



Hochschule Magdeburg - Stendal

Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit

Studiengang Bauingenieurwesen

Vertiefung Konstruktiver Ingenieurbau

HERLEITUNG EINER DEFINITION FÜR DEN
MESSWERTGESTÜTZTEN SCHWINGFAKTOR Φ_{OBS} UNTER
BERÜCKSICHTIGUNG VON MESSERGEBNISSEN AN
STÄHLERNEN EISENBAHNBRÜCKEN SOWIE DISKUSSION
DES BEGRIFFS „SCHWINGFAKTOR“

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Engineering (M. Eng.)

vorgelegt von: Tim Altenhort, B. Eng. und Jasmin Dräger, B. Eng.

eingereicht am: 27. August 2024

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Michael Müller (HS Magdeburg - Stendal)

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Peter Stephany (HS Magdeburg - Stendal)

Betreuer: Dr.-Ing. Joachim Nordmann (DB InfraGO AG)

Vorwort

Durch eine Zusammenarbeit mit der Deutschen Bahn AG hat uns Prof. Müller das Thema dieser Masterarbeit vorgeschlagen sowie den Kontakt zu Herrn Dr. Nordmann hergestellt. Wir waren auf der Suche nach einem herausfordernden Thema für diese Abschlussarbeit, welches wir mit den im Master „Konstruktiver Ingenieurbau“ neu erlernten Themenbereichen *Brückenbau* und *Baudynamik* gefunden haben.

Eine gemeinschaftliche Bearbeitung der Masterarbeit hat sich im Zuge einer stets gegenseitigen Unterstützung, eines regen fachlichen Austauschs sowie zahlreicher fachbezogener Diskussionen im vorangegangenen Bachelor- und Masterstudium dargeboten. Der zeitlich versetzte Studienbeginn hinderte uns leider in der Vergangenheit am Bearbeiten gemeinsamer Gruppenprojekte im Verlauf des Studiums.

Die Abschlussarbeit bot uns die Möglichkeit, sich in einem definierten Rahmen intensiv mit einem Thema zu beschäftigen, bereits erworbenes Wissen anzuwenden und neue Kenntnisse zu erwerben. Die Forschungs- und Schreibphase stellte eine Zeit des ständigen Lernens und der Selbstreflexion dar.

Wir bedanken uns bei Prof. Müller für das in uns gesetzte Vertrauen und das Prüfen dieser wissenschaftlichen Arbeit. Des Weiteren möchten wir Herrn Stephany danken, der unsere Masterarbeit betreut und geprüft hat. Ein besonderer Dank gilt unserem Betreuer Herrn Dr. Nordmann von der DB für das Beantworten zahlreicher Fragen, das Korrekturlesen der Arbeit, die hilfreichen Anregungen sowie die konstruktive Kritik. An dieser Stelle möchten wir uns bei unseren Familien und Freunden bedanken, die uns während dieser Zeit und während des gesamten Studiums unterstützt und ermutigt haben.

Magdeburg, August 2024

Tim Altenhort, Jasmin Dräger

Kurzfassung

Mit Beginn der Industrialisierung im 19. Jahrhundert wurden in Deutschland zahlreiche Eisenbahnbrücken gebaut, welche gegenwärtig das Ende ihrer normativen Nutzungsdauer von 100 Jahren erreichen. Im Zuge dessen kommt dem Instandhaltungsmanagement des Brückenbestands bei der Deutschen Bahn eine stetig anwachsende Bedeutung zu. Hier hat sich die messtechnische Untersuchung zur Bestimmung der Restnutzungsdauer als geeignet herauskristallisiert. Zur Berücksichtigung dynamischer Beanspruchungen ist der Schwingfaktor Φ_{obs} messtechnisch zu bestimmen. Aktuell beinhaltet die für die Nachrechnung von Bestandsbrücken gültige Norm Ril 805 jedoch keine Definition, wie der Schwingfaktor Φ_{obs} zu ermitteln ist.

Im Laufe der Auswertung hat sich als Definition für den messwertgestützten Schwingfaktor Φ_{obs} eine Herleitung über den dynamischen Beiwert $1 + \varphi$ als sehr anwendungsorientiert erwiesen, da dieser im Gegensatz zum dynamischen Zuwachs $\Delta\sigma$ geringen Schwankungen unterliegt. Zusätzlich kann dieser zur Bestimmung mittelbarer Größen wie dem R -Wert zur Einordnung in Streckenklassen herangezogen werden. Durch den direkten Zusammenhang zur DIN EN 1991-2 besteht zusätzlich die Möglichkeit auf eine messtechnisch durchgeführte, dynamische Untersuchung der Brücke verzichten, indem für den dynamischen Beiwert die Werte aus dem Regelwerk eingesetzt werden. Es wären demzufolge lediglich Messfahrten mit quasi-statischer Geschwindigkeit nötig, um die Spannungseinflusslinien herleiten zu können.

Für die Ermittlung des messwertgestützten Schwingfaktors Φ_{obs} gilt:

$$\Phi_{\text{obs}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} \cdot (1 + \varphi)}{\sigma_{\text{LM71}}}$$

Neben der Festlegung einer Definition erfolgt die Gegenüberstellung der Messergebnisse mit den Vorgaben zur Berechnung neuer Brücken auf Grundlage der DIN EN 1991-2 bzw. DIN EN 1991-2/NA. Hier können durchgehend größere Abweichungen festgestellt werden, welche insbesondere auf eine sehr konservative Berechnung in der Norm sowie auf überschießende Beanspruchungen aus dem LM 71 zurückzuführen sind. Zusätzlich liegen den Berechnungen unterschiedliche Grundbedingungen in Form des statischen Systems zugrunde.

Abschließend erfolgt eine Diskussion über die ungünstige Benennung des Schwingfaktors. Den Schwingfaktor beeinflussen neben dynamischen Beanspruchungen auch statische Größen. Dementsprechend schlagen die Verfasser zur Eindeutigkeit des Begriffs eine Umbenennung des Schwingfaktors in „Abdeckungsfaktor“ vor.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Motivation	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Vorgehensweise und Methodik	2
2	Entwicklung der Eisenbahnlastmodelle	4
2.1	Einführung	4
2.2	Von der Fahrziffer zum Schwingfaktor – Ursprünge und Entwicklung der dynamischen Berechnung von Eisenbahnbrücken	4
2.2.1	Anfänge dynamischer Betrachtungen	4
2.2.2	Standardisierung der Regelungen in Deutschland	6
2.2.3	Europaweite Vereinheitlichung der Vorschriften	11
2.3	Dynamische Berechnung in der derzeit gültigen Normung	16
2.3.1	Berechnung nicht-resonanzgefährdeter Eisenbahnbrücken	17
2.3.2	Exkurs: Berechnung resonanzgefährdeter Eisenbahnbrücken	19
2.3.3	Nachrechnung nicht-resonanzgefährdeter Brücken	21
2.4	Ausblick auf die neue Eurocode-Generation	24
2.5	Historische Zeittabelle	25
3	Messdatenerzeugung und Messtechnik	28
3.1	Theoretische Grundlagen - Komponenten der Messtechnik	28
3.1.1	Dehnungsmessstreifen / Wheatstonesche Brückenschaltung	28
3.1.2	Kabel und Sechsheitertechnik	33
3.1.3	Verstärker	34
3.2	Ablauf der Messungen – Datengewinnung	35
3.2.1	Vorbetrachtungen	35
3.2.2	Versuchsaufbau	35
3.2.3	Versuchsdurchführung	37
3.3	Datenaufbereitung während der Messung	38
3.3.1	Abtastung des analogen Signals	38
3.3.2	Bestimmung der Abtastrate	39
3.3.3	Filterung des digitalen Signals	41
3.3.4	Rekonstruktion des ursprünglichen (analogen) Signals	42
3.3.5	Zusammenfassung der Parameter	42

4	Grundlagen der messwertgestützten Auswertung	43
4.1	Einführung	43
4.2	Ermittlung und Prüfung der Fahrgeschwindigkeit	43
4.3	Ermittlung der Dehnungen aus dem Messsignal	45
4.4	Ermittlung der Spannungen	45
4.4.1	Aufbereitung der Messdaten	45
4.4.2	Umrechnung der Dehnungen in Spannungen	47
4.5	Statistische Bewertung der Messdaten	47
4.6	Bestimmung des dynamisches Zuwachses und Beiwertes	52
4.7	Messwertgestützte Spannungseinflusslinien	53
4.7.1	Das Konzept der Einflusslinie	53
4.7.2	Verfahren von Braune	54
4.8	Bestimmung des messwertgestützten Schwingfaktors	57
5	Auswertung von Messungen an stählernen Vollwandträgerbrücken	59
5.1	Brücke 1	59
5.1.1	Bauwerksbeschreibung	59
5.1.2	Lage und Bezeichnung der Messschnitte	60
5.1.3	Lage und Bezeichnung der Messpunkte	61
5.1.4	Verkehrslasten	65
5.1.5	Ermittlung und Prüfung der Fahrgeschwindigkeiten	65
5.1.6	Analyse und Verarbeitung der Messdaten	66
5.1.7	Ergebnisse der Messdatenauswertung	67
5.2	Brücke 2	80
5.2.1	Bauwerksbeschreibung	80
5.2.2	Lage und Bezeichnung der Messschnitte	81
5.2.3	Lage und Bezeichnung der Messpunkte	83
5.2.4	Verkehrslasten	84
5.2.5	Ermittlung und Prüfung der Fahrgeschwindigkeiten	85
5.2.6	Analyse und Verarbeitung der Messdaten	86
5.2.7	Ergebnisse der Messdatenauswertung	87
5.3	Brücke 3	97
5.3.1	Bauwerksbeschreibung	97
5.3.2	Lage und Bezeichnung der Messschnitte	97
5.3.3	Lage und Bezeichnung der Messpunkte	98
5.3.4	Verkehrslasten	101
5.3.5	Ermittlung und Prüfung der Fahrgeschwindigkeiten	101
5.3.6	Analyse und Verarbeitung der Messdaten	102

5.3.7	Ergebnisse der Messdatenauswertung	103
5.4	Brücke 4	117
5.4.1	Bauwerksbeschreibung	117
5.4.2	Lage und Bezeichnung der Messschnitte	118
5.4.3	Lage und Bezeichnung der Messpunkte	119
5.4.4	Verkehrslasten	126
5.4.5	Ermittlung und Prüfung der Fahrgeschwindigkeiten	127
5.4.6	Analyse und Verarbeitung der Messdaten	127
5.4.7	Ergebnisse der Messdatenauswertung	129
6	Einordnung und Diskussion der Ergebnisse	141
6.1	Vorschlag einer Definition zur Ermittlung des messwertgestützten Schwingfaktors	141
6.2	Analyse der messwertgestützten dynamischen Beiwerte sowie des Schwing- faktors in Bezug zur „maßgeblichen Länge“ sowie der Geschwindigkeit	146
6.3	Diskussion der ungünstigen Benennung des Schwingfaktors	152
7	Fazit	154

Abkürzungsverzeichnis

BE	Berechnungsgrundlage für stählerne Eisenbahnbrücken
Blz	Betriebslastenzug
BR	British Railways
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
D	Diagonale
DB	Deutsche Bahn
d. h.	das heißt
DMS	Dehnungsmessstreifen
DRG	Deutsche-Reichsbahn-Gesellschaft
dyn.	dynamische/-r
DV	Dienstvorschrift
EBA	Eisenbahn-Bundesamt
EC	Eurocode
EFL	Einflusslinie
EiTB	Eisenbahnspezifische Technische Baubestimmungen
EQT	Endquerträger
EÜ	Eisenbahnüberführung
etc.	et cetera
ggf.	gegebenenfalls
HT	Hauptträger
LM 71	Lastmodell 71 – neue Bezeichnung für UIC 71
LT	Längsträger

MS	Messschnitt
ORE	Office de Recherches et d'Essais
QT	Querträger
Ril	Richtlinie
sog.	sogenannte/-r
STB	Streckenteilbauwerk
SW/0	Lastmodell für Durchlaufträger als Ergänzung zum LM 71
SW/2	Lastmodell zur Berücksichtigung von Schwerverkehr
U	Untergurt
UIC	Union Internationale des Chemins de fer
UIC 2000	vom UIC im Jahr 2000 entwickeltes Lastmodell für den Schienenverkehr
UIC 71	vom UIC im Jahr 1971 entwickeltes Lastmodell für den Schienenverkehr
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel
zul.	zulässige/-r

Abbildungsverzeichnis

1.1	Verteilung der Bauwerksarten von Eisenbahnbrücken nach Baujahr – entnommen aus [1]	1
2.1	Darstellung der zulässigen Beanspruchungen und dynamischen Beiwerte zum Ende des 19. Jahrhunderts – entnommen aus [4]	5
2.2	Darstellung der Lastenzüge und Stoßzahlen aus BE 1925	7
2.3	Darstellung des Lastenzug S 1950 – entnommen aus [12]	8
2.4	Darstellung der Entwicklung der Schwingbeiwerte für Eisenbahnbrücken aus BE 1951	9
2.5	Darstellung der Regellastenzüge für Eisenbahnbrücken aus BE 1951 .	10
2.6	Funktion des dynamische Lastzuwachses φ' aus dem ungestörten Gleis – entnommen aus [13]	12
2.7	Idealtypen der Betriebslastenzüge – entnommen aus [12]	13
2.8	Belastungsbild UIC 71 – entnommen aus [15]	14
2.9	Verfahren zur Ermittlung der dynamischen Momentenbeanspruchung – entnommen aus [12]	15
2.10	Momentenbeanspruchung aus UIC 71 im Vergleich zu früheren Lastbildern – entnommen aus [12]	16
2.11	Lastmodell (LM) 71 – entnommen aus DIN EN 1991-2 [16]	17
2.12	Lastmodelle SW/0 und SW/2 – entnommen aus DIN EN 1991-2 [16]	17
2.13	Grenzen der maßgebenden Biegeeigenfrequenz n_0 in Abhängigkeit der Stützweite – entnommen aus Ril 804.3101 [18]	18
2.14	Bestandteile der Ril 805 – entnommen aus [19]	21
2.15	Vorschlag Belastungsbild UIC 2000 – entnommen aus [17]	24
3.1	Prinzipaufbau eines Flachgitter DMS – entnommen aus [23]	28
3.2	wasserdichter Dehnungsmessstreifen der Firma Tokyo Measuring Instruments Lab.	29
3.3	Aufbau einer Wheatstoneschen Brückenschaltung – entnommen aus [23]	30
3.4	Ergänzung einer Viertelbrücke zur Vollbrücke durch zusätzliche Festwiderstände – entnommen aus [23]	31
3.5	Darstellung der Sechsheitertechnik - entnommen aus [23] und [24] . . .	34
3.6	Herstellerangaben der verwendeten Dehnungsmessstreifen	36
3.7	Installation der Messtechnik	37

