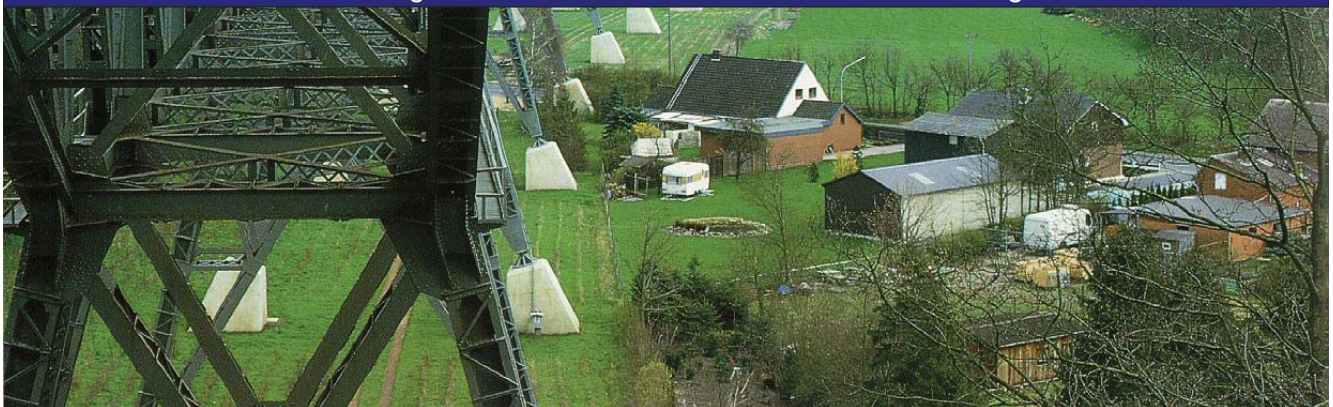
Definition von 4 Bewertungsstufen:

- Stufe 1:  
Abschätzung der Tragsicherheit
  - Stufe 2:  
Überschlägige Ermittlung der Tragsicherheit  
(am einfachen ebenen Modell)
  - Stufe 3:  
Genaue Ermittlung der Tragsicherheit (mit  
komplexem Rechenmodell,  
Spannungsermittlung mit Ist-Querschnitten)
  - Stufe 4:  
Messwertgestützte Ermittlung der  
Tragsicherheiten
- Schnelle Einstufung bzw. Umstufung  
von Brücken
- vollständiger Nachweis ULS / SLS,  
basierend auf detailliertem Rechen-  
modell (Brücke älter als 60 Jahre:  
Restnutzungsdauernachweis)



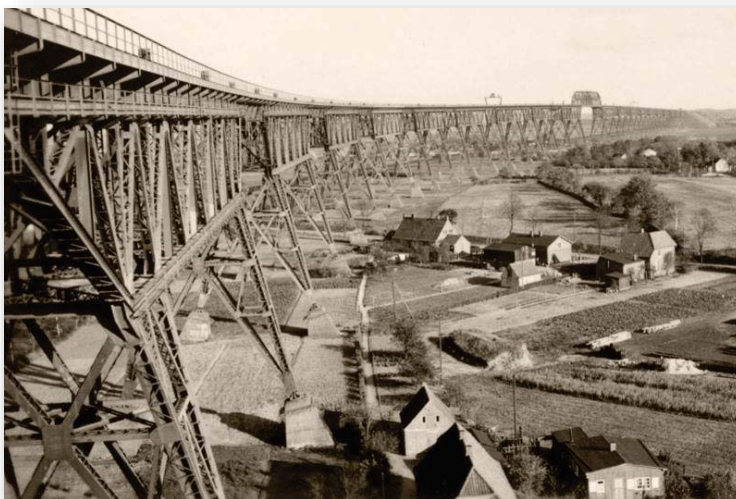
**Eisenbahnbrücke Hochdonn**

Sanierung / Sicherheits- und Restlebensdauervorhersage



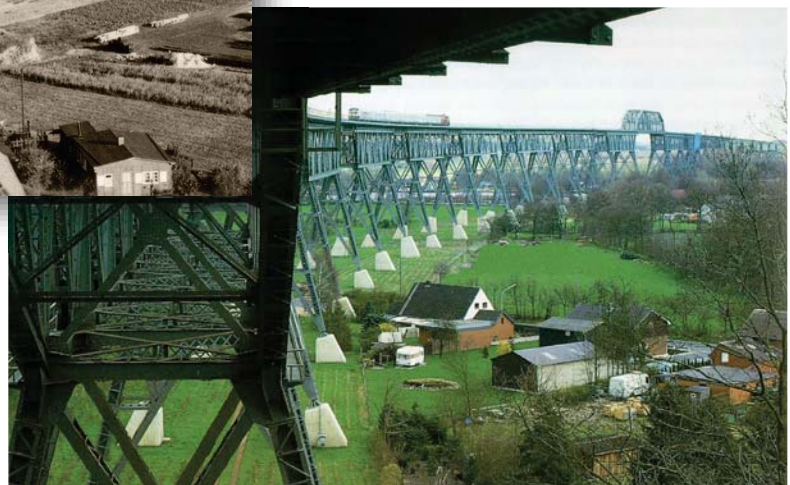


## Nord-Ostsee-Kanal



*Ansicht von der Nordseite, 01.07.1920  
Sammlung Uwe Möller*

*Ansicht von der Nordseite, um 2000*



## Bauwerksmerkmale der Eisenbahnhochbrücke Hochdonn

genietete Stahlbrücke:  
ca. 5 Mio Niete

Bauzeit:  
1913 – 1920

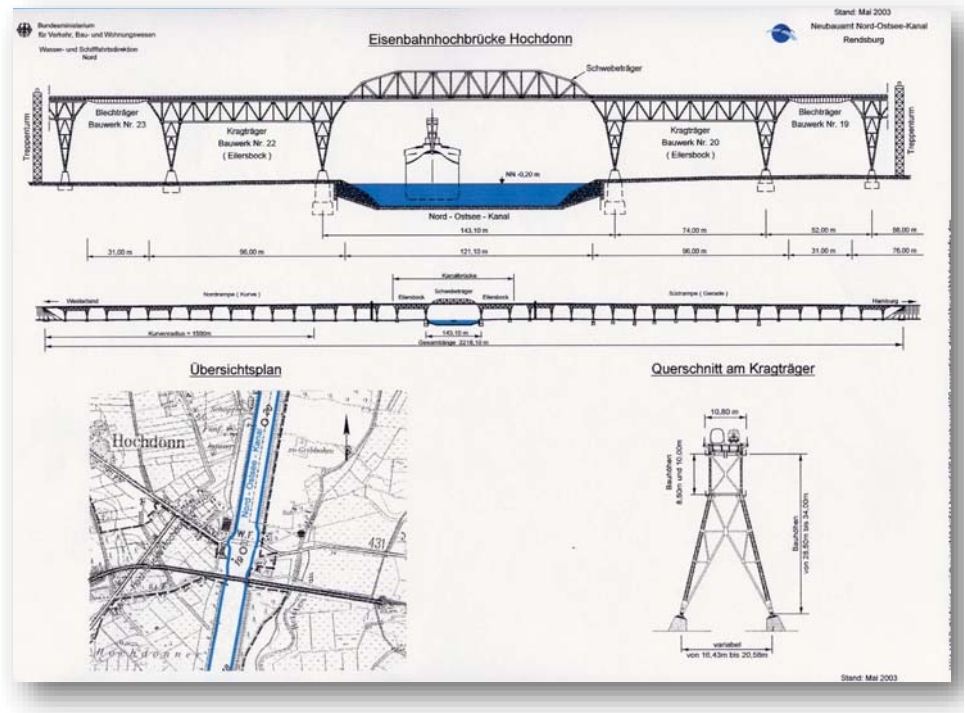
Verkehrsübergabe:  
30.06.1920

lichte Durchfahrtshöhe:  
42m

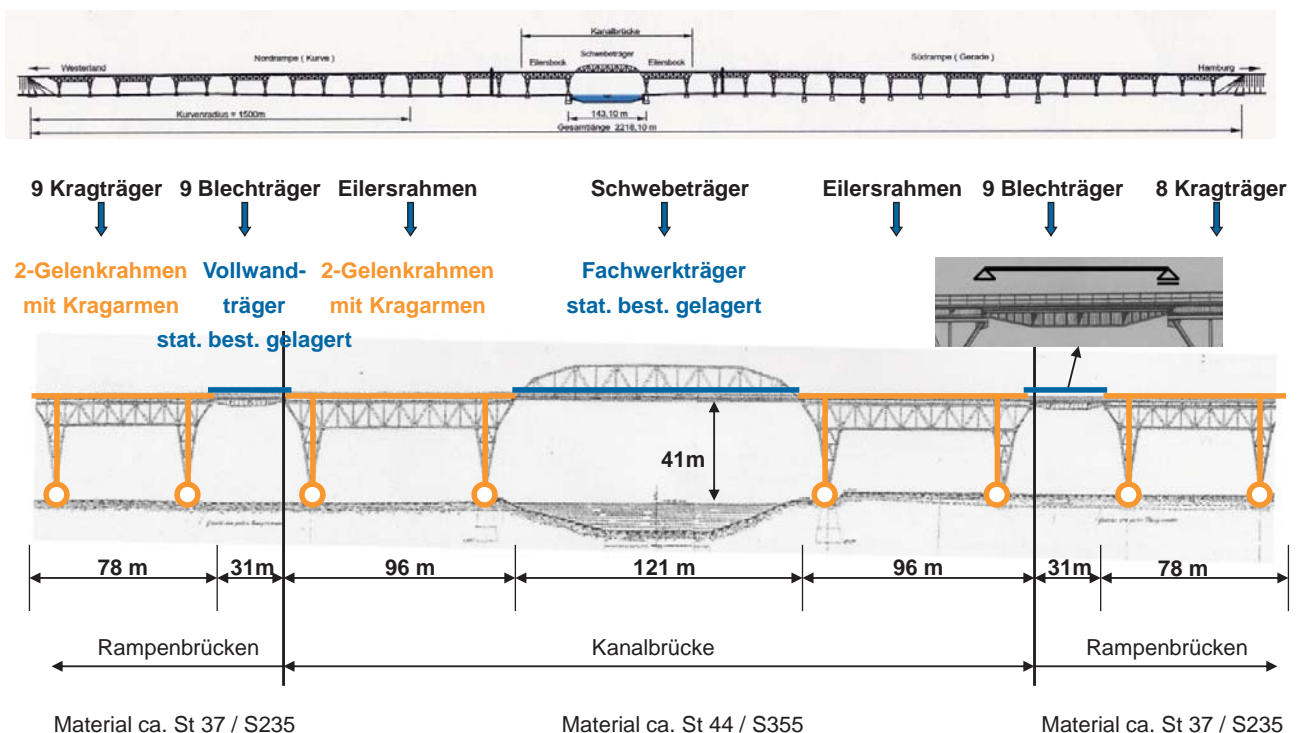
Gesamtlänge:  
2.218m

Stahlgewicht:  
14.745 to

Anstrichfläche:  
217.640 m<sup>2</sup>

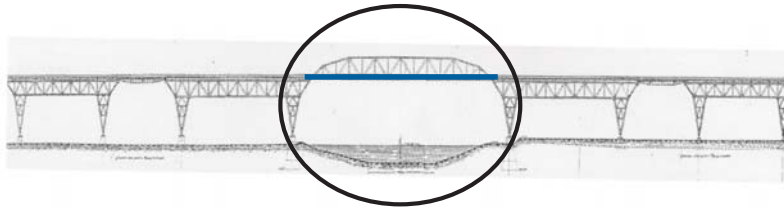


## Bauwerksübersicht

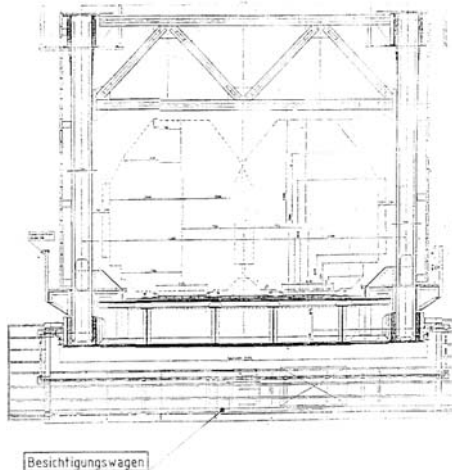




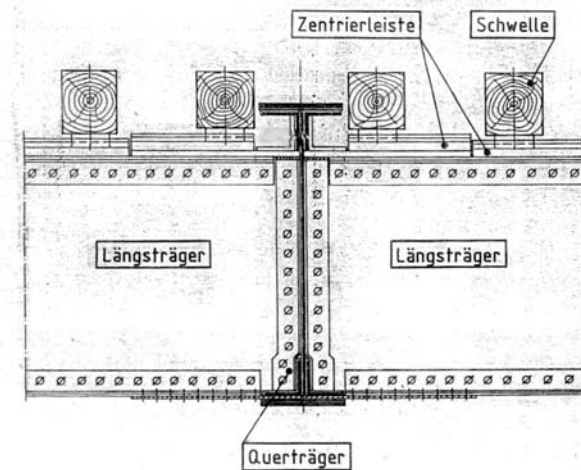
## Schwebeträger



stat. best. gelagerter Fachwerkträger  
121 m Spannweite  
Festlager: Nordseite  
Gleitlager: Südseite



Schnitt Schwebeträger bei Querverband 1-1

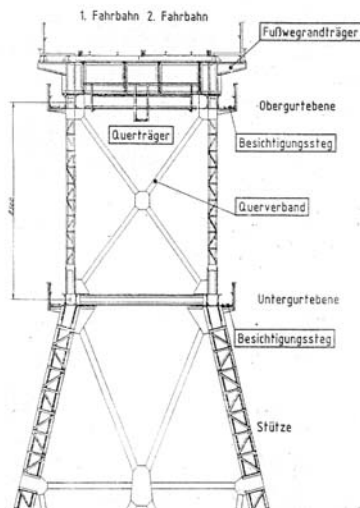


Längsschnitt im Schwebeträger

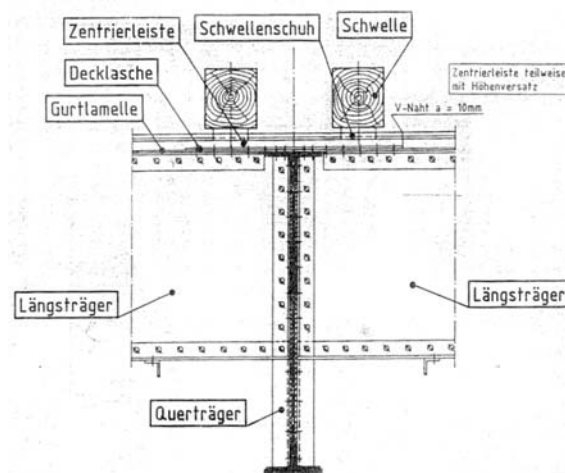
## Kragträger / Eilersrahmen



Räumlicher Zweigelenrahmen mit  
angehängten Kragarmen  
74 m Stützweite (Eilersrahmen)  
56 m Stützweite (Kragträger)

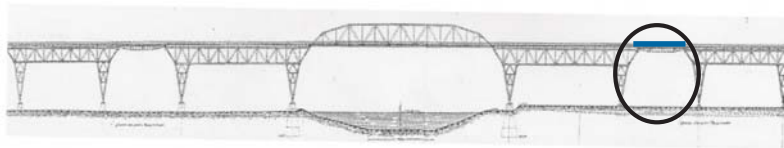


Schnitt Kragträger über den Stützen

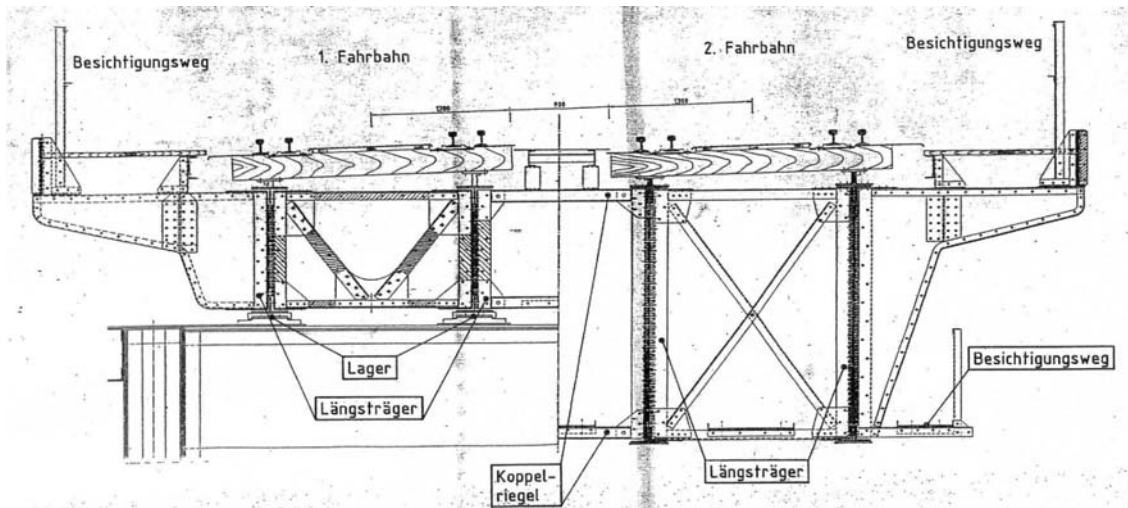


Längsschnitt im Kragträger

## Blechträger



Schnitte im Blechträger  
am Auflager 2. Kragträger Mitte Blechträger



stat. best. gelagerte Vollwandträger  
zwei Vollwandträger pro Gleis  
31 m Spannweite

25

Verbundbau / Wintersemester 2014/2015

## Ursprüngliche Lastannahmen und Berechnungen (1912)

1912

- „Erlaß des preußischen Ministers der öffentlichen Arbeit von 1903“



Quelle: Historische Vorschriften im Bauwesen, <http://www.hivobau.de/>

26

Verbundbau / Wintersemester 2014/2015



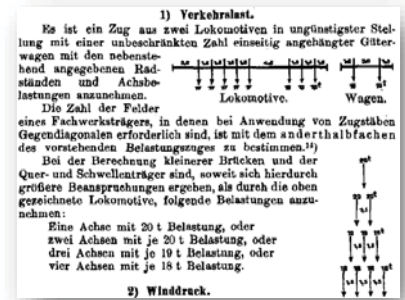
## Ursprüngliche Lastannahmen und Berechnungen (1912)