3.8	Vergleich analoges und digitales Signal	38
3.9	Abtastung eines analogen Signals mit der doppelten Signalfrequenz – Grenzfall des Abtasttheorems	40
3.10	Abtastung eines analogen Signals mit verschiedener x-facher Signal- frequenz	40
4.1	Position der Lichtschranken während der Messfahrten als schemati- sche Darstellung	43
4.2	Ermittlung der Fahrgeschwindigkeit mittels Lichtschranken	44
4.3	Ideale Darstellung der klassischen Filter – entnommen aus [29]	46
4.4	Standardnormalverteilung und t-Verteilung – entnommen aus [32]	50
4.5	Exemplarische Darstellung einer statistischen Auswertung – erstellt von der DB	51
4.6	Einflusslinie für das Biegemoment unter einer ortsveränderlichen Last $P = 1$ – entnommen aus [34]	53
4.7	Ermittlung der Verformungslinie aus einer Einflusslinie anhand eines zweiachsigen Fahrzeugs	55
4.8	Ermittlung der Einflusslinie aus einer gemessenen Verformungslinie – entnommen aus [35]	57
5.1	seitliche Ansicht der Brücke 1	59
5.2	Draufsicht und Querschnitt der Brücke 1 mit markiertem Messbereich	60
5.3	Lage der Messschnitte auf Brücke 1	61
5.4	Lage und Bezeichnung der Messpunkte im Messschnitt 1 der Brücke 1	62
5.5	Lage und Bezeichnung der Messpunkte im Messschnitt 2 der Brücke 1	62
5.6	Lage und Bezeichnung der Messpunkte auf dem HT im Messschnitt 3 der Brücke 1	63
5.7	Lage und Bezeichnung der Messpunkte auf dem QT im Messschnitt 3 der Brücke 1	63
5.8	Lage und Bezeichnung der Messpunkte auf dem LT im Messschnitt 3 der Brücke 1	64
5.9	Lage und Bezeichnung der Messpunkte im Messschnitt 4 der Brücke 1	64
5.10	Belastungslok BR218 der DB mit ihren Achslasten und Achsabständen – Bildquelle: https://tinyurl.com/2xbuqmk	65
5.11	Spannungen am Hauptträger Brücke 1 infolge der Belastungslok, $v =$ 10 km/h (oben) und $v_{\max} = 80 \text{ km/h}$ (unten)	68
5.12	Einflusslinie Hauptträger Brücke 1 resultierend aus Fahrt „Test_069“	70

5.13	Spannungen am Längsträger Brücke 1 infolge der Belastungslok, $v = 10$ km/h (oben) und $v_{\max} = 80$ km/h (unten)	71
5.14	Einflusslinie Längsträger Brücke 1 resultierend aus Fahrt „Test_069“ .	73
5.15	Spannungen am Querträger Brücke 1 infolge der Belastungslok, $v = 10$ km/h (oben) und $v_{\max} = 80$ km/h (unten)	74
5.16	Einflusslinie Querträger Brücke 1 resultierend aus Fahrt „Test_069“ .	75
5.17	Spannungen am Endquerträger Brücke 1 infolge der Belastungslok, $v = 10$ km/h (oben) und $v_{\max} = 80$ km/h (unten)	77
5.18	Einflusslinie Endquerträger Brücke 1 resultierend aus Fahrt „Test_069“	78
5.19	Ansicht der Brücke 2 (oben: Öffnung 1+2; unten: Öffnung 3)	80
5.20	Ansicht Brücke 2 (Pfeiler 1)	81
5.21	Lage der Messschnitte auf Brücke 2	82
5.22	Lage und Bezeichnung der Messpunkte auf dem LT im Messschnitt II der Brücke 2	83
5.23	Lage und Bezeichnung der Messpunkte auf dem QT im Messschnitt III der Brücke 2	83
5.24	Lage und Bezeichnung der Messpunkte auf dem HT im Messschnitt IV der Brücke 2	84
5.25	Belastungslok BR218 der DB mit ihren Achslasten und Achsabständen – Bildquelle: https://tinyurl.com/2xbuqmk	85
5.26	Spannungen am Hauptträger Brücke 2 infolge der Belastungslok, $v = 15$ km/h (oben) und $v_{\max} = 75$ km/h (unten)	88
5.27	Einflusslinie Hauptträger Brücke 2 resultierend aus Fahrt „Fahrt037“	89
5.28	Spannungen am Längsträger Brücke 2 infolge der Belastungslok, $v = 15$ km/h (oben) und $v_{\max} = 75$ km/h (unten)	91
5.29	Einflusslinie Längsträger Brücke 2 resultierend aus Fahrt „Fahrt037“	92
5.30	Spannungen am Querträger Brücke 2 infolge der Belastungslok, $v = 15$ km/h (oben) und $v_{\max} = 75$ km/h (unten)	94
5.31	Einflusslinie Querträger Brücke 2 resultierend aus Fahrt „Fahrt037“ .	95
5.32	Ansicht der betrachteten Eisenbahnüberführung	97
5.33	Benennung der Träger in allen Überbauten für das STB 3	97
5.34	Lage der Messschnitte	98
5.35	Lage der Messpunkte	98
5.36	Messpunkte an den Hauptträgern	99
5.37	Messpunkte an den Querträgern	99
5.38	Messpunkte an den Endquerträgern	100
5.39	Messpunkte am Längsträger	100

5.40	Belastungslok BR 192 „Siemens Smartron“ mit ihren Achslasten und Achsabständen – Bildquelle: https://tinyurl.com/yc262fz7	101
5.41	Spannungsverlauf Hauptträger 1 im Messschnitt 3 für $v = 10$ km/h (oben) und $v_{\max} = 155$ km/h (unten)	104
5.42	Einflusslinie Hauptträger Brücke 3 resultierend aus „Fahrt008“	104
5.43	Spannungsverlauf Längsträger 1 im Messschnitt 1 für $v = 10$ km/h (oben) und $v_{\max} = 155$ km/h (unten)	107
5.44	Einflusslinie Längsträger Brücke 3 resultierend aus „Fahrt008“	108
5.45	Spannungsverlauf Querträger 1 im Messschnitt 2 für $v = 10$ km/h (oben) und $v_{\max} = 155$ km/h (unten)	110
5.46	Spannungsverlauf Querträger 2 (QT20) im Messschnitt 5 Brücke 3	112
5.47	Einflusslinie Querträger Brücke 3 resultierend aus „Fahrt008“	113
5.48	Spannungsverlauf Endquerträger 1 im Messschnitt 3 für $v = 10$ km/h (oben) und $v_{\max} = 155$ km/h (unten)	114
5.49	Einflusslinie Endquerträger Brücke 3 resultierend aus „Fahrt008“	116
5.50	Ansicht der betrachteten Eisenbahnüberführung	117
5.51	Schnitt der Eisenbahnüberführung	117
5.52	Draufsicht der Eisenbahnüberführung	118
5.53	Darstellung der Messschnitte für Brücke 4	118
5.54	Lage des Messschnittes 1	119
5.55	Messkonzept Diagonalen Messschnitt 1	119
5.56	Messkonzept Untergurt (Hauptträger) Messschnitt 1	120
5.57	Lage des Messschnittes 2	120
5.58	Messkonzept Punkt A und D (Messschnitt 2)	121
5.59	Messkonzept Punkt B (Messschnitt 2)	121
5.60	Messkonzept Punkt C (Messschnitt 2)	121
5.61	Lage des Messschnittes 3	122
5.62	Messkonzept Punkt 1 Messschnitt 3	122
5.63	Messkonzept Punkt 3 Messschnitt 3	123
5.64	Lage des Messschnittes 4	123
5.65	Messkonzept Punkt 1 Messschnitt 4	124
5.66	Messkonzept Punkt 3 Messschnitt 4	124
5.67	Lage des Messschnittes 5	125
5.68	Messkonzept Enddiagonalen Messschnitt 5	125
5.69	Lage der Messpunkte des Längsträgers Messschnitt 5	125
5.70	Messkonzept Längsträger 1 und 2 Messschnitt 5	126
5.71	Messkonzept Längsträger 3 und 4 Messschnitt 5	126

5.72	Belastungslok BR 182 mit ihren Achslasten und Achsabständen – Bildquelle: https://tinyurl.com/2emdw2v6	126
5.73	Spannungsverlauf Untergurt 9 (Hauptträger) im Messschnitt 1 für v = 10 km/h (oben) und $v_{\max} = 60$ km/h (unten)	130
5.74	Einflusslinie Untergurt Brücke 4 resultierend aus „Fahrt062“ auf Gleis 2131	
5.75	Spannungsverlauf Längsträger 3 im Messschnitt 5 für $v = 10$ km/h (oben) und $v_{\max} = 60$ km/h (unten)	132
5.76	Einflusslinie Längsträger Brücke 4 resultierend aus „Fahrt062“ auf Gleis 2	134
5.77	Spannungsverlauf Querträger 19 im Punkt 5 Messschnitt 4 für $v =$ 10 km/h (oben) und $v_{\max} = 60$ km/h (unten)	135
5.78	Einflusslinie Querträger Brücke 4 resultierend aus „Fahrt062“ auf Gleis 2	137
5.79	Spannungsverlauf Diagonale 38 im Messschnitt 5 für $v = 10$ km/h (oben) und $v_{\max} = 60$ km/h (unten)	138
5.80	Einflusslinie Diagonale Brücke 4 resultierend aus „Fahrt062“ auf Gleis 2139	
6.1	Ermittlung der maßgeblichen Länge der Einflusslinie des Längsträger Brücke 4	146
6.2	Vergleich der dyn. Beiwerte mit der Norm unter der Annahme des Parameters $a_2 = 0,5$ für die Gleisqualität	148
6.3	Vergleich der ermittelten Schwingfaktoren bezüglich ihrer maßgebli- chen Länge	150

Tabellenverzeichnis

2.1	Darstellung der dynamischen Beiwerte in Abhängigkeit der maßgebenden Länge L_φ des Lastenzug S 1950 – entnommen aus [8]	8
2.2	Zeittabelle zur historischen Entwicklung der Eisenbahnlastmodelle	25
3.1	k -Faktoren gebräuchlicher metallischer Messgitterwerkstoffe – entnommen aus [23]	30
3.2	Zusammenstellung der Kenngrößen der digitalen Signalerzeugung und -verarbeitung der untersuchten Brücken	42
4.1	Werte der t-Verteilung (Tabellenausschnitt) – entnommen aus [32]	49
5.1	Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungslok am Hauptträger Brücke 1	69
5.2	Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Hauptträger Brücke 1	70
5.3	Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungslok am Längsträger Brücke 1	72
5.4	Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Längsträger Brücke 1	73
5.5	Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungslok am Querträger Brücke 1	75
5.6	Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Querträger Brücke 1	76
5.7	Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungslok am Endquerträger Brücke 1	77
5.8	Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Endquerträger Brücke 1	78
5.9	Maßgebende bauteilbezogene Schwingfaktoren der Brücke 1	79
5.10	Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungslok am Hauptträger Brücke 2	89
5.11	Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Hauptträger Brücke 2	90
5.12	Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungslok am Längsträger Brücke 2	91
5.13	Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Längsträger Brücke 2	93

5.14	Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungslok am Querträger Brücke 2	94
5.15	Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Querträger Brücke 2	95
5.16	Maßgebende bauteilbezogene Schwingfaktoren der Brücke 2	96
5.17	Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungslok am Hauptträger Brücke 3	105
5.18	Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Hauptträger Brücke 3	106
5.19	Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungslok am Längsträger 10 Brücke 3	108
5.20	Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Längsträger 10 Brücke 3	109
5.21	Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungslok am Querträger Brücke 3	111
5.22	Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungslok am Querträger Brücke 3	111
5.23	Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Querträger Brücke 3	112
5.24	Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungslok am Endquerträger Brücke 3	115
5.25	Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Endquerträger Brücke 3	115
5.26	Maßgebende bauteilbezogene Schwingfaktoren der Brücke 3	116
5.27	Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungslok am Untergurt (Hauptträger) Brücke 4	130
5.28	Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Untergurt (Hauptträger) Brücke 4	131
5.29	Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungslok am Längsträger 3 Brücke 4	133
5.30	Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Längsträger 3 Brücke 4	134
5.31	Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungslok am Querträger 19 Brücke 4	135
5.32	Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Querträger 19 Brücke 4	136

5.33	Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungslök an der Diagonale 38 Brücke 4	138
5.34	Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen an der Diagonale 38 Brücke 4	139
5.35	Maßgebende bauteilbezogene Schwingfaktoren der Brücke 4	140
6.1	Vergleichbarkeit des dynamischen Spannungszuwachses $\Delta\sigma$ als Absolutwert bei gleichem dynamischen Beiwert $1 + \varphi$	144
6.2	Vergleich der maßgeblichen Längen der ausgewerteten Brücken	149

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Motivation

„Das steigende Brückenalter führt zwangsläufig zu notwendigen Instandhaltungs- und Modernisierungsmaßnahmen, wodurch das Instandhaltungsmanagement des Brückenbestands mehr und mehr zu einer zentralen Aufgabe wird“ [1]. Historisch bedingt wurden Anfang des 20. Jahrhunderts im Zuge der Industrialisierung viele stählerne Eisenbahnbrücken in Deutschland gebaut (siehe Abbildung 1.1), die sich nun dem Ende ihrer normativen Nutzungsdauer von 100 Jahren nähern oder diese bereits überschritten haben. Dies trifft auf etwa 50 % bis 60 % der ca. 10.000 stählernen Eisenbahnbrücken zu.