### Eigengewicht der Konstruktion

- basierend auf Entwurfsbemessung
- Unterschätzung der Lasten (Schwebträger: 16%)

### Verkehrslasten

- Lastenzug „A“ („Erlass des preußischen Ministers der öffentlichen Arbeit von 1903“)
- zusammenhängender Zug
- zweigleisiger Verkehr
- 2 Lokomotiven m. Tendern
- unbegrenzte Anzahl einseitig angehängter Güterwagen
- Lasterhöhung: 20% (prophylaktisch)



Jahr	Lok und Tender	Wagen	Alternative Lastgruppen	Kombination
Preußischer Lastenzug A: stat. Berechnung 1912	Lastbild ①	Lastbild ②	Lastbilder ③ bis ⑥	① +
				① +
				① +
				① +

## Ursprüngliche Lastannahmen und Berechnungen (1912)

### Baugrundbewegungen

- Setzungen / Verschiebungen nicht angesetzt

### Fliehkräfte

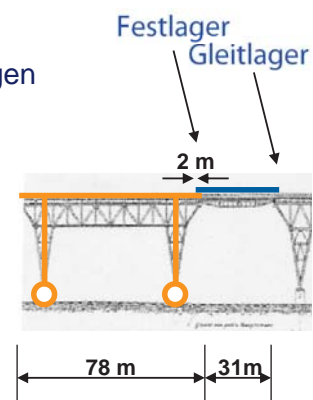
- Entwurfsgeschwindigkeit:  $v = 100 \text{ km/h}$
- Lastangriffspunkt (horizontale Linienlast): 1,5 m über Schienenoberkante  
→ Änderung inf. Umbaus 1972 (Einbau von Zentrierleisten)

### Schwing- und Stoßfaktoren

- nicht in den Lastannahmen erfasst (damaliger Stand der Technik)
- jedoch: erfasst durch den Ansatz relativ niedriger zulässiger Spannungen

### Anfahr- und Bremslasten

- Anfahrlasten: nicht angesetzt (erst mit Einführung der BE in den 1930er Jahren)
- Bremslasten: Ansatz mit 1/7 des gebremsten Zuggewichts, Zuglänge orientiert sich an statischem System (Rampenbereich: ca. 76m + 31m)



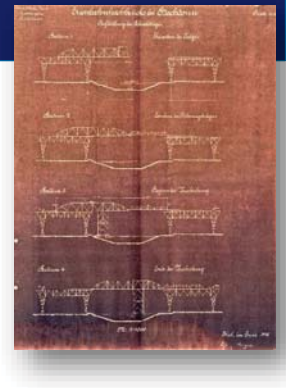
## Ursprüngliche Lastannahmen und Berechnungen (1912)

### Windlasten

- Winddruck, belastete Brücke: 1,50 kN/m<sup>2</sup>
- Winddruck, unbelastete Brücke: 2,50 kN/m<sup>2</sup>

### Nachweisführung

- Standsicherheitsnachweis: Konzept der zulässigen Spannungen



### Zulässige Spannungen in der Entwurfsstatik

Flusseisen mit $\sigma_B = 3.700 - 4.400 \text{ kg/cm}^2$ ( $\sigma_B = 37 - 44 \text{ kN/cm}^2$ )	Eigengewicht + Verkehr	Eigengewicht + Verkehr + Wind	Eigengewicht + Verkehr + Wind + Temperaturschub + Montagelastfall
	kg/cm <sup>2</sup> (kN/cm <sup>2</sup> )	kg/cm <sup>2</sup> (kN/cm <sup>2</sup> )	kg/cm <sup>2</sup> (kN/cm <sup>2</sup> )
Fahrbahnträger	750 (7,5)		
Blechträger	875 (8,75)	1.025 (10,25)	
Fachwerkträger Rampenbrücken	925 (9,25)	1.075 (10,75)	1.275 (12,75)
Hauptträger der Kanalbrücke	1.000 (10,0)	1.150 (11,50)	1.400 (14,00)

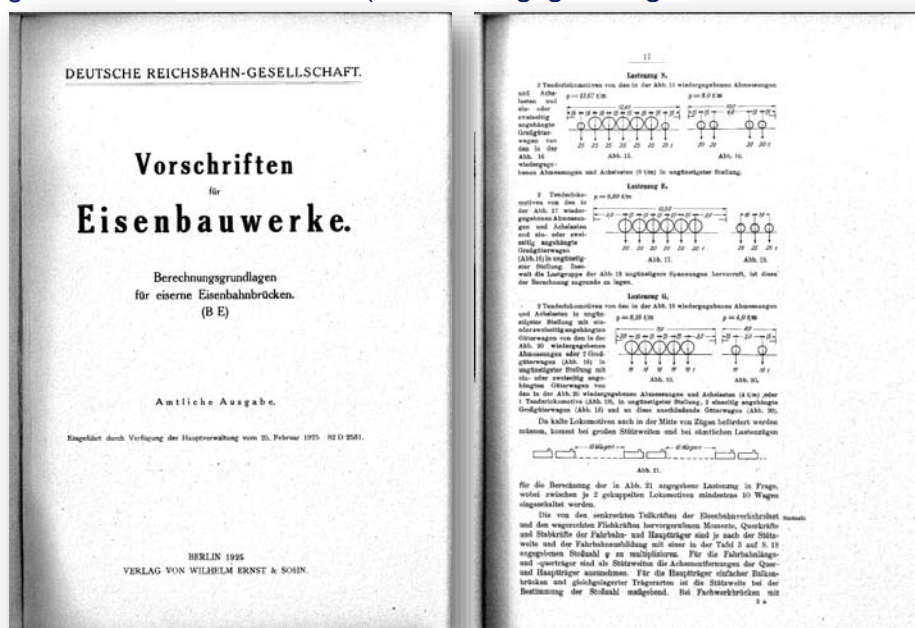
Bei den Druckgliedern wurde nach der „Euler'schen Formel“ eine 5 fache Sicherheit gegen Knicken nachgewiesen.

# Erhaltung stählerner Tragwerke

## Neuere Lastannahmen, Nachweise und konstruktive Eingriffe

### 1925 - 1930

- Einführung der neuen BE 82 D 2531 (Berechnungsgrundlagen für eiserne Eisenbahnbrücken)



Quelle: Historische Vorschriften im Bauwesen, <http://www.hivobau.de/>

## Neuere Lastannahmen, Nachweise und konstruktive Eingriffe

### 1925 - 1930

- Einführung der neuen BE 82 D 2531 (Berechnungsgrundlagen für eiserne Eisenbahnbrücken)
- erneute Berechnung für Lastzüge „E“ und „G“

Jahr	Lok und Tender	Wagen	Alternative Lastgruppen	Kombination
Preußischer Lasten Zug A: stat Berechnung 1912	Lastbild ①	Lastbild ②	Lastbilder ③ bis ⑥	① + ① + n x ② oder ③ oder ④ oder ⑤ oder ⑥
	<p>Alternative Streckenlast: <math>q = 68,89 \text{ kN/m}</math></p> <p>Ansatz: 2 x (Lok + Tender)</p> <p>Bem.: Für Schwebeträger und Kragträger werden alle Verkehrslasten um 20% erhöht</p>	<p>Alt. Streckenlast: <math>q = 43,3 \text{ kN/m}</math></p>		
Jahr	Lok und Tender	Wagen	Alternative Lastgruppen	Kombination
Lastenzug E: stat Berechnung 1925/30	Lastbild ①	Lastbild ②	Lastbilder ③ bis ⑥	①+① + n x ② oder n x ②+① + ①+n x ② oder ③
	<p>Wagen nx 1seitig oder 2-seitig angehängt 6 x 200 kN</p> <p>Alternative Streckenlast: <math>q = 88,9 \text{ kN/m}</math></p>	<p>Alt. Streckenlast: <math>q = 80 \text{ kN/m}</math></p>		

## Neuere Lastannahmen, Nachweise und konstruktive Eingriffe

### 1925 - 1930

- Einführung der neuen BE 82 D 2531 (Berechnungsgrundlagen für eiserne Eisenbahnbrücken)
- erneute Berechnung für Lastzüge „E“ und „G“
- Stand sicherheitsnachweis: Konzept der zulässigen Spannungen

Flusseisen mit $\sigma_B = 3.700 - 4.400 \text{ kg/cm}^2$ ( $\sigma_B = 37 - 44 \text{ kN/cm}^2$ )	Eigengewicht + Verkehr	Eigengewicht + Verkehr + Wind	Eigengewicht + Verkehr + Wind + Temperaturschub + Montagelastfall
	kg/cm <sup>2</sup> (kN/cm <sup>2</sup> )	kg/cm <sup>2</sup> (kN/cm <sup>2</sup> )	kg/cm <sup>2</sup> (kN/cm <sup>2</sup> )
Fahrbahnträger	750 (7,5)		
Blechträger	875 (8,75)	1.025 (10,25)	
Fachwerkträger	925 (9,25)	1.075 (10,75)	1.275 (12,75)
Hauptträger der Kanalbrücke	1.000 (10,0)	1.150 (11,50)	1.400 (14,00)
Flusseisen mit $\sigma_B = 3.700 - 4.400 \text{ kg/cm}^2$ ( $\sigma_B = 37 - 44 \text{ kN/cm}^2$ )	Eigengewicht + Verkehr	Eigengewicht + Verkehr + Wind	Eigengewicht + Verkehr + Wind + Temperaturschub + Montagelastfall
	kg/cm <sup>2</sup> (N/cm <sup>2</sup> )	kg/cm <sup>2</sup> (N/cm <sup>2</sup> )	kg/m <sup>2</sup> (N/cm <sup>2</sup> )
Rampenbrücken St 37			
Fahrbahnträger	1.500 (15)		
Hauptträger	1.500 (15)	1.800 (18)	
Kanalbrücken Schwebeträger St.44 ( $\sigma_S = 3.000 \text{ kg/cm}^2$ / $\sigma_S = 30 \text{ kN/cm}^2$ )			
Fahrbahnträger	1.800 (18)		
Hauptträger, Fachwerkträger	1.800 (18)	2.160 (21,6)	

### Neuere Lastannahmen, Nachweise und konstruktive Eingriffe

#### 1925 - 1930

- Einführung der neuen BE 82 D 2531 (Berechnungsgrundlagen für eiserne Eisenbahnbrücken)
- erneute Berechnung für Lastzüge „E“ und „G“
- Stand sicherheitsnachweis: Konzept der zulässigen Spannungen
- Erfassung der teilweise fertigungsbedingten Profiländerungen aus der Bauzeit



#### Maßnahmen:

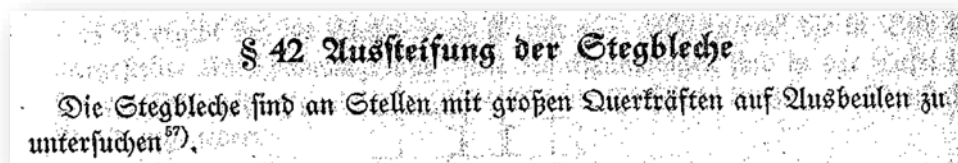
- Verstärkungen für den Lastenzug „E“ (kriegsbedingt) nicht durchgängig durchgeführt, Freigabe 1945



### Neuere Lastannahmen, Nachweise und konstruktive Eingriffe

#### 1934

- Einführung der neuen Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken
- Beulnachweise:  
Aussteifung der Stegbleche, Verweis auf F. Bleich, Theorie und Berechnung der eisernen Brücken (S. 285, Tafel 31), Berlin 1924, Verlag Julius Springer



#### Maßnahmen:

- Ausführung erforderlicher Beulsteifen  
erfolgte nur auf dem Westgleis, kriegsbedingt kam das Ostgleis nicht mehr zur Ausführung (eine spätere Ausführung unterblieb)



### Neuere Lastannahmen, Nachweise und konstruktive Eingriffe

1972

- Fahrwegerneuerung: Austausch der bestehenden Schwellen + Schwellenbefestigung (Regelbauweise)



Schienensanierung 1971, Sammlung Uwe Möller

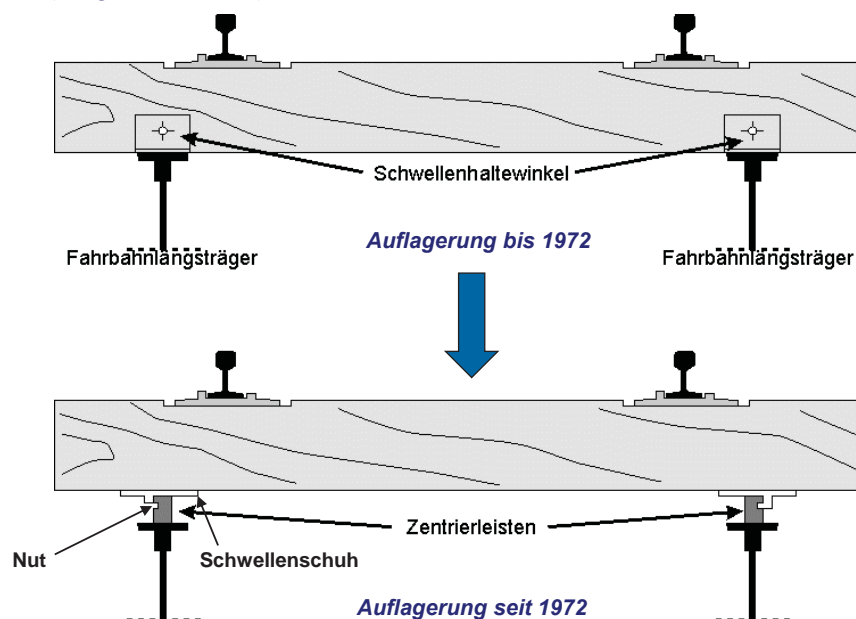


## Erhaltung stählerner Tragwerke

### Neuere Lastannahmen, Nachweise und konstruktive Eingriffe

1972

- Fahrwegerneuerung: Austausch der bestehenden Schwellen + Schwellenbefestigung (Regelbauweise)



Zentrierleiste

Zentrierleiste:

Vollquerschnitt

$b = 50\text{mm}$ ,  $h = 45\text{-}160\text{mm}$

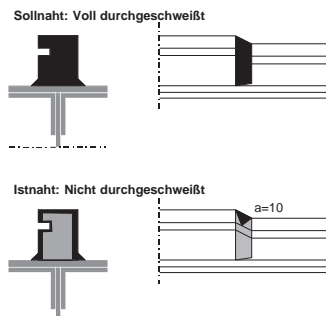
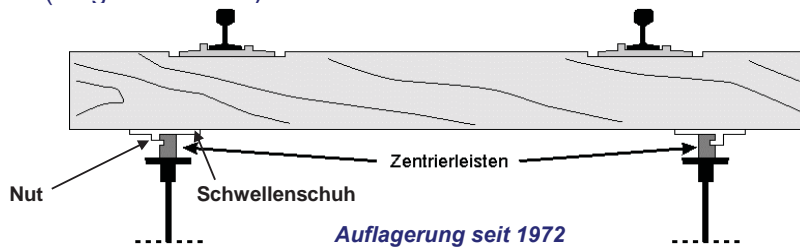
Schwellenschuh: greift abwechselnd  
in linke und rechte Nut



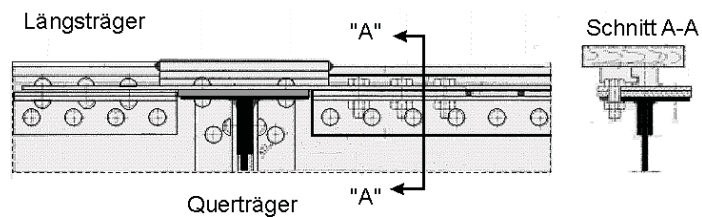
### Neuere Lastannahmen, Nachweise und konstruktive Eingriffe

1972

- Fahrwegerneuerung: Austausch der bestehenden Schwellen + Schwellenbefestigung (Regelbauweise)



Schweißnahtausführung an der Zentrierleiste



Zentrierleiste am Anschluss Längsträger - Querträger

Zentrierleiste:

- längs auf Obergurte der Schwellenträger aufgeschweißt (Kehlnähte)
- an Stoßpunkten mit teilversenkten Nähten verbunden
- Stoßpunkte: ungewollte Durchlaufwirkung der Längsträger („Oberflansch“ ohne zusätzlichen „Unterflansch“)

### Neuere Lastannahmen, Nachweise und konstruktive Eingriffe

1978, 1993

- Schiffsanprall (Havariefälle) (1978: „Karl Marx“, 1993: „Kanook Narre“) Beschädigung der Untergurte des Schwebeträgers sowie seiner Lager



DDR-Schergutsschiff „Karl Marx“ nach der Havarie am 25.11.1978



vor der Havarie (www.seefunkstelle.de)



Auslöser für umfassende Grundlagenuntersuchungen zur Beurteilung der weiteren Verwendbarkeit der Brücke (seit 1996: über 80 Einzeluntersuchungen)

### Grundlagenuntersuchungen: Sicherheits- und Restnutzungsdaueruntersuchungen

- Tragfähigkeit:  
Bemessung nach seinerzeit gültigen Verkehrslasten (aus heutiger Sicht: Verwendung vereinfachter Berechnungsmodelle)  
→ Bewertung für moderne Verkehrslasten unter Ansatz moderner Rechenverfahren (aktuelles Lastmodell UIC 71 nach DS 804, Ausnutzung und Klassifizierung nach Verkehrsklassen)  
→ Berücksichtigung dynamischer Lasten (Brems- und Beschleunigungslasten) bei der Bemessung von Lagern und Fundamenten  
→ Berücksichtigung von Temperatureinwirkungen auf Fahrweg und Bauwerk
- Restnutzungsdauer:  
Ermüdungsschaden aufgrund von Verkehr in Vergangenheit und Zukunft unter Berücksichtigung von nachträglichen Veränderungen
- Spröbruch kritischer Details
- Sicherheitsbewertung für außergewöhnliche Belastungssituationen: Schiffsanprall
- Nietkopfabrostung