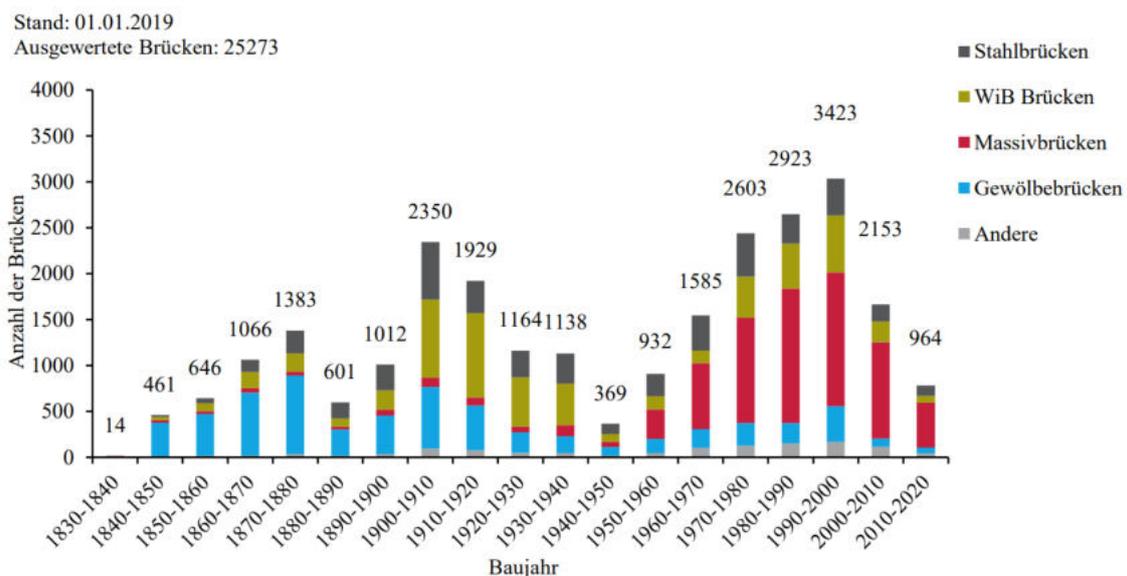


Abbildung 1.1: Verteilung der Bauwerksarten von Eisenbahnbrücken nach Baujahr – entnommen aus [1]

Die Gesamtheit der erforderlichen Instandsetzungsmaßnahmen oder Ersatzneubauten zum jetzigen Zeitpunkt und in den kommenden Jahren sind seitens der Deutschen Bahn (DB) und der Bauindustrie nicht zu bewältigen. Daher hat sich die messwertgestützte Neubewertung von Bauwerken als geeignetes Konzept etabliert, um die Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken realitätsnah nachzuweisen. Das Ziel der Neubewertung ist neben der Ermittlung der Restnutzungsdauer unter Berücksichtigung vorherrschender Verkehrsbeanspruchungen auch die Vermeidung einer Herabsetzung der Betriebslast sowie -geschwindigkeit auf Bestandsbrücken.

Auf der Grundlage der gesammelten Ergebnisse können schließlich Nachweise geführt werden oder bauteilspezifische Parameter wie der messwertgestützte Schwingfaktor bestimmt werden. Jedoch enthält die derzeit gültige Ril 805, welche als Grundlage zur Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken dient, keinerlei Definition hinsichtlich der Ermittlung des messwertgestützten Schwingfaktors.

1.2 Zielsetzung

Innerhalb der Ril 805 „Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken“ erfolgt die Beurteilung bestehender Eisenbahnbrücken durch verschiedene Bewertungsstufen. In Bewertungsstufe 4 gilt es die Tragsicherheit durch eine messwertgestützte Untersuchung festzustellen. Das Ziel dieser Masterarbeit ist es, den für die Bestimmung der Restnutzungsdauer erforderlichen, realen Schwingfaktor Φ_{obs} speziell für das Lastmodell 71 durch Messungen zu bestimmen und diesen im Zusammenhang mit der derzeit gültigen Normung einzuordnen. Im Zuge dessen soll eine geeignete Definition für die Bestimmung des messwertgestützten Schwingfaktors hergeleitet werden. Weiterhin wird das Ziel verfolgt, die ungünstige Benennung des Schwingfaktors im Kontext seiner Entstehung bzw. des historischen Hintergrunds zu diskutieren. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf die Analyse stählerner Eisenbahnbrücken, von denen im betrachteten Geschwindigkeitsbereich keine Resonanzgefahr ausgeht.

1.3 Vorgehensweise und Methodik

Die Betrachtungen und Untersuchungen dieser Arbeit basieren auf Messwerten, die im Rahmen realer Bauwerksversuche der Deutschen Bahn gewonnen wurden. Die zu untersuchenden Brücken werden einer gezielten Belastung durch Loküberfahrten ausgesetzt, welche durch eine kontinuierliche messtechnische Überwachung begleitet wird.

Im ersten Teil dieser Masterarbeit erfolgt eine historische Aufarbeitung der Lastmodelle mit Fokus auf dem Schwingfaktor sowie eine Darstellung der aktuell gültigen Normung. Den Abschluss des historischen Rückblicks bildet eine Zeittabelle, welche die Forschungen und normative Entwicklung wiedergibt. Im dritten Kapitel wird auf die Messdatenerzeugung und die Messtechnik eingegangen. Nach der Beschreibung der theoretischen Grundlagen der Auswertung folgt die Auswertung der Messdaten von vier stählernen Eisenbahnbrücken. Neben der Erläuterung der Vorgehensweise werden zugleich die Ergebnisse dargestellt. Abschließend erfolgt die Einordnung

und Diskussion der Ergebnisse. Hierbei wird eine Definition zur Berechnung des messwertgestützten Schwingfaktors vorgeschlagen, die berechneten Schwingfaktoren in Bezug zur „maßgeblichen Länge“ sowie zur Geschwindigkeit analysiert und die ungünstige Benennung diskutiert.

2 Entwicklung der Eisenbahnlastmodelle

2.1 Einführung

Mit Beginn der Industrialisierung in Deutschland und der damit einhergehenden Entstehung des Eisenbahnverkehrs wurden nicht nur Eisenbahnbrücken gebaut, sondern mussten auch bemessen werden. Um die statische Beanspruchung einer Zugüberfahrt abzubilden, wurden Lastmodelle, auch Betriebslastenzüge genannt, erstellt, die eine möglichst realistische Überfahrt der zu der jeweiligen Zeit vorherrschenden Züge simulieren.

Infolge Imperfektionen, wie Schienenunebenheiten und Unrundlaufen der Räder, oder eines Fahrweges mit nicht konstanter Steifigkeit kommt es zu dynamischen Anregungen des Oberbaus [2]. Dies wiederum führt zu erhöhten Schnittgrößen im System durch die Schwingungen. Zur Berücksichtigung des dynamischen Einflusses auf die Schnittgrößen wurde für nicht-resonanzgefährdete Eisenbahnbrücken ein sogenannter Schwingbeiwert eingeführt.

2.2 Von der Fahrziffer zum Schwingfaktor – Ursprünge und Entwicklung der dynamischen Berechnung von Eisenbahnbrücken

2.2.1 Anfänge dynamischer Betrachtungen

Die dynamische Berechnung von Eisenbahnbrücken findet in Deutschland bereits Mitte des 19. Jahrhunderts ihren Ursprung. Es wurde relativ früh erkannt, dass überfahrende Züge „Stöße“ verursachen und daraus zusätzliche Beanspruchungen für die Eisenbahnbrücken entstehen. GEORG CHRISTOPH MERTHENS (1843-1917) schrieb dazu in seiner Vorlesungsniederschrift Folgendes: „Dynamische Einwirkungen der Verkehrslasten können heute noch nicht genau genug festgestellt werden. Deshalb kommen sie [...] nur bei der Wahl des Sicherheitsgrades in Betracht“ [3]. In der Ausgabe der Deutschen Bauzeitung von 1896 hat ERNST EBERT (1852–1942) dokumentiert, dass HEINRICH GERBER (1832–1912) als erster eine Berücksichtigung

von dynamischen Lasten abweichend zu den statischen Einwirkungen fordert. Diese Schlussfolgerung zog er aus seiner Schwingungstheorie, die auf den Ergebnissen der Versuche von AUGUST WÖHLER (1819–1914) aufbauen. [4]

Nach [2] erfolgte schließlich mit der *Fahrziffer* δ die erste Definition eines dynamischen Beiwertes durch GERBER, welche die statische Beanspruchung zur Abdeckung dynamischer Ereignisse faktoriell erhöhte. Diese betrug ab dem Jahr 1865 für eiserne Eisenbahnbrücken $\delta = 3,0$ und wurde bereits im Jahr 1874 auf einen Wert von $\delta = 1,5$ herabgesetzt. Dabei verwendete GERBER (vgl. Abbildung 2.1) eine zulässige Beanspruchung von $\hat{\alpha} = 160 \text{ t/dm}^2$ (entspricht 160 N/mm^2). [4]

Formeln: ($S = \text{Eisenzugfläche}$ in dm^2 ; $\hat{\alpha} = \text{zuläss. Beanspruchung}$ in t/dm^2 ; $\psi = \frac{\hat{\alpha}}{S}$; $\psi_1 = \frac{\max \hat{S}}{\hat{U}}$.)					
Verfahren:	Zug- oder Druckstäbe:			Wechselstäbe:	
	S	$\hat{\alpha}$		S	$\hat{\alpha}$
Ebert..... 1895	$\frac{\hat{S} + 1,5 \cdot \hat{S}}{120}$	$\frac{\hat{S} + \hat{S}}{120} \cdot 120$	$\frac{\psi + 1}{\psi + 1,5} \cdot 120$	$1,5 \cdot \frac{\hat{S}_Z + \hat{S}_D}{120}$	$\frac{\max \hat{S}}{1,5 \hat{U}} \cdot 120$ 80. ψ_1
* Mainz-Brücke..... 1865	$\frac{\hat{S} + 3 \cdot \hat{S}}{160}$	$\frac{\hat{S} + 1,5 \cdot \hat{S}}{160} \cdot 160$	$\frac{\psi + 1}{\psi + 3} \cdot 160$	-----	-----
* Gerber..... 1874	$\frac{\hat{S} + 1,5 \cdot \hat{S}}{160}$	-----	$\frac{\psi + 1}{1,5} \cdot \frac{160}{6}$	-----	-----
Gerber..... 1894	$\frac{1}{800} (\hat{M} - \frac{2}{7} \cdot \hat{N})$	-----	$\frac{\psi + 1}{\psi + 2,1} \cdot 160$	$\frac{1}{800} \cdot 1,5 (\hat{S}_Z + \hat{S}_D)$	$\frac{\max \hat{S} \cdot 800}{1,5 \hat{U}} \cdot \frac{800}{7}$ 78,2. ψ_1
Sachsen..... 1893	$\frac{\hat{S} + 1,8 \cdot \hat{S}}{153}$	$\frac{\hat{S} + \hat{S}}{153 + 1,8 \hat{S}} \cdot 153$	$\frac{\psi + 1}{\psi + 1,8} \cdot 153$	-----	-----
Frankr.-Weyrauch..... 1892	-----	$80 \cdot (1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\hat{S}}{\hat{S} + \hat{S}})$	$\frac{\psi + 0,67}{\psi + 1} \cdot 120$	-----	$80 \cdot (1 - \frac{1}{2} \frac{\min \hat{S}}{\max \hat{S}}) \cdot 40 \cdot (3 - \frac{1}{\psi_1})$
Schweiz..... 1892	-----	$80 \cdot (1 + \frac{5}{16} \cdot \frac{\hat{S}}{\hat{S} + \hat{S}})$	$\frac{\psi + 0,78}{\psi + 1} \cdot 105$	-----	$80 \cdot (1 - \frac{5}{16} \frac{\min \hat{S}}{\max \hat{S}}) \cdot 5 \cdot (21 - \frac{5}{\psi_1})$
* Oesterreich..... 1887	-----	$\left\{ \begin{array}{l} 0 \text{ bis } 400 \text{ dm} \dots 70 + 0,02 \cdot l \\ 400 \text{ " } 800 \text{ " } \dots 78 \text{ bis } 84 \\ 800 \text{ " } 1200 \text{ " } \dots 84 \text{ " } 88 \\ 1200 \text{ " } 1600 \text{ " } \dots 88 \text{ " } 90 \\ < 100 \text{ " } \dots 75 \\ 100 \text{ bis } 200 \text{ " } \dots 80 \text{ bis } 85 \\ 200 \text{ " } 400 \text{ " } \dots 85 \text{ " } 90 \\ 400 \text{ " } 800 \text{ " } \dots 90 \text{ " } 95 \\ 800 \text{ " } 1200 \text{ " } \dots 95 \text{ " } 100 \\ 1200 \text{ " } 1500 \text{ " } \dots 100 \text{ " } 105 \end{array} \right.$	-----	<p>Hierbei bedeutet:</p> $\left. \begin{array}{l} \max \hat{S} \text{ die grösste} \\ \min \hat{S} \text{ " kleinste} \end{array} \right\} \text{Grenzspannung,}$ <p>ohne Rücksicht auf Vorzeichen, $\hat{U} = \hat{S}_Z + \hat{S}_D$</p>	-----
Preussen..... 1895	-----	-----	-----	-----	-----

Die mit * bezeichneten Verfahren beziehen sich auf Schweisseisen, die übrigen auf Flusseisen.
 Bei der österreichischen Verordnung ist nur die für Bahnbrücken gültige angeführt.

Abbildung 2.1: Darstellung der zulässigen Beanspruchungen und dynamischen Beiwerte zum Ende des 19. Jahrhunderts – entnommen aus [4]

Mit Beginn der 1870er Jahre setzte sich im Zuge eines Strebens nach Vereinheitlichung die Berücksichtigung eines dynamischen Faktors auch in den bautechnischen Regelungen einiger Deutscher Staatsbahnen durch. Seit dem Jahr 1873 betrug bei der Sächsischen Staatsbahn $\varphi = 1,8$ während eine Beanspruchung von $\hat{\alpha} = 153 \text{ t/dm}^2$ zulässig war [2]. In den bayerischen Vorschriften wurde erstmals in der Veröffentlichung des Amtsblattes des königlichen Staatsministeriums des Innern im Jahre 1878 von einer Erhöhung der Verkehrslasten gesprochen. So wurden „[z]ur Berücksichtigung der durch das Rollen der Räder über Unebenheiten der Fahrbahn und durch die Bewegungen der lebenden Lasten entstehenden Stöße

[...] die sämtlichen veränderlichen Belastungen 1,5-fach als Verkehrslast in Rechnung gebracht“ [5]. Im Jahr 1895 erfolgte anschließend die Benennung von EBERT, welcher ebenfalls auf Grundlage der Berechnung nach GERBER einen Koeffizient von $\varphi = 1,5$ für alle tragenden Überbauteile festlegte. Die zulässige Beanspruchung begrenzte er dabei auf $\hat{\alpha} = 120 \text{ t/dm}^2$. Seine Festlegungen wurden in den bayrischen Vorschriften verankert. [2] Um dem durch WÖHLER untersuchten Spannungswechsel zwischen Druck und Zug in seiner Schwingtheorie bei Wechselstäben zu berücksichtigen, erweiterte EBERT die Berechnung nach GERBER (siehe Abbildung 2.1) [3]. Die Staatsbahnen der übrigen Länder (Preußen, Württemberg und Baden) hingegen verwendeten keine dynamischen Beiwerte, sondern arbeiteten ausschließlich mit stützweitenabhängigen, zulässigen Spannungen σ für die Bemessung eiserner Eisenbahnüberbauten [2, 3, 4, 5, 6].

Selbst im Jahr 1905 fehlte es nach MERTHENS weiterhin an einer einheitlichen Berechnungsgrundlage. Dieser beschrieb die damalige Situation im Eisenbahnbrückenbau wie folgt: „Jeder Bundesstaat arbeitet hierbei nach eigenen Rezepten und einige der darin enthaltenen Bestimmungen sind veraltet oder wenig einfach, so daß es not tate, wenn von berufener Seite versucht würde, hierin einmal gründlich Wandel zu schaffen“ [3].

2.2.2 Standardisierung der Regelungen in Deutschland

Erst mit der Gründung der Deutschen-Reichsbahn-Gesellschaft (DRG) im Jahr 1920 und der damit verbundenen „Zusammenfassung der gesamten deutschen Staatseisenbahnverwaltungen zu einem einheitlichen Netz der DRG [...]“ [6], erfolgte neben der Normierung von Loks und Wagen auch die Erarbeitung einheitlicher Berechnungsvorschriften sowie dynamischer Beiwerte. Im Zuge der Ausgabe der „Vorschrift für Eisenbahnbauwerke; Berechnung für eiserne Eisenbahnbrücken (BE)“ im Jahr 1925 und der Einführung der Lastenzüge N (schwer), E und G (leicht) konnten erstmals allgemein gültige dynamische Beiwerte, früher Stoßzahl genannt, definiert werden (siehe Abbildung 2.2 und vgl. [7]). Dabei ist die Stoßzahl mit dem jeweils verwendeten Lastenzug zu multiplizieren. [7, 8]

Das Ziel der Erarbeitung war es, für die realen Betriebszüge, idealisierte Lastbilder zu entwickeln, durch welche mit einfachen Formeln auftretende dynamische Beanspruchungen abgedeckt werden konnten. Abweichend zu den Ursprüngen der Stoßzahl erfolgte nunmehr keine konstante Erhöhung durch einen Faktor. Unterdessen spielten bei der Bestimmung der Stoßzahl zusätzliche Einflussfaktoren wie die Zuggeschwindigkeit, das statische System und der Fahrbahnzustand eine entscheidende Rolle (vgl. [7]).

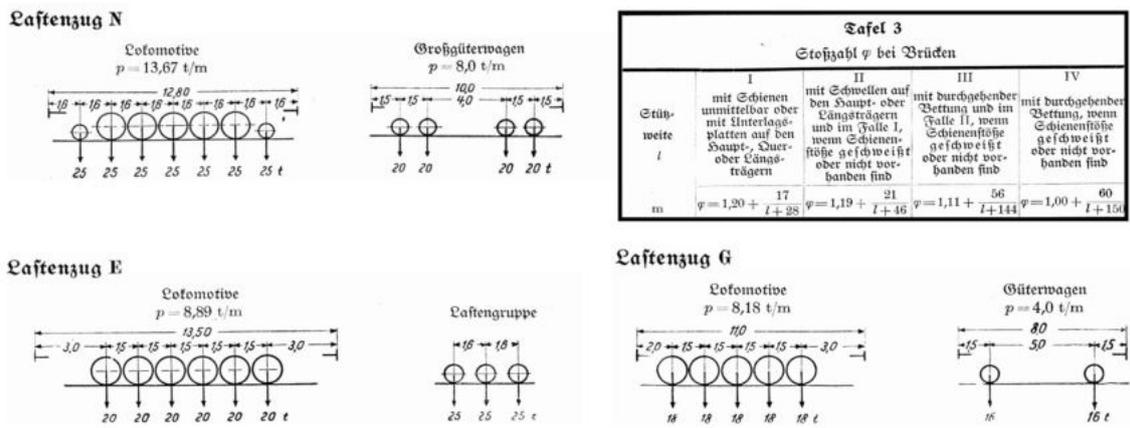


Abbildung 2.2: Darstellung der Lastenzüge und Stoßzahlen aus BE 1925

Die Lastenzüge N, E und G waren insbesondere durch die symmetrische Anordnung der Achs- und Meterlasten gekennzeichnet. Des Weiteren wurden in der BE 1925 für die Bemessung zulässige Zug-, Biege- und Schubspannungen in Abhängigkeit der Eisensorte vorgeschrieben (vgl. [7]). Damit fand eine Unterscheidung der zulässigen Beanspruchungen im Gegensatz zur zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts statt.

Die in der BE 1925 getroffenen Festlegungen zur Stoßzahl wurden anschließend in die Dienstvorschrift (DV) 804 der Deutschen Reichsbahn in der Ausgabe der BE im Jahr 1934 übernommen (vgl. [9]). In der Ausgabe der BE im Jahr 1936 fand die Stoßzahl ebenfalls unverändert Berücksichtigung (vgl. [10]). Der heute vorherrschende Begriff „Schwingbeiwert“ wurde mit der Veröffentlichung der BE 1941 in der Normung integriert und löste somit die „Stoßzahl“ hinsichtlich der Benennung ab [2]. Die Bezeichnung φ blieb allerdings weiterhin bestehen. Mit dem Berichtungsblatt 7 zur Ausgabe 1944 der BE, welches im Jahr 1946 veröffentlicht wurde, erfolgte eine Vereinfachung der Schwingbeiwerte. Diese wurden abweichend zu den Fällen aus Abbildung 2.2 auf zwei Fälle (A und B) mit einem Maximalwert von $\varphi = 1,5$ begrenzt (vgl. [11]). Fall B galt für Brücken mit Schienen unmittelbar oder mit Unterlagsplatten auf den Haupt-, Quer- oder Längsträgern mit maßgebenden Stützweiten bis zu 10 m. Der Anwendungsfall A galt für alle restlichen Brücken, für die Anwendungsfall B nicht einschlägig war.

Fall A:

$$\varphi = 1,00 + \frac{60}{L_\varphi[\text{m}] + 150} \quad (2.1)$$

Fall B:

$$\varphi = 1,00 + \frac{15}{L_\varphi[\text{m}] + 30} \quad (2.2)$$

Mit dem durch die Deutsche Bundesbahn nach der Zeit des 2. Weltkriegs eingeführten Lastenzug S 1950, wurde die symmetrische Anordnung der Achslasten aufgegeben (siehe Abbildung 2.3). Der Lastenzug S 1950 bildete damit den ungünstigsten Betriebslastenzug in dieser Zeit ab. [12] Zudem befand sich das neue Lastmodell wesentlich zwischen den Lastenzügen E und N der BE 1925, was den Hintergrund hatte, dass sich der in den 1920er Jahren erwartete enorme Anstieg der Verkehrslasten nicht ereignet hatte [13].

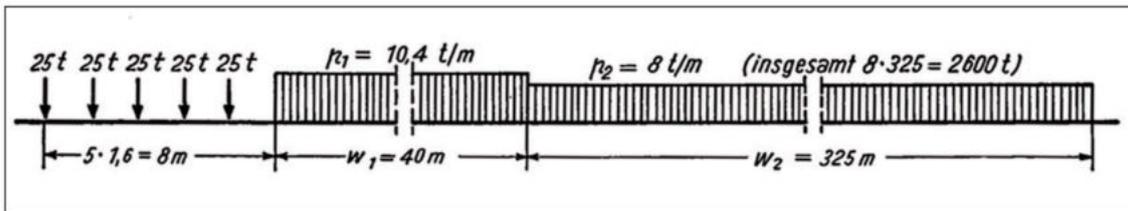


Abbildung 2.3: Darstellung des Lastenzug S 1950 – entnommen aus [12]

Tabelle 2.1: Darstellung der dynamischen Beiwerte in Abhängigkeit der maßgebenden Länge L_φ des Lastenzug S 1950 – entnommen aus [8]

L_φ in m	$\leq 0,5$	1	2	3	4	5	6	7	8
φ	1,60	1,57	1,54	1,52	1,50	1,48	1,47	1,46	1,45
L_φ in m	9	10	12	14	16	18	20	22	24
φ	1,44	1,43	1,41	1,40	1,39	1,38	1,37	1,36	1,35
L_φ in m	26	28	30	35	40	45	50	60	70
φ	1,35	1,34	1,134	1,33	1,32	1,31	1,30	1,29	1,27
L_φ in m	80	90	100	110	120	130	140	≥ 150	
φ	1,26	1,25	1,24	1,23	1,22	1,21	1,21	1,20	

Die optimierten Angaben der dynamischen Beiwerte aus der BE 1951 basieren vorrangig auf In-situ-Messungen der Deutschen Bundesbahn und ihrer Vorgängerin [2]. So war es erforderlich nach der Einführung des Lastenzuges S 1950 eine erneute Überarbeitung des Schwingbeiwertes vorzunehmen. In der Ausgabe 1951 der BE wurden für den anzuwendenden Lastenzug S 1950 die in Tabelle 2.1 definierten dynamischen Beiwerte zugrunde gelegt (vgl. [14]). Für geringe Stützweiten waren fortan Schwingbeiwerte von bis zu einem Wert von $\varphi = 1,60$ möglich.

Abschließend soll mit den Abbildungen 2.4 und 2.5 ein Überblick über die Entwicklung der Regellastzüge und Schwingbeiwerte deutscher und ausländischer Bahnen gegeben werden.