### unter Berücksichtigung der tatsächlichen

- Materialeigenschaften (Festigkeit, chemische Zusammensetzung, Zähigkeit, ..)
- Geometrie / Bauwerksmerkmale

## Erhaltung stählerner Tragwerke

### Fragestellung:

- Sanierung der Brücke (und weiterer Betrieb)
- Abriss und Neubau

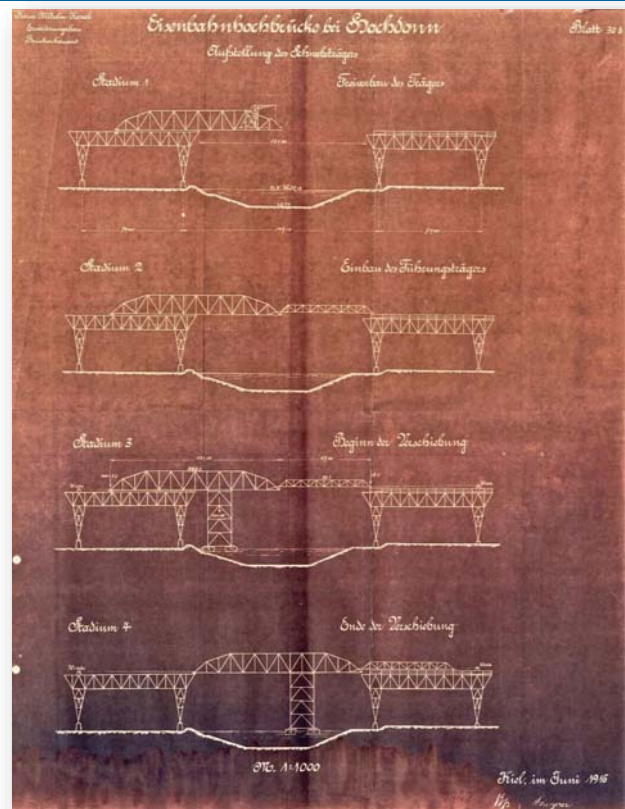


Bauwerk stellt aufgrund seiner Lage einen Engpass dar

### Zielsetzung:

Erbringung des Nachweises der weiteren Verwendbarkeit der Brücke für heutige Anforderungen aus Güterverkehr und Personenverkehr durch

- rechnerische Untersuchungen
- experimentelle Untersuchungen



### Restnutzungsdaueruntersuchungen

Ermüdungsschaden unter Berücksichtigung von

- Verkehr in der Vergangenheit
- Verkehr in der Zukunft
- nachträglichen baulichen Veränderungen



### Sicherheits- und Restnutzungsdaueruntersuchungen

#### Ermittlung von Schaden und Restnutzungsdauer basierend auf dem Wöhlerlinienkonzept

- Identifikation kritischer Details
- Ermittlung realistischer Belastungsszenarien für die Vergangenheit und die Zukunft
- Ermittlung des Schadens aus der Vergangenheit
- Ermittlung der verbleibenden "Schadenskapazität" für die Zukunft
- Ermittlung der Restnutzungsdauer

#### Bruchmechanische Untersuchungen (Rissfortschrittsberechnungen)

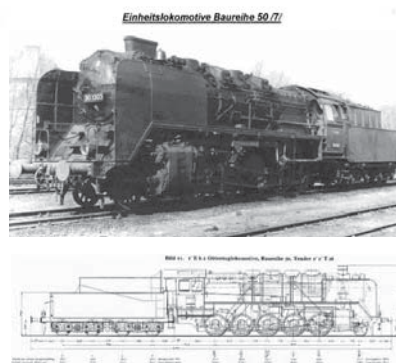
- Identifikation kritischer Details
- Ermittlung realistischer Belastungsszenarien für die Zukunft
- Annahme eines Anfangsrisses
- Rissfortschrittsberechnung bis zum Eintreten eines Sprödbruchs / plastischen Versagens
- Ermittlung der Restnutzungsdauer



## Sicherheits- und Restnutzungsdaueruntersuchungen

6 Zeitepochen mit jeweils 3-4 Zugtypen

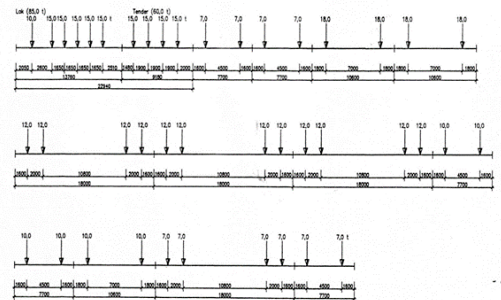
Zeitabschnitt	Bezeichnung der Periode
1920 - 1935	1
1936 - 1950	2
1951 - 1965	3
1966 - 1980	4
1981 - 1995	5
ab 1996	6



Herbstzeit lieferte von April bis Juli 1939 die ersten 12 Lokomotiven der Baureihe 50. Nach dem Kriegsausbruch am 01.09.1939 stieg der Bedarf an Güterlokomotiven sprunghaft an. Insgesamt wurden 1164 Maschinen der BR 50 im Auftrag der DRG gebaut. Ein der DB zählte die Baureihe 50 auch 1976 noch zum Unterhaltungsbestand.

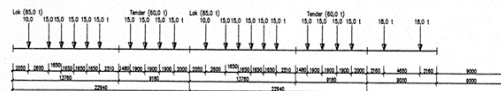
Typenvertreter für gemischte Güterzüge (Typ 2.3)

Lok BR 50 + 12 Stck. Güterwagen (4 Stck. vierachsiger ; 8 Stck. zweiachsiger) ;  $\Sigma P = 491,0 \text{ t}$



Typenvertreter für Ganzzüge (Typ 2.4) \*)

2 Loks BR 50 + 30 Stck. zweiachsige Güterwagen ;  $\Sigma P = 1375,0 \text{ t}$



\*) Anstatt im Verspannbetrieb kann die zweite Lok auch am Zugende im „Schleppbetrieb“ gefahren sein.

## Sicherheits- und Restnutzungsdaueruntersuchungen

6 Zeitepochen mit jeweils 3-4 Zugtypen

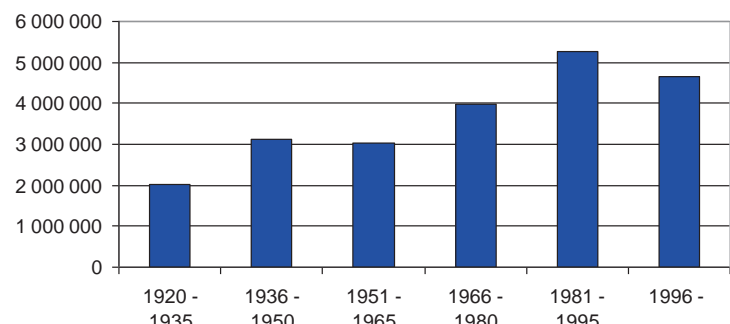
Überblick: Verkehrslastmodell (Belastungen pro Gleis der Brücke)

Verfahren: Verkehrslastmodell (Belastungen pro Gleis der Brücke)												
Zeitabschnitt	Bezeichnung der Periode	Dauer in Jahren	Zugtyp	Züge pro Tag (Stück)		Züge pro Jahr (Stück)		Tonnage pro Zug	Bruttotonnage pro Jahr		v [km/h]	Gleislagefaktor
1920 - 1935	1	16	1.1	7	Σ =15	2555	Σ =5475	256.8	656 124	Σ =2 005 347	60	1,0
			1.2	5		1825		470.5	858 663		70	
			1.3	3		1095		448.0	490 560		60	
1936 - 1950	2	15	2.1	10	Σ =20	3650	Σ =7300	270.8	988 420	Σ =3 110 165	60	1,0
			2.2	6		2190		495.0	1 084 050		70	
			2.3	3		1095		491.0	537 645		60	
			2.4	1		365		1370.0	500 050		50	
1951 - 1965	3	15	3.1	10	Σ =1							
			3.2	6								
			3.3	2.2								
			3.4	0.3								
1966 - 1980	4	15	4.1	20	Σ =3							
			4.2	10								
			4.3	2.2								
			4.4	0.3								
1981 - 1995	5	15	5.1	25	Σ =3							
			5.2	10								
			5.3	2.2								
			5.4	0.3								
ab 1996	6	-	6.1	29	Σ =3							
			6.2	6								
			6.3	2.2								
			6.4	0.3								

### Entwicklung der Bruttotonnage pro Jahr

Jahr	Bruttotonnage pro Jahr
1920 -	2 000 000
1936 -	3 100 000
1951 -	3 000 000
1966 -	4 000 000
1981 -	5 200 000
1996 -	4 600 000

Entwicklung der Bruttotonnage pro Jahr



### Sicherheits- und Restnutzungsdaueruntersuchungen

Überfahrtsimulationen jedes Zugtypenvertreters  
mit dem Programm DYNACS  
(werkstofflich und geometrisch nichtlineare Analyse)

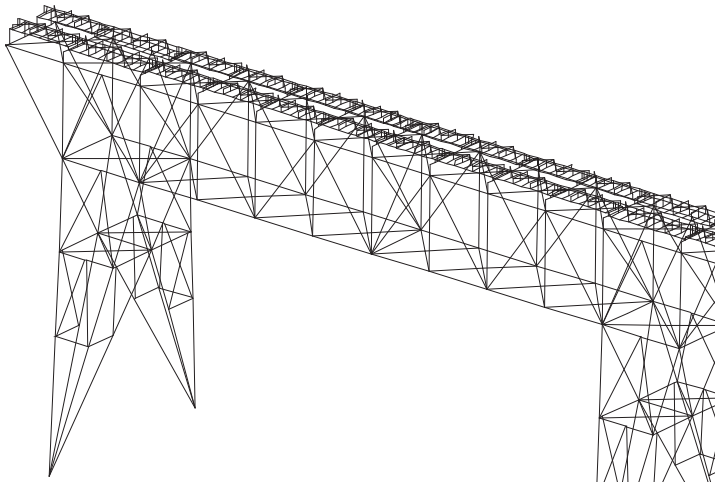


Abbildung eines Kragträgers



Kragträger der Brücke, 10.7.1917  
(Sammlung Uwe Möller)



#### Zielsetzung:

Ermittlung realistischer  
Beanspruchungskollektive von  
maßgebenden Bauteilen  
(z.B. Schweißnähte,  
Nietlöcher, ...)