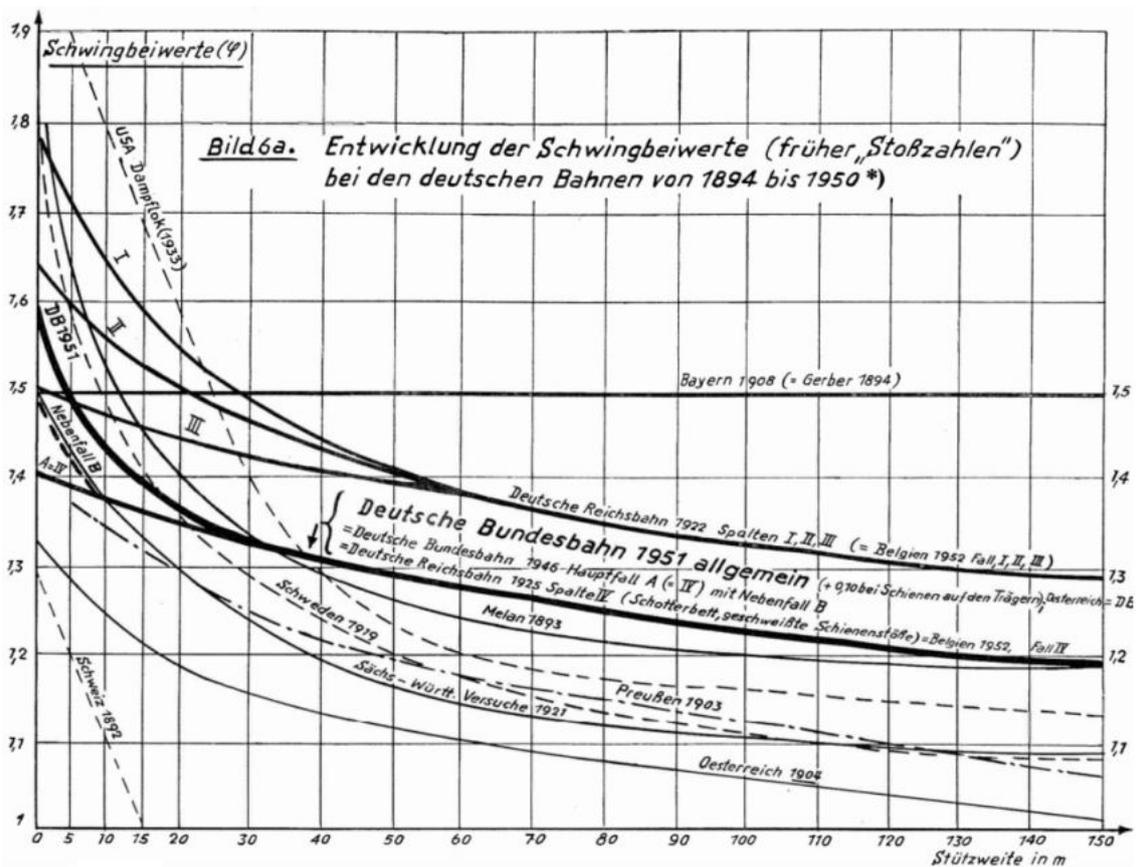


Abbildung 2.4: Darstellung der Entwicklung der Schwingbeiwerte für Eisenbahnbrücken aus BE 1951

Dabei zeigt die Abbildung 2.4 ein Diagramm mit mehreren Kurven, das den Schwingbeiwert in Abhängigkeit der Stützweite für verschiedene Jahre bzw. Vorschriften in dem Zeitraum von 1894 bis 1950 darstellt. Hier ist erkennbar, dass der Wert des Schwingbeiwerts mit fortschreitender Zeit tendenziell angestiegen ist. Dies kann auf eine zunehmende dynamische Beanspruchungen durch höhere Zuggeschwindigkeiten

zurückgeführt werden. Die Verringerung des Schwingbeiwerts von 1925 auf 1951 in den Regelungen zur Berechnung von Eisenbahnbrücken lässt sich durch eine Rohstoffknappheit verursacht durch die beiden Weltkriege erklären (vgl. [13]), welche mittels eines Strebens nach Wirtschaftlichkeit überwunden werden sollte.

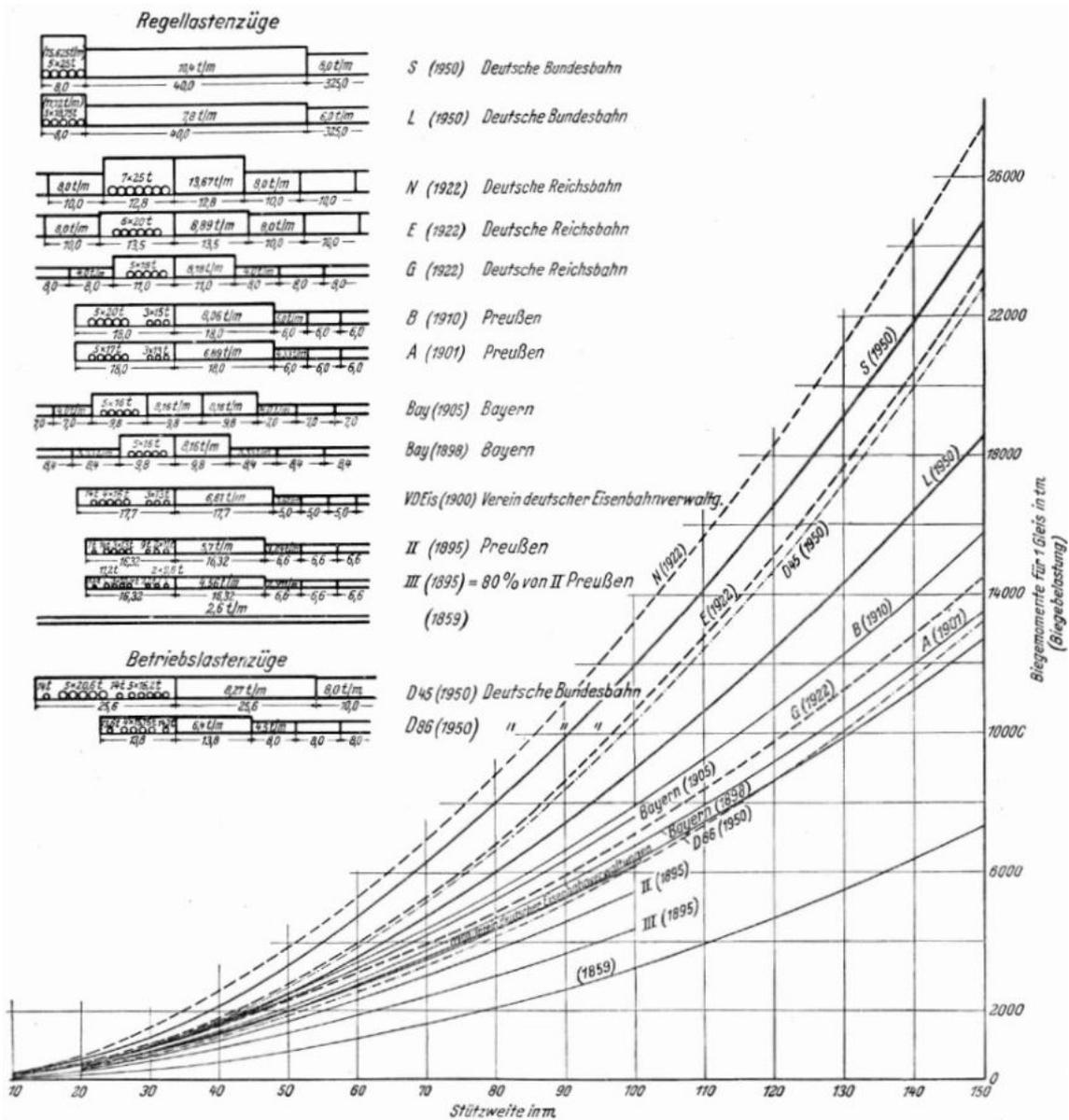


Abbildung 2.5: Darstellung der Regellastenzüge für Eisenbahnbrücken aus BE 1951

Die Entwicklung der Lastmodelle nach Abbildung 2.5 zeigt ebenfalls eine steigende Tendenz über die Jahre. Durch den technischen Fortschritt war es möglich, immer höhere Lasten über Schienenwege zu befördern. Diese gesteigerten Lasten bewirkten folglich ein Anwachsen der Biegemomente in einem quadratischen Zusammenhang zur Stützweite.

2.2.3 Europaweite Vereinheitlichung der Vorschriften

Bereits einige Jahre nach der Einführung des Lastenzugs S 1950, stellte sich der Gedanke in den Vordergrund, für den Eisenbahnverkehr europaweit einheitliche dynamische Beiwerte und Lastbilder festzulegen. So kam es dazu, dass der Internationale Eisenbahnverband UIC (Union Internationale des Chemins de fer) mit seinem Forschungs- und Entwicklungsinstitut ORE (Office de Recherches et d'Essais) im Juni des Jahres 1955 den Sachverständigenausschuss D23 („Ermittlung der dynamischen Beanspruchung von Eisenbahnbrücken“) gründete, um dieses Ziel voranzutreiben. [2] Bestehend aus Fachleuten des Brückenbaus mit tiefgehendem Wissen in der Baudynamik und Brückenmesstechnik, ermittelten diese aus Vorversuchen zunächst Richtlinien, mit denen zukünftige Durchführungen von Versuchen ermöglicht werden konnten. Aufbauend auf den zuvor erarbeiteten Erkenntnissen, erfolgten Brückenmessungen an 38 verschiedenen Brückenüberbauten, welche als Modellbrücke im Maßstab 1:8 durchgeführt wurden. Das Ziel der Messungen war es, aus der Analyse der Versuchsergebnisse sowie mathematischen Betrachtungen, eine Gleichung hinsichtlich des dynamischen Einflusses von Eisenbahnlasten auf nicht-resonanzgefährdete Brückenbauwerke durch einen dynamischen Lastzuwachs φ zu formulieren. [15]

Es gilt:

$$\varphi = \varphi' + a_0 \cdot \varphi'' \quad (2.3)$$

mit:

- φ' – dynamischer Zuwachs aus ungestörtem Gleis
- φ'' – dynamischer Zuwachs aus Gleisimperfektion
- a_0 – Vorfaktor für dynamische Gleisqualität mit $0 \leq a_0 \leq 1$

Die Ergebnisse zeigten, dass die Parameter zur Ermittlung des dynamischen Zuwachses φ die Fahrgeschwindigkeit v [m/s], die Stützweite der Eisenbahnbrücke L [m] und die erste Biegeeigenfrequenz der belasteten Brücke n_1 [s⁻¹] sind [15]. Hieraus ergab sich zunächst der Parameter k_1 , für den gilt:

$$k_1 = \frac{v}{2 \cdot L \cdot n_1} \quad (2.4)$$

Auf Grundlage des Parameters k_1 ließ sich anschließend der Lastzuwachs aus dem ungestörten Gleis φ' berechnen [15]. Dieser lautete unterdessen:

$$\varphi' = \frac{k_1}{1 - k_1 + k_1^3} \quad (2.5)$$

Es zeigte sich jedoch, dass diese Formel zur Berechnung von φ' für die praktische Anwendung nur bedingt geeignet war, da sie die Bestimmung der ersten Biegeeigenfrequenz der Brücke unter Berücksichtigung der Belastung erfordert. So wurde die Gleichung (2.6) entwickelt, in der fortan die erste Biegeeigenfrequenz der unbelasteten Brücke n_0 anzusetzen war. [15]

$$k = \frac{v}{2 \cdot L \cdot n_0} \quad (2.6)$$

Hieraus folgte:

$$\varphi' = \frac{k}{1 - k + k^4} \quad (2.7)$$

Die Abbildung 2.6 zeigt die Funktion des dynamischen Lastzuwachses aus dem ungestörten Gleis φ' (nach Gleichung (2.7)) in Abhängigkeit des Faktors k (nach Gleichung (2.6)). Der Ausdruck k kann dabei Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Mit dieser Hüllkurve konnten die Mitglieder des DR 23 ihre Messergebnisse visualisieren. Die Funktion in Abbildung 2.6 entspricht dabei dem 95 % Quantil-Wert der Messwerte. Folglich handelt es sich um eine Näherungsfunktion. [15]

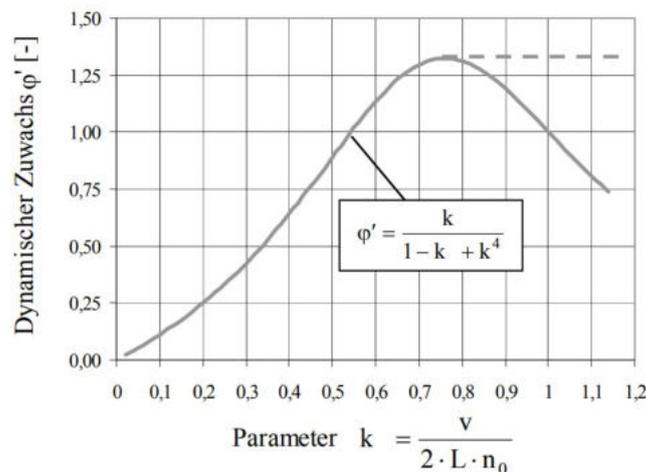


Abbildung 2.6: Funktion des dynamische Lastzuwachses φ' aus dem ungestörten Gleis – entnommen aus [13]

Für die Ermittlung des dynamischen Lastzuwachses φ war zudem noch der Anteil φ'' , resultierend aus Gleisimperfektion zu ermitteln. Als Grundlage für die Ermittlung diente ein Programm der British Railways (BR), welches anhand einer vorgegebenen Modell-Delle (2 mm tiefe Delle im Abstand von 1 m Länge des Gleises) den Einfluss einer Gleisimperfektion darstellen konnte. Zu diesem Zweck wurde der Effekt hoher und niedriger Frequenzen sowie Dämpfungen auf die Modell-Delle theoretisch untersucht. [15]

Für den Einfluss der Gleisimperfektion gilt die Gleichung (2.8). Der Wert a nimmt hierbei für Geschwindigkeiten ≤ 22 m/s den Wert $v/22$ an und beträgt 1,0 für Geschwindigkeiten > 22 m/s [15].

$$\varphi'' = \frac{a}{100} \cdot \left[56 \cdot e^{-\frac{L^2}{100}} + 50 \cdot \left(\frac{n_0 \cdot L}{80} - 1 \right) \cdot e^{-\frac{L^2}{400}} \right] \quad (2.8)$$

Aus den Erkenntnissen der Ermittlung des dynamischen Zuwachses und dem damals vorherrschenden europäischen Schienenverkehr bestand fortan die Aufgabe dies zu einem einheitlichen Lastmodell zusammenzuführen. Für die Berechnung erfolgte die Einteilung der Betriebslastenzüge in sechs sogenannte Idealtypen (siehe Abbildung 2.7). Diese sollten neben dem Abdecken aktueller Beanspruchungen ebenfalls Reserven in Hinblick auf den zukünftigen Verkehr aufweisen. [12, 15]

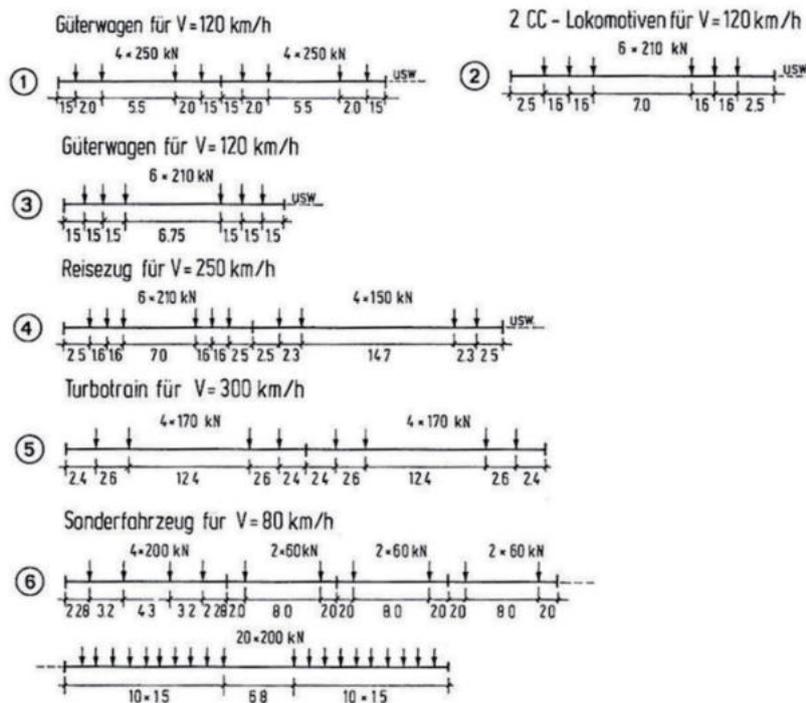


Abbildung 2.7: Idealtypen der Betriebslastenzüge – entnommen aus [12]

Die Idealtypen bilden die folgenden Varianten von Schienenverkehr ab:

- 1) schnellfahrende Güterzüge mit vierachsigen Wagen,
- 2) 2 CC-Triebfahrzeuge – Tenderlok mit zwei Drehgestellen mit je 3 Achsen,
- 3) schnellfahrende Güterzüge mit sechsachsigen Wagen,
- 4) Reisezüge (lokbespannt) für hohe Geschwindigkeiten,
- 5) Triebzug ($v = 300$ km/h),
- 6) Sonderfahrzeug [12].

Die statischen Lasten der zugrunde gelegten sechs Idealtypen wurden indirekt durch das fiktive Belastungsbild UIC 71 abgedeckt. Das bereits 1971 durch den UIC konzipierte Belastungsbild beruht auf der höchst beanspruchsten Streckenklasse mit einer Meterlast von 8 t/m (entspricht 80 kN/m) und auf 4 x 250 kN Einzellasten in symmetrischer Anordnung. Die zuvor genannten Idealtypen sind vom Lastmodell UIC 71 abzugrenzen, da dieses keinen realen Zug repräsentiert. [15]

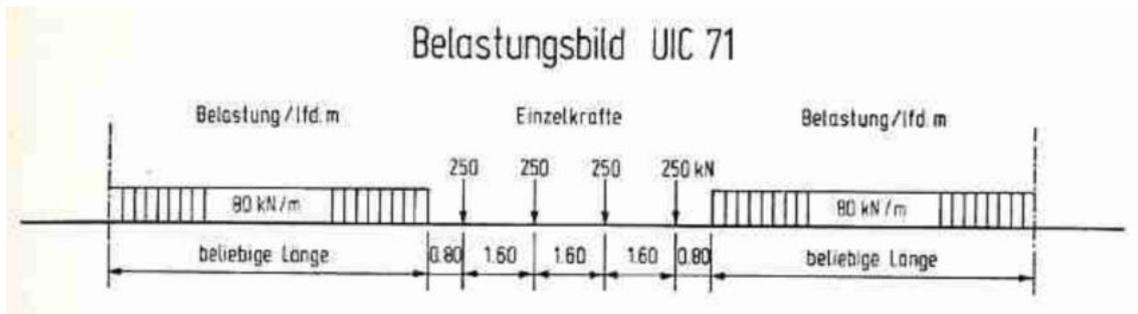


Abbildung 2.8: Belastungsbild UIC 71 – entnommen aus [15]

Im Weiteren folgte die Auswertung aller Idealtypen mit ihren zugehörigen dynamischen Beiwerten $(1+\varphi)$ an einem Einfeldsystem mit maximalen Stützweiten von 200 m [12]. Bei der Ermittlung des Schwingfaktors Φ galt es folgende Bedingungen einzuhalten:

$$M_{\text{UIC71}} \cdot \Phi_2 \geq \max \{M_{\text{B},i} \cdot (1 + \varphi' + 0,5 \cdot \varphi'')_i\} \quad (2.9)$$

$$M_{\text{UIC71}} \cdot \Phi_3 \geq \max \{M_{\text{B},i} \cdot (1 + \varphi' + \varphi'')_i\} \quad (2.10)$$

Anhand der Abbildung 2.9 erfolgt die grafische Darstellung des Verfahrens zur Ermittlung der dynamischen Momentenbeanspruchung. Im linken Teil der Grafik sind die maximalen statischen Biegemomente M_{UIC71} infolge des Lastmodells UIC 71 in Abhängigkeit der Stützweite als Funktionsgraph aufgetragen. Daneben sind

nach [15] beispielhaft für eine bestimmte Stützweite die entsprechenden maximalen statischen Biegemomente $M_{B,i}$ der sechs Betriebslastenzüge sowie deren zugehöriges, mit den jeweiligen Schwingbeiwerten $(1 + \varphi)$ multipliziertes, dynamisches Moment als Balkendiagramm veranschaulicht. Aus dem Maximalwert der ermittelten statischen Biegemomente der Betriebslastenzüge resultiert ein Punkt auf dem Funktionsgraph, somit werden die statischen Beanspruchungen mit dem UIC 71 abgesichert. Die dynamischen Biegemomente hingegen mussten durch das mit dem Schwingfaktor faktorisierte UIC 71 hinsichtlich der Forderungen der Gleichungen (2.9) und (2.10) abgedeckt werden. Hieraus lässt sich schließen, dass das Belastungsbild UIC 71 in Verbindung mit dem Schwingfaktor Φ eine Umhüllende darstellt, die aus der Berechnung mit den sechs Idealtypen für jede beliebige Länge hervorgeht [15].

Die Abbildung 2.9 zeigt zudem, dass die maximale statische und dynamische Momentenbeanspruchung nicht aus demselben Idealtyp der Betriebslastenzüge entstehen müssen, wodurch die Benennung als Schwingfaktor im klassischen Sinne fragwürdig bleibt. Die Diskussion des Begriffs erfolgt in Kapitel 6.3.

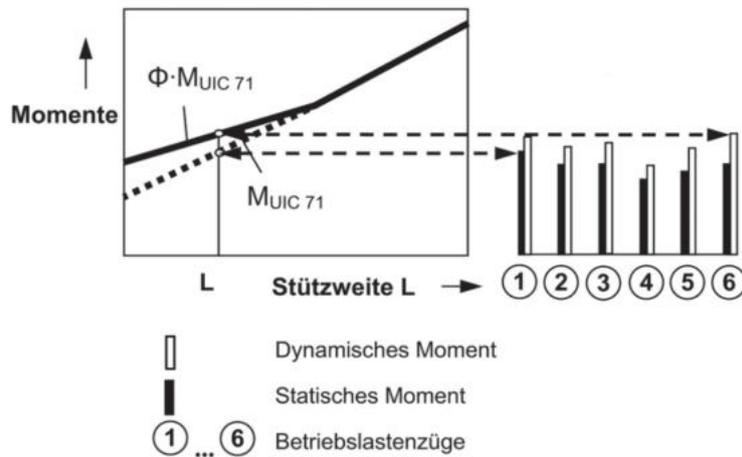


Abbildung 2.9: Verfahren zur Ermittlung der dynamischen Momentenbeanspruchung – entnommen aus [12]

Schlussfolgernd aus den Ergebnissen der Berechnung aus Abbildung 2.9 konnten verschiedene Stützweitenbereiche herausgearbeitet werden (siehe Abbildung 2.10), in denen die jeweiligen Idealtypen der Betriebslastenzüge maßgebend wurden. Bei Stützweiten bis neun Metern ruft der Reisezug aus Idealtyp 4, im Bereich von zehn bis 65 Metern Idealtyp 6, das Sonderfahrzeug, und bei größeren Stützweiten der Idealtyp 1 mit dem Güterzug die maximalen Beanspruchungen hervor. Des Weiteren ist erwähnenswert, dass der Idealtyp 5 als Triebzug mit Geschwindigkeiten bis 300 km/h keinen Stützweitenbereich aufweist, wo er maximale statische und dynamische Beanspruchungen erzeugt. [12]

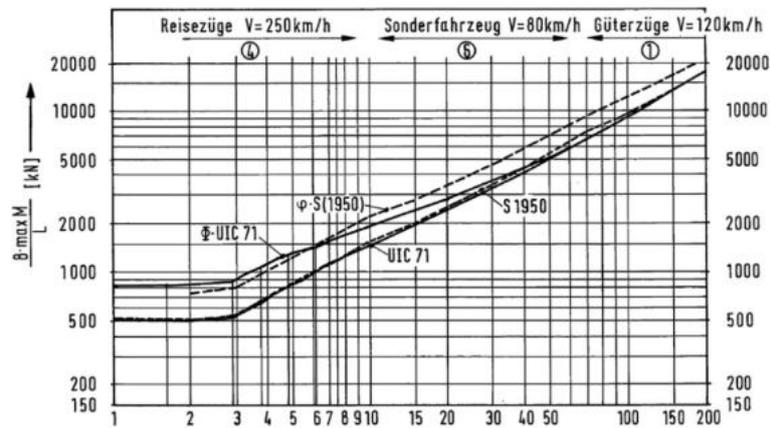


Abbildung 2.10: Momentenbeanspruchung aus UIC 71 im Vergleich zu früheren Lastbildern – entnommen aus [12]

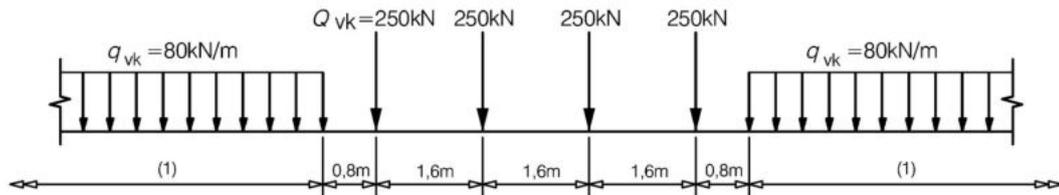
In einem abschließenden Schritt ergab sich für den Schwingfaktor Φ eine algebraische Funktion, die nun nicht mehr von den drei Parametern des dynamischen Zuwachses φ , sondern ausschließlich von der maßgebenden Länge L_Φ der betrachteten Konstruktion abhängig ist [15] und bis heute in der Berechnung von neuen Eisenbahnbrücken berücksichtigt wird. Das Ziel der europäischen Vereinheitlichung wurde mit dem UIC 71 im Zusammenspiel mit dem Schwingfaktor Φ erreicht. Ferner wurde eine starke Vereinfachung der Belastungsbilder erzielt, trotz der komplexen Basis, die sämtliche relevante Betriebszüge betrachtet. Für die Nachrechnung von Bestandsbrücken eignet sich jedoch weiterhin die Ermittlung des Schwingfaktors Φ über den dynamischen Zuwachs φ .

2.3 Dynamische Berechnung in der derzeit gültigen Normung

Das Eisenbahn-Bundesamt (EBA) veröffentlicht Eisenbahnspezifische Technische Baubestimmungen (EiTB), welche bauaufsichtliche Einführungen von Regelwerken, Änderungen oder Ergänzungen dieser beinhalten. Festlegungen zu den Verkehrslasten infolge Schienenverkehrs finden sich gemäß EiTB Ausgabe 2024/1 in der DIN EN 1991-2:2010-12 sowie DIN EN 1991-2/NA:2012-08 in Verbindung mit der Richtlinienfamilie (Ril) 804.

2.3.1 Berechnung nicht-resonanzgefährdeter Eisenbahnbrücken

Zur Berechnung von Eisenbahnbrücken ist nach DIN EN 1991-2 [16] weiterhin das damalige Belastungsbild UIC 71 gültig, welches fortan als Lastmodell (LM) 71 bezeichnet wird. Dieses Lastmodell ist für Berechnung von Einfeldsystemen vorgesehen und beschreibt dabei den statischen Anteil des Regelschienenverkehrs. Die Anordnung der Lasten kann der Abbildung 2.11 entnommen werden.



Legende

1 keine Begrenzung

Abbildung 2.11: Lastmodell (LM) 71 – entnommen aus DIN EN 1991-2 [16]

Die damaligen Untersuchungen zur Entwicklung des UIC 71 beruhen auf dem Regelverkehr und wurden an Einfeldsystemen durchgeführt. Aufgrund fehlender technischer Möglichkeiten zur Berechnung und Auswertung, weist das UIC 71 Defizite beim Abdecken der Beanspruchungen von Schwerverkehr sowie bei durchlaufenden Systemen auf. Dies hatte zur Folge, dass zusätzliche Lastbilder erforderlich wurden. [17] Für Durchlaufsysteme ist gemäß DIN EN 1991-2 das Lastmodell SW/0 (früher: SW) anzuwenden, welches wie das LM 71 den statischen Anteil des Regelschienenverkehrs repräsentiert. Die Berücksichtigung des statischen Anteils des Schwerverkehrs erfolgt durch das Lastmodell SW/2 (früher: SSW). Beide Lastmodelle sind in der Abbildung 2.12 veranschaulicht.