### Sicherheits- und Restnutzungsdaueruntersuchungen

Überfahrtsimulationen jedes Zugtypenvertreters mit dem Programm DYNACS  
(werkstofflich und geometrisch nichtlineare Analyse)

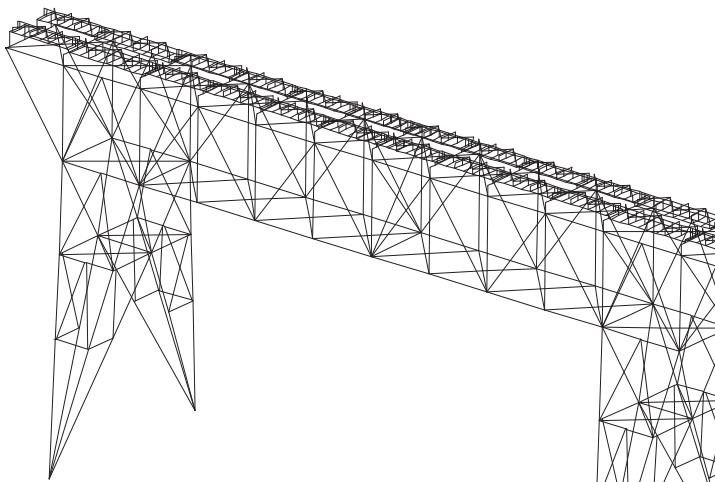
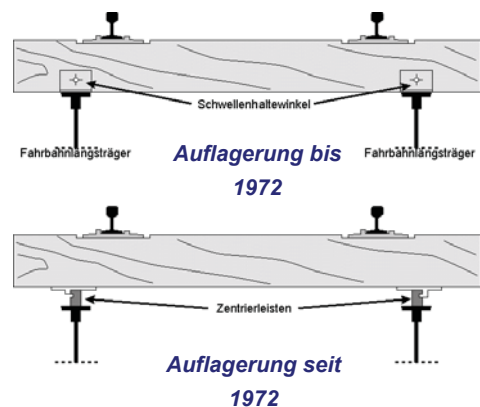


Abbildung eines Kragträgers

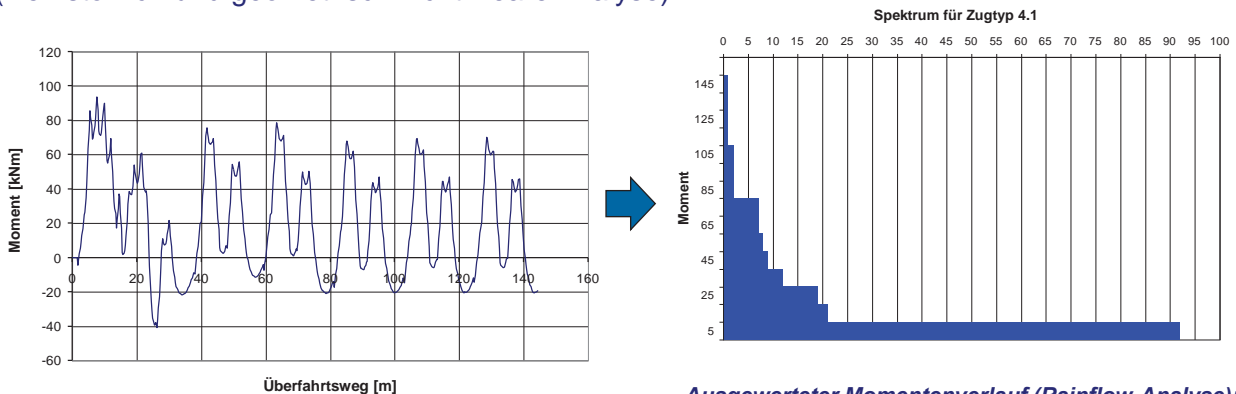


Berücksichtigung der Systemänderung



## Sicherheits- und Restnutzungsdaueruntersuchungen

Überfahrtsimulationen jedes Zugtypenvertreeters mit dem Programm DYNACS  
(werkstofflich und geometrisch nichtlineare Analyse)



**Schnittkräfte am Balkenelement:**  
**Momentenverlauf (zeitlicher Verlauf) einer Zugüberfahrt**

**Ausgewerteter Momentenverlauf (Rainflow-Analyse):**  
**Spannungsspektrum  $\Delta M$  für eine Epoche**

Ermittlung von Spannungshäufigkeiten /  
Spannungsspektren für jede Epoche

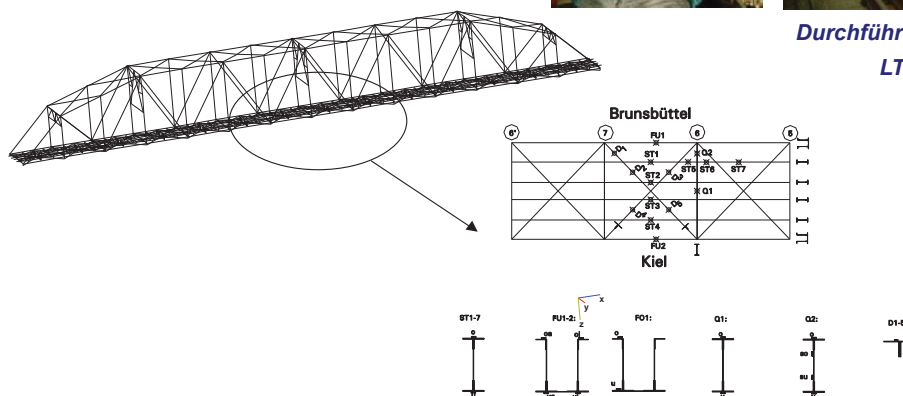
## Sicherheits- und Restnutzungsdaueruntersuchungen

### Bestätigung der Berechnungen / Modelle:

Probeüberfahrten,  
Vergleich gemessener und  
berechneter Dehnungen



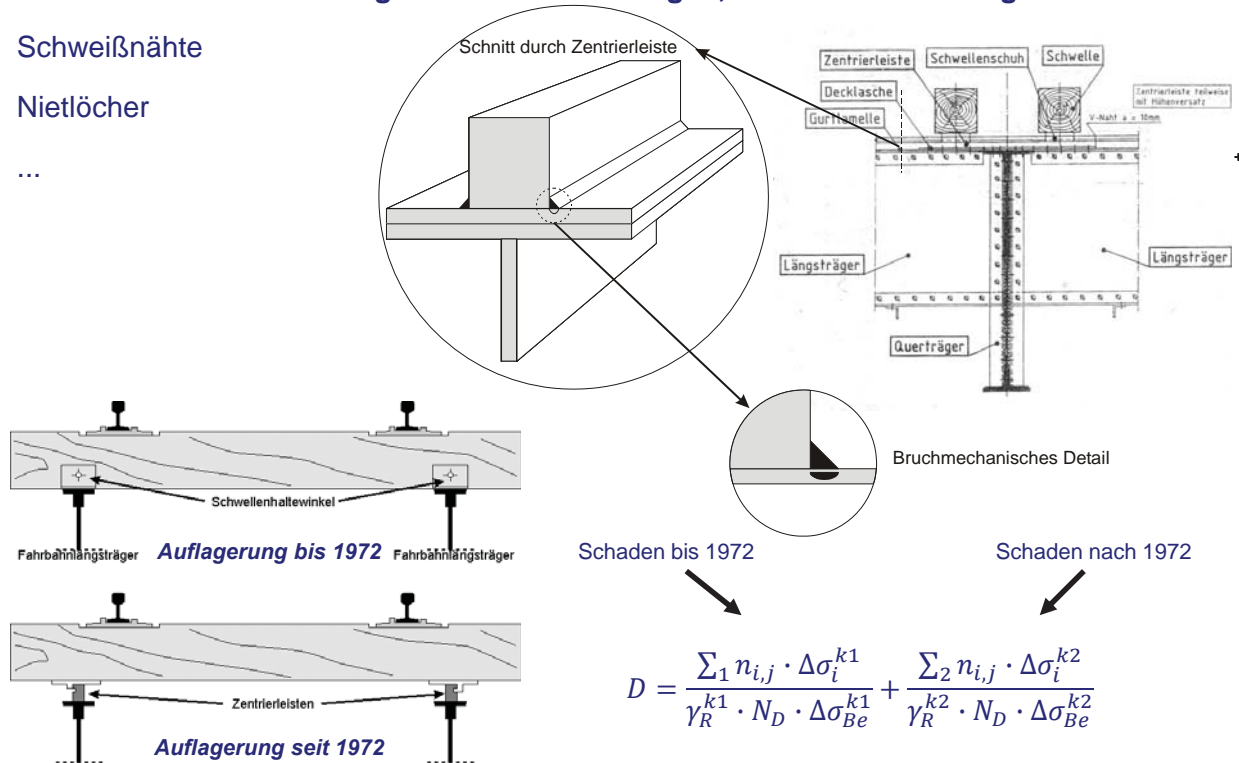
**Durchführung von Belastungsversuchen**  
**LTS M62 „Taigatrommel“**