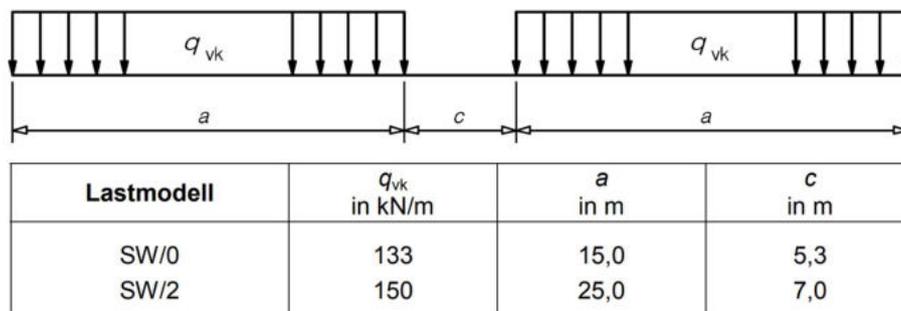


Abbildung 2.12: Lastmodelle SW/0 und SW/2 – entnommen aus DIN EN 1991-2 [16]

Zusätzlich ist das LM 71 sowie SW/0 über den Lastklassenbeiwert α zu skalieren, wodurch ein leichter oder schwerer Verkehr in Rechnung gestellt werden kann [16].

Die grundsätzliche Vorgehensweise erfordert zu Beginn die statische Berechnung mit den Lastmodellen LM 71, SW/0 oder SW/2 entsprechend der vorliegenden Parameter. Hierauf wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen. Um die dynamischen Einflüsse bei den Schnittgrößen in Ansatz zu bringen, werden diese mit dem dynamischen Beiwert Φ multipliziert. Zunächst muss jedoch der Entfall der dynamischen Rechnung nach Ril 804.3101 Abs. 3 (2) [18] geprüft werden.

Des Weiteren umfasst die Ril 804.3101 Abs. 3 (3) eine vereinfachte Überprüfung des Resonanzrisikos. Dabei hat die erste Eigenfrequenz der unbelasteten Brücke n_0 in einem definierten Bereich zu liegen, wodurch untersucht wird, ob eine Resonanzgefahr besteht. Die entsprechenden Grenzen der Brückeneigenfrequenz sind in Abbildung 2.13 angegeben.

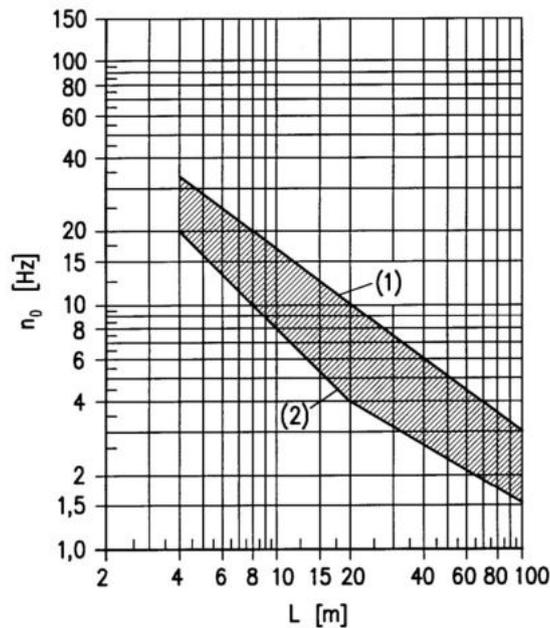


Abbildung 2.13: Grenzen der maßgebenden Biegeeigenfrequenz n_0 in Abhängigkeit der Stützweite – entnommen aus Ril 804.3101 [18]

Die obere Grenzfrequenz (1) wird bestimmt durch:

$$n_{01} = 94,76 \cdot L^{-0,748} \quad (2.11)$$

Die untere Grenzfrequenz (2) ist folgendermaßen definiert:

$$n_{02} = \frac{80}{L} \quad \text{für } 4 \text{ m} \leq L \leq 20 \text{ m} \quad (2.12)$$

$$n_{02} = 23,58 \cdot L^{-0,592} \quad \text{für } 20 \text{ m} < L \leq 100 \text{ m} \quad (2.13)$$

Für die Länge L ist die Stützweite bei Einfeldträgern, andernfalls die maßgebende Länge L_Φ nach DIN EN 1991-2/NA Tabelle NA.6.2 einzusetzen. Liegt die maßgebende Biegeeigenfrequenz n_0 der Eisenbahnbrücke im grau gekennzeichneten Frequenzbereich der Abbildung 2.13 unter Beachtung der Bedingung $n_{02} \leq n_0 \leq n_{01}$, darf der dynamische Beiwert zur Berücksichtigung der dynamischen Beanspruchungen verwendet werden. Andernfalls muss nach Abschnitt 2.3.2 vorgegangen werden.

Die Definition des Beiwerts gibt die DIN EN 1991-2 mit der folgenden Aussage an: „Der dynamische Beiwert Φ berücksichtigt die dynamische Vergrößerung von Beanspruchungen und Schwingungen im Tragwerk, aber nicht die aus Resonanz und übermäßigen Schwingungen der Brücke“ [16]. Dies bedeutet, dass unter Verwendung des dynamischen Beiwerts keine dynamische Berechnung des Brückenbauwerks erfolgt. Im Weiteren berücksichtigt die DIN EN 1991-2 eine Differenzierung des dynamischen Beiwerts nach der Instandhaltungsqualität des Gleises, sodass Φ entweder den Wert Φ_2 (nach Gleichung (2.14)) oder Φ_3 (nach Gleichung (2.15)) annimmt:

a) für sorgfältig instand gehaltene Gleise:

$$\Phi_2 = \frac{1,44}{\sqrt{L_\Phi - 0,2}} + 0,82 \quad \text{mit: } 1,0 \leq \Phi_2 \leq 1,67 \quad (2.14)$$

b) für Gleise mit normaler Instandhaltung:

$$\Phi_3 = \frac{2,16}{\sqrt{L_\Phi - 0,2}} + 0,73 \quad \text{mit: } 1,0 \leq \Phi_3 \leq 2,0 \quad (2.15)$$

Die maßgebende Länge L_Φ richtet sich hierbei nach dem Bauteil und dessen Materialität sowie statischen Systems. Bei Betrachtung einer einfeldrigen Brücke in Haupttragrichtung beispielsweise entspricht L_Φ der Stützweite L [16]. Die entsprechenden Werte für L_Φ sind der Tabelle NA.6.2 der DIN EN 1991-2/NA zu entnehmen.

2.3.2 Exkurs: Berechnung resonanzgefährdeter Eisenbahnbrücken

Liegt die Brückeneigenfrequenz n_0 außerhalb der Grenzen nach Abbildung 2.13, so wird eine dynamische Berechnung erforderlich. Dazu wird die betreffende Eisenbahnbrücke modelliert und durch Zugüberfahrten von Hochgeschwindigkeitszügen (z. B. Lastmodell HSLM) belastet. Die DIN EN 1991-2 erlaubt die simulierte Zugüberfahrt durch eine dem Betriebszug entsprechende Abfolge von Einzellasten abzubilden. Im Gegensatz zum Lastmodell 71 und SW/0 werden hier keine Linienlasten verwendet.

Mithilfe der dynamischen Berechnung kann im ersten Schritt der dynamische Zuwachs φ'_{dyn} bestimmt werden:

$$\varphi'_{dyn} = \max | y_{dyn}/y_{stat} | - 1 \quad (2.16)$$

mit:

- y_{dyn} – größte dynamische Antwort
- y_{stat} – zugehörige größte statische Antwort infolge HSLM oder eines Betriebslastenzuges

Die Bemessung der Eisenbahnbrücke laut DIN EN 1991-2 erfolgt schließlich unter Anwendung der nachfolgenden Gleichung:

$$\max \left\{ \begin{array}{l} (1 + \varphi'_{dyn} + \varphi''/2) \times (\text{HSLM oder Betriebszug}) \\ \Phi \times \text{LM 71} \\ \Phi \times \text{SW/0} \quad (\text{nur bei Durchlaufsystemen erf.}) \end{array} \right. \quad (2.17)$$

mit:

$$\left. \begin{array}{l} \text{HSLM} \\ \text{Betriebszug} \\ \text{LM 71} \\ \text{SW/2} \end{array} \right\} \text{ Beanspruchung aus jeweiligem Lastmodell}$$

Φ – dynamischer Beiwert nach Gleichung (2.14) bzw. (2.15)

Der dynamische Zuwachs für die Gleisqualität φ'' ergibt sich dabei zu:

$$\varphi'' = \frac{a}{100} \cdot \left[56 \cdot e^{-\left(\frac{L_{\Phi}}{10}\right)^2} + 50 \cdot \left(\frac{L_{\Phi} \cdot n_0}{80} - 1 \right) \cdot e^{-\left(\frac{L_{\Phi}}{20}\right)^2} \right] \geq 0 \quad (2.18)$$

Der Koeffizient für die Geschwindigkeit a beträgt: $a = v/22$ bei $v \leq 22$ m/s
 $a = 1,0$ bei $v > 22$ m/s

Trotz der genauen dynamischen Berechnung muss die Bemessung im GZT mit dem maßgebenden Wert aus der dynamischen Betrachtung und aus dem mit Φ multiplizierten LM 71 (bzw. SW/2) nach Gleichung (2.17) durchgeführt werden. In der vorliegenden Arbeit werden resonanzgefährdete Eisenbahnbrücken nicht weiter thematisiert.

2.3.3 Nachrechnung nicht-resonanzgefährdeter Brücken

Aufgrund des alternden Eisenbahnnetzes in Deutschland hat die Instandhaltung bestehender Brücken immer weiter an Bedeutung gewonnen. Um frühere Bauwerke nach heutigen Vorgaben beurteilen zu können, steht mit der Normengruppe Richtlinie 805 „Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken“ (Ril 805) [19] ein entsprechendes Regelwerk zur Verfügung.

Die Ril 805 beinhaltet die in Abbildung 2.14 aufgeführten Bestandteile. Neben Grundlagen und Nachweisen zur Berechnung der Tragfähigkeit bestehender Eisenbahnbrücken definiert ein Teil der Richtlinie Vorgaben zur Ermittlung der Restnutzungsdauer stählerner Eisenbahnbrücken und gibt einen Einblick in die messtechnische Bauwerksuntersuchung. Innerhalb dieses Kapitels soll ausschließlich ein Einblick in die nachfolgenden Bestandteile gegeben werden.

Bestandteile	
805.0001	Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken; Allgemeine Grundsätze
805.0101	Grundlagen der Bewertung; Ausgangsbasis und Bewertungsprinzipien
805.0102	Grundlagen für die Nachrechnung; Lastannahmen und Teilsicherheitswerte
805.0102A01	Grundlagen für die Nachrechnung; Dynamische Beiwerte (Schwingbeiwerte)
805.0103	Grundlagen der Berechnung; Werkstoffe (Baustoffe)
805.0103A01	Grundlagen der Berechnung; Baustoffuntersuchungen
805.0103A02	Grundlagen der Berechnung; Baustoffkennwerte für Beton aus den Vorschriften ab 1915
805.0104	Grundlagen für die Nachrechnung; Meßtechnische Bauwerksuntersuchungen
805.0201	Nachrechnen von Eisenbahnbrücken; Stählerne Eisenbahnbrücken
805.0201A01	Längsverteilung der Radlasten beim Nachweis der Brückenbalken
805.0201A02	Hilfestellung für den Einstieg in alte statistische Berechnungen
805.0201A03	Nachweis der Knicksicherheit
805.0201A04	Nachweis der Beulsicherheit
805.0201A05	Restnutzungsdauernachweis für nicht geschweißte stählerne Eisenbahnbrücken (Kerbfälle WI bis WIII)
805.0201A06	Restnutzungsdauernachweis für nicht geschweißte stählerne Eisenbahnbrücken (Kerbfälle KI bis KX)
805.0201A07	Betriebszeiinterwallnachweis für stählerne Eisenbahnbrücken
805.0201A08	Anfangsrißlängen und Modelbreiten beim Betriebszeitintervallnachweis
805.0202	Nachrechnen von Eisenbahnbrücken; Tragwerke aus Beton und Walzträgern in Beton
805.0203	Grundlagen der Bewertung Gewölbebrücken, Unterbauten und Gründungen
805.0204	Nachrechnen von Eisenbahnbrücken; Lagesicherheit und Verformungen
805.0301	Bestimmung der Belastbarkeit; Belastbarkeitswerte

Abbildung 2.14: Bestandteile der Ril 805 – entnommen aus [19]

805.0001 - allgemeine Grundsätze aus [19]

Der Geltungsbereich ist auf den Nachweis der Tragsicherheit aller Bauarten und Stützweiten von Eisenbahnbrücken der DB Netz AG beschränkt, welche mindestens sechs Jahre alt sind. Die Richtlinie zielt darauf ab, die Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken realitätsnah nachzuweisen. Dadurch soll erreicht werden, dass Verringerungen der zulässigen Betriebslast und -geschwindigkeit durch nutzungsbedingten Verschleiß vermieden oder höhere Betriebslasten zugelassen werden können.