**Anordnung der Dehnungsmessstreifen (DMS)**

### Sicherheits- und Restnutzungsdaueruntersuchungen, Schadensermittlung

- Schweißnähte
- Nietlöcher
- ...



$$D = \frac{\sum_1 n_{i,j} \cdot \Delta \sigma_i^{k1}}{\gamma_R^{k1} \cdot N_D \cdot \Delta \sigma_{Be}^{k1}} + \frac{\sum_2 n_{i,j} \cdot \Delta \sigma_i^{k2}}{\gamma_R^{k2} \cdot N_D \cdot \Delta \sigma_{Be}^{k2}}$$

## Erhaltung stählerner Tragwerke

### Sicherheits- und Restnutzungsdaueruntersuchungen

#### Ergebnis (nach DS 804/805):

- Schaden < 5%
- das untersuchte Detail gibt keinen Anlass zur Sorge

#### Ergebnis (nach DIN EN 1993-1-9):

- Annahme:  $\gamma_S = \gamma_R = 1,0$  (Schadenstoleranz, volle Inspizierbarkeit)
- Schaden = 31%

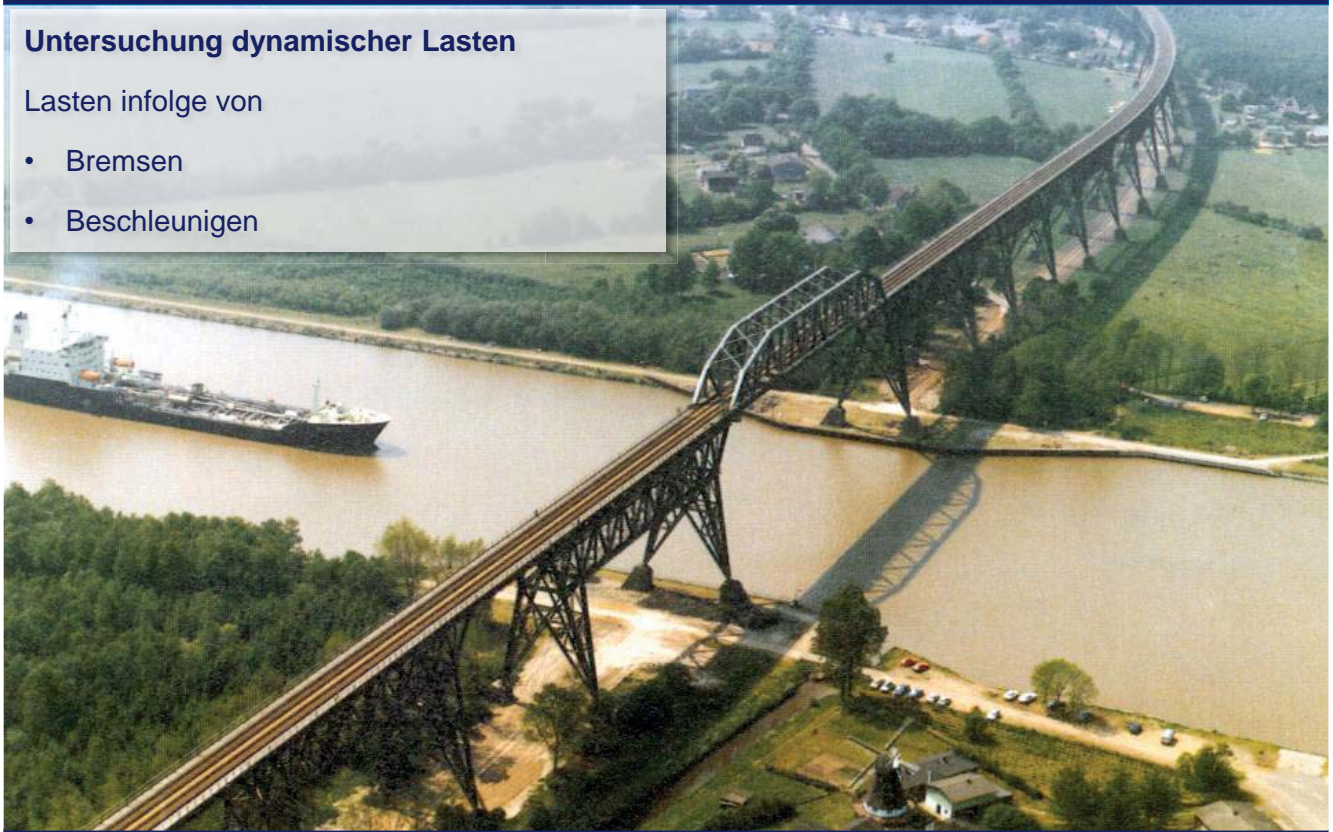


Hochbrücke 2010, Foto Uwe Möller

### Untersuchung dynamischer Lasten

Lasten infolge von

- Bremsen
- Beschleunigen



## Erhaltung stählerner Tragwerke

### Untersuchung dynamischer Lasten infolge Bremsen und Beschleunigen

#### Lasten auf die Struktur wirkend

- Tragfähigkeit in Kombination mit anderen Lastfällen
- Weisen die Auflager eine ausreichende Tragfähigkeit auf?
- Was muss bei der Planung der neuen Auflager des Blechträgers berücksichtigt werden?



#### Lasten auf den Fahrweg wirkend

- Welche Kräfte werden von den Schienen übertragen?
- Weisen die Schienen eine ausreichende Tragfähigkeit auf?
- Wie kann der Fahrweg optimiert werden?



Hochbrücke 1950'er Jahre  
Sammlung Uwe Möller



## Untersuchung dynamischer Lasten infolge Bremsen und Beschleunigen

Nachrechnung der Brücke nach Richtlinie 805 (Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken) für die Lastenzüge D4 eingleisig und D2 / DRZ (definierter Reisezug)

- ursprünglichen Bemessung  
preußischer Lastenzug A, Bremslast = 1/7 der vertikalen Lasten (in beiden Gleisen angesetzt)
- neue Bemessung  
horizontalen Einwirkungen = 1/4 der vertikalen Lasten des Lastenzuges auf einem Gleis  
+ 600 kN Anfahrlast im Nachbargleis

→ ca. 40 % höheren horizontalen Beanspruchungen auf die Bauwerke

→ Für die Bemessung der Rahmenstiele und Fundamente waren Überlastungen abzusehen.

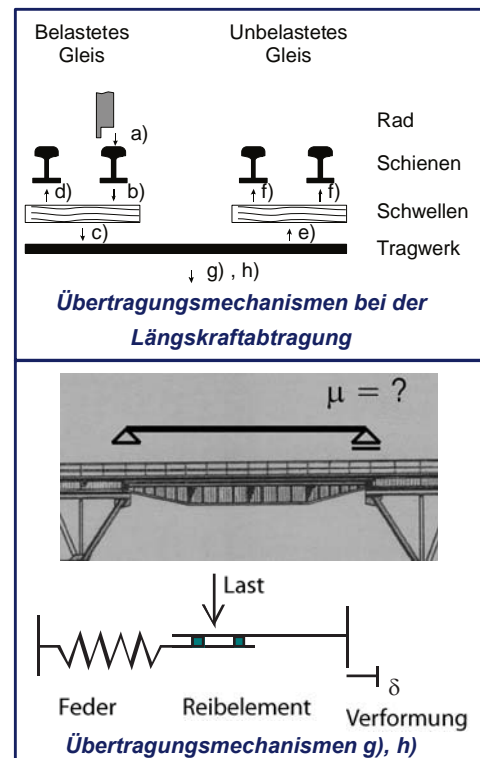
### Lösung:

Rechnerische Berücksichtigung der günstigen Längsverteilung der horizontalen Kräfte auf mehrere Bauwerke durch die Schiene und Reibung in den Lagern der Blechträger  
(Zustimmung im Einzelfall)

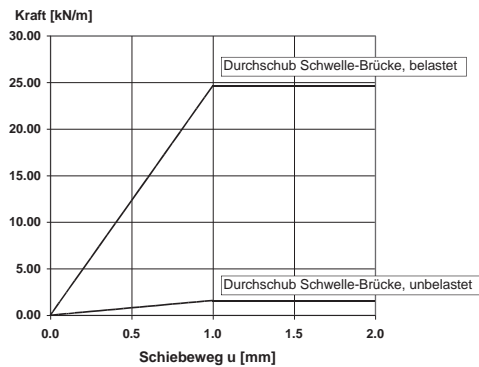
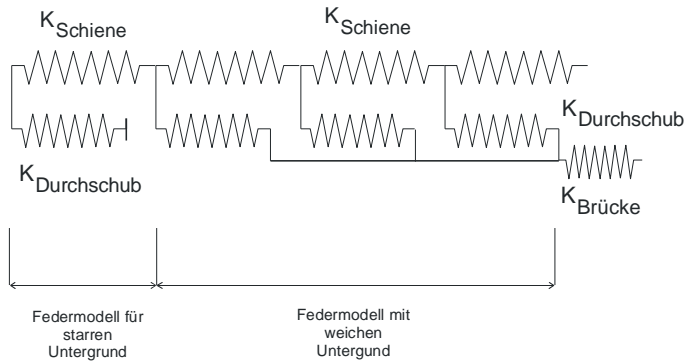
# Erhaltung stählerner Tragwerke

## Untersuchung dynamischer Lasten infolge Bremsen und Beschleunigen

Übertragungsweg	Übertragungsmechanismus
a) Rad – Schiene	Reibung: $\mu = 0,25$
b) Schiene – Schwelle	Doppelter Durchschub gem. DS 804 (belastet), da K-Klemmung statt W-Klemmung der Schienen
c) Schwelle – Brücke	Reibung: $\mu = 0,36$
d) Schwelle – Entgleisungsschutz	Durchschub, wie b) aber unbelastet
e) Brücke – Schwelle	Reibung: $\mu = 0,36$
f) Schwelle – Schiene	Durchschub, wie b) aber unbelastet
g) Tragwerk – Nachbartragwerk	Reibung: $\mu = 0,2$ und $\mu = 0,4$ (Stahl – Stahl)
h) Tragwerk – Lager	Rahmensteifigkeit



## Untersuchung dynamischer Lasten infolge Bremsen und Beschleunigen

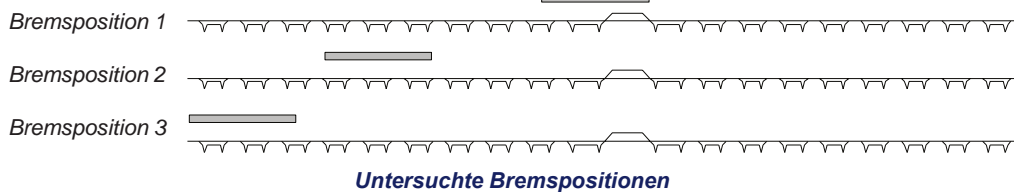


*nichtlineares Federmodell  
für die Berechnung der  
Längskraftverteilung*

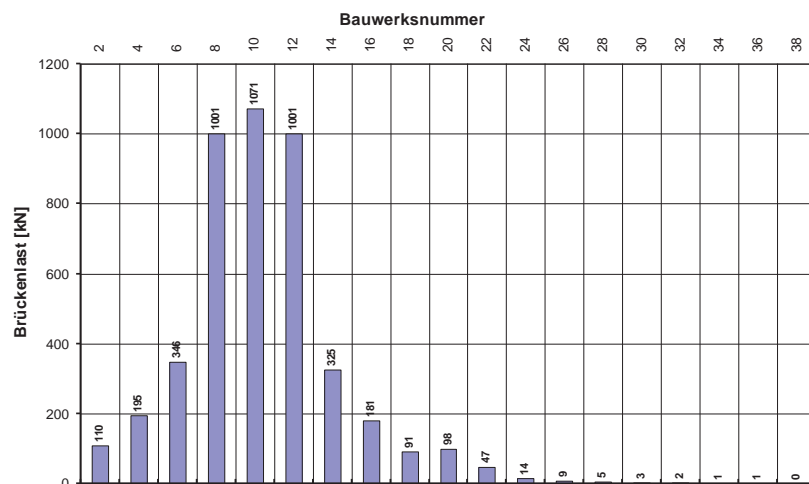


*Lagerung von Schienenstrang und  
Entgleisungsschutz auf der  
Schwelle*

## Untersuchung dynamischer Lasten infolge Bremsen und Beschleunigen



Reduktionsfaktoren  $\xi^*$   
von 50% - 60% zur  
Ermittlung der  
anzusetzenden  
Bremskraftwerte  
(in Abstimmung mit  
dem EBA)



*Bauwerksbeanspruchungen aus Bremsen in Position 2 und Lagerreibung  $\mu = 0,2$*



### Untersuchung dynamischer Lasten infolge Bremsen und Beschleunigen

**Bestätigung der Berechnungen:** Nach Erneuerung des Gleiskörpers: großer Bremsversuch



*Belastungszug, bestehend aus 10 Loks BR 218*

Bestätigung:

- Eignung des nichtlinearen statischen Modells des Brückenzuges zur Ermittlung Bremskraftverteilung
- Abminderungsfaktoren  $\xi^*$

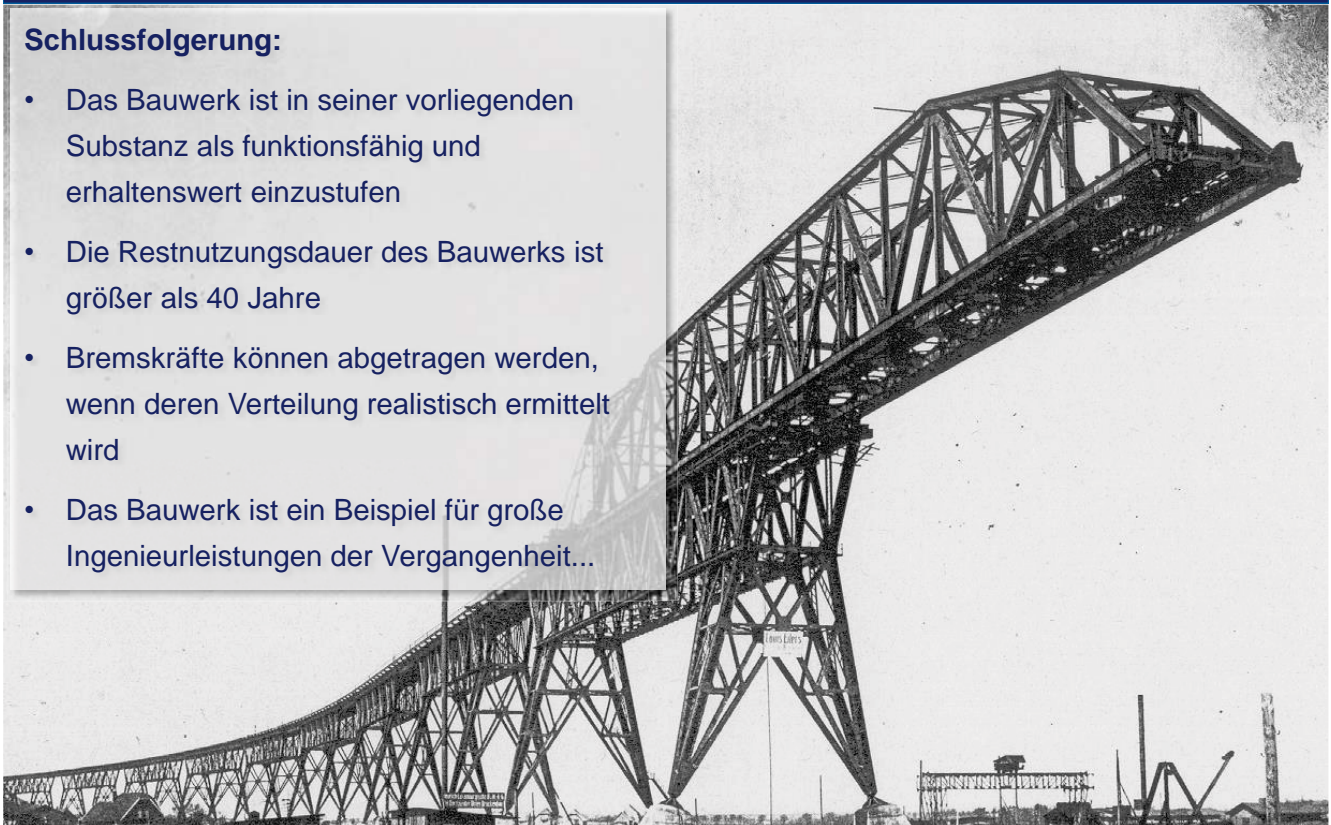
Reale Verteilung der Bremslasten war im Allgemeinen etwas besser, als im Rahmen der analytischen Voruntersuchungen angenommen (Reserven).

→ Vergrößerung der zugelassenen maximalen Zuglängen um ca. 30 %

## Erhaltung stählerner Tragwerke

### Schlussfolgerung:

- Das Bauwerk ist in seiner vorliegenden Substanz als funktionsfähig und erhaltenswert einzustufen
- Die Restnutzungsdauer des Bauwerks ist größer als 40 Jahre
- Bremskräfte können abgetragen werden, wenn deren Verteilung realistisch ermittelt wird
- Das Bauwerk ist ein Beispiel für große Ingenieurleistungen der Vergangenheit...



... auch für die Zukunft!