Für die Nachweisführung werden Stufen der Nachrechnung mit steigendem Genauigkeitsgrad definiert, die sich wie folgt gliedern:

Bewertungsstufe 1	Beurteilung der Tragsicherheit durch generalisierte ingenieurmäßige Betrachtungen
Bewertungsstufe 2	Nachweis der Tragsicherheit durch Berechnungen auf Basis einer ggf. vorhandenen Statik
Bewertungsstufe 3	Nachweis der Tragsicherheit auf Grundlage komplexer Rechenmethoden um zusätzliche Tragreserven zu erschließen
Bewertungsstufe 4	Feststellung der Tragsicherheit durch messwertgestützte Berechnung; Ermittlung und Kalibrierung des Tragverhaltens unter tatsächlichen Lasten

805.0101 bzw. 805.0102 - Grundlagen der Nachrechnung aus [19]

Die oben genannten Bestandteile der Ril 805 treffen Aussagen zum Nachweiskonzept. So kann die Bewertung bestehender Eisenbahnbrücken auf Grundlage der zuvor beschriebenen Bewertungsstufen erfolgen. Nachweise der Tragsicherheit können nach dem globalen Sicherheitskonzept oder Teilsicherheitskonzept erbracht werden. Das globale Sicherheitskonzept meint vor allem die Berücksichtigung der Sicherheit durch einen globalen Sicherheitsfaktor. Dieser wird in der Regel bei der Ermittlung des Bauteilwiderstands angesetzt. Bei dem Teilsicherheitskonzept wird je ein Teilsicherheitsbeiwert auf der Einwirkungs- und auf der Widerstandsseite herangezogen. Zusätzlich findet der Erhaltungszustand der Eisenbahnbrücke in gesonderten Teilsicherheitsbeiwerten γ_b Berücksichtigung. Neben diesen zusätzlichen Teilsicherheiten, zeichnet sich die Nachrechnung bestehender Brücken nach der Ril 805 durch weitere Spezifika aus. So erfolgt eine zusätzliche Verminderung der Teilsicherheitsbeiwerte bei der Ermittlung der ständigen und veränderlichen Einwirkungen. Gründe hierfür sind die Möglichkeit zur genauen Ermittlung der vorherrschenden ständigen Lasten und beispielsweise die geringe Streuung der veränderlichen Lasten aufgrund ihrer begrenzten Nutzungszeit. [20]

Der Bestandteil 805.0102 trifft unter anderem allgemeine Aussagen zur Berechnung des Schwingfaktors für die maßgebenden Lastbilder. So ist der anzusetzende Schwingfaktor der Ril 804 zu entnehmen, sofern aufgrund fehlender dynamischer Messungen keine Aussagen zum Schwingbeiwert vorliegen.

Für Brückenbalken gilt ein Schwingfaktor von $\Phi = 1,3$. Für die Betriebslastenzüge ist bei fehlenden dynamischen Messungen der Schwingbeiwert $1 + \varphi$ nach der folgenden Gleichung zu bestimmen:

$$\varphi = a_1 \cdot \varphi' + a_2 \cdot \varphi'' \quad \text{mit } \varphi < 1 \quad (2.19)$$

Hier bedeuten:

- φ' – Anteil für das geometrisch intakte Gleis
- φ'' – Anteil, der die Gleisimperfektion aus der vertikalen Störung erfasst

Für den Koeffizienten a_1 gilt:

$$a_1 = \left(\frac{15 + L}{12 + 0,1 \cdot L} \right) \quad \text{bei Zügen mit Dampflok für die Hauptträger}$$

(Stützweite L in m)

$$a_1 = 1,0 \quad \text{bei allen sonstigen Zügen und Bauteilen}$$

Für a_2 gilt:

- $a_2 = 1,0$ bei Gleiszustand 3 nach Norm
- $a_2 = 0,5$ bei Gleiszustand 2 nach Norm
- $a_2 = 0$ bei Gleiszustand 1 nach Norm

Die Berechnung der Anteile φ' und φ'' des dynamischen Zuwachses φ erfolgt grundlegend nach den historisch herangewachsenen Formeln. Die Ermittlung von φ' ist bestimmt durch die Gleichung (2.6) in Verbindung mit der Gleichung (2.7). φ'' lässt sich durch Gleichung (2.18) berechnen. Hierbei gilt für den Parameter a abweichend $a = v/80$ bei $v \leq 80$ km/h. Zusätzlich müssen die Grenzen der Eigenfrequenz n_0 nach Abbildung 2.13 berücksichtigt werden.

805.0104 - Messtechnische Bauwerksuntersuchungen [19]

Die Vorgaben der Ril 805.0104 bieten die Möglichkeit einer messtechnischen Untersuchung des Tragverhaltens bestehender Brücken und finden Anwendung bei Nachrechnungen der Bewertungsstufe 4. Das Ziel der Untersuchung ist, bauspezifische Eigenschaften wie z. B. die Schwingbeiwerte realitätsnah zu erfassen, realistische

Teilsicherheitsbeiwerte festzulegen und den Nachweis führen zu können, sodass die Nachrechnung in keinem Widerspruch mit dem wirklichen Bauwerk steht. Gemessene Werte sind statischer oder dynamischer Herkunft und werden anschließend in einem messtechnischen Bericht niedergeschrieben. In Vergleichsrechnungen oder Messungen sind diese zu validieren. Durchgeführt werden messtechnische Bauwerksuntersuchungen in der Regel von der Brückenmessung (Kürzel I.IAI 32).

2.4 Ausblick auf die neue Eurocode-Generation

Bereits im 1998 erschienenen Artikel von QUOOS und FILA [17] wurde der Vorschlag eines neuen Lastbildes des UIC diskutiert. In Anbetracht der immer weiter steigenden Achslasten schien das UIC 71 schon damals nicht mehr zukunftsorientiert zu sein, deshalb wurde das UIC 2000 vorgeschlagen, welches jedoch nie in die Normung aus Gründen der Wirtschaftlichkeit aufgenommen wurde [17]. Das UIC 2000 besteht aus einer beliebig langen Streckenlast $q_{vk} = 110 \text{ kN/m}$ und zwei Einzellasten $Q_{vk} = 300 \text{ kN}$ im Abstand von 5,0 m, wie in Abbildung 2.15 dargestellt.

Aus damaligen Untersuchungen hat sich im Weiteren gezeigt, dass das UIC 2000 sowohl den Schwerlastverkehr als auch Auswirkungen auf Durchlaufsystemen abdecken kann. Folglich können die Lastmodelle SW/0 und SW/2 entfallen. [17]

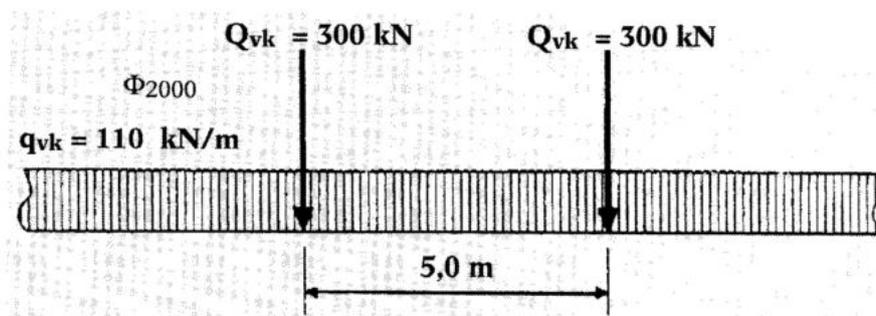


Abbildung 2.15: Vorschlag Belastungsbild UIC 2000 – entnommen aus [17]

Der zugehörige Schwingfaktor Φ_{2000} zum UIC 2000 berechnet sich gemäß [17] nach der folgenden Gleichung:

$$\Phi_{2000} = 1,0 + \frac{5}{7 + L_{\Phi}} \quad (2.20)$$

Statt eines neuen Lastmodells im Entwurf zum neunten Eurocode E DIN EN 1991-2:2021-09 [21] werden weiterhin die bereits bekannten Lastmodelle 71, SW/0 und SW/2 verfolgt. Um den steigenden Achslasten Rechnung zu tragen, ist nur eine

Erhöhung durch Multiplikation mit dem Lastklassenbeiwert α möglich. Dieser kann wie bisher die folgenden Werte annehmen:

$$0,75 - 0,83 - 0,91 - 1,00 - 1,10 - 1,21 - 1,33 - 1,46$$

Das Lastmodell SW/2 zur Berücksichtigung des Schwerverkehrs kann bei Verwendung eines Lastklassenbeiwerts $\alpha \geq 1,33$ entfallen [21].

In den letzten Jahrzehnten hat die Verlagerung der Gütertransporte von der Schiene auf die Straße sowie der verstärkte Fokus auf die Wirtschaftlichkeit entscheidend dazu beigetragen, dass das LM 71 Stand der Technik bleibt und eine Anpassung an höhere Achslasten durch den Klassifizierungsfaktor erfolgt [12]. Bereits im Jahr 2011 ruft HARTMUT FREYSTEIN als Leiter der Außenstelle Berlin des Eisenbahnbundesamtes in [12] jedoch dazu auf, die Überlegungen zum UIC 2000 erneut aufzugreifen. FREYSTEIN begründet dies zum einen durch die Vereinfachungen, die das Lastmodell 2000 mit sich bringt und zum anderen als Reaktion auf die künftigen Lastentwicklungen [12]. Überdies ist nach der Veröffentlichung [22] von HENNECKE und MÖLTER im Jahr 2012 ist die Verwendung der Lastklassenbeiwerte α unumgänglich in Hinsicht auf nachhaltiges Bauen, da das bisherige Lastmodell 71 über keine Reserven mehr verfügt.

2.5 Historische Zeittabelle

In der Tabelle 2.2 werden chronologisch die wichtigsten zuvor beschriebenen Ereignisse zusammengefasst.

Tabelle 2.2: Zeittabelle zur historischen Entwicklung der Eisenbahnlastmodelle

Jahr	Ereignis
2. Hälfte 19. Jh.	<ul style="list-style-type: none"> • Beobachtung zusätzlicher Beanspruchungen durch Stöße • Versuche, Beobachtungen und Dokumentationen neuer Erkenntnisse durch WÖHLER, GERBER und EBERT • uneinheitliche bautechnischen Regelungen der Deutschen Staatsbahnen: teilweise Verwendung eines Faktors zum Vervielfachen der statischen Beanspruchungen; Nachweis über zul. Spannung

Jahr	Ereignis
1920	Gründung der Deutschen-Reichsbahn-Gesellschaft (DRG) <u>Ziel:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Normierung von Loks und Wagen • Erarbeitung einheitlicher Berechnungsvorschriften sowie „Stoßzahlen“
1925	Einführung der Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken (BE), Ausgabe 1925: <ul style="list-style-type: none"> • Einführung der Lastenzüge N (schwer), E und G (leicht) sowie allgemein gültiger „Stoßzahlen“
1934	Einführung der Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken (BE), Ausgabe 1934 (Dienstvorschrift (DV) 804)
1936	Einführung der Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken (BE), Ausgabe 1936 (DV 804)
1944	Einführung der Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken (BE), Ausgabe 1944 (DV 804): <ul style="list-style-type: none"> • Umbenennung „Stoßzahl“ in „Schwingbeiwert“
1951	Einführung der Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken (BE), Ausgabe 1951 (DV 804): <ul style="list-style-type: none"> • Einführung des Lastenzuges S 1950 sowie überarbeitete Schwingbeiwerte
1955	Gründung des Sachverständigenausschuss D23 („Ermittlung der dynamischen Beanspruchung von Eisenbahnbrücken“) durch den Internationalen Eisenbahnverband UIC mit seinem Forschungs- und Entwicklungsinstitut ORE: <u>Ziel:</u> <ul style="list-style-type: none"> • europaweite Vereinheitlichung der Vorschriften <u>Aufgaben:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Durchführung von Brückenmessungen zur Untersuchung des dynamischen Einflusses von Eisenbahnlasten • Analyse der Versuchsergebnisse und Formulierung von Gleichungen
1971	Erstellung des Konzepts für das fiktive Belastungsbild UIC 71 (mit Schwingfaktor Φ_{UIC}) durch den UIC, welches die vorher definierten sechs Idealtypen der verkehrenden Betriebslastenzüge abdecken soll

Jahr	Ereignis
1983	Einführung der Druckschrift (DS) 804 (ersetzt die DV 804): <ul style="list-style-type: none"> • Einführung der Lastbilder UIC 71, SW und SSW mit entsprechendem Schwingfaktor Φ_{UIC}, Φ_{SW} und Φ_{SSW} • Einführung des Lastklassenbeiwerts α
1998	Diskussion eines neuen Lastbildes UIC 2000 (als Ersatz für die Lastmodelle UIC 71, SW/0, SW/2) mit dem Schwingfaktor Φ_{2000}
2003	Einführung des DIN Fachberichts 101:2003 Einführung der Richtlinie (Ril) 804 (ersetzt die DS 804)
2009	Einführung des DIN Fachberichts 101:2009 (direkter Vorläufer des Eurocodes)
2010	Einführung des Eurocodes DIN EN 1991-2:2010-12: <ul style="list-style-type: none"> • Belastungsbild UIC 71 nun als Lastmodell (LM) 71 bezeichnet (gilt für den Regelschienenverkehr an Einfeldsystemen) • Belastungsbild SW nun als Lastmodell SW/0 bezeichnet (gilt für den Regelschienenverkehr an Durchlaufsystemen) • Belastungsbild SSW nun als Lastmodell SW/2 bezeichnet (gilt für den Schwerverkehr) • Gleichungen zur Berechnung des Schwingfaktors Φ_2 und Φ_3 in Abhängigkeit der Instandhaltung der Gleise
2012	Einführung des zugehörigen nationalen Anhangs zum Eurocode DIN EN 1991-2/NA:2012-08
2021	Entwurf zum neuen Eurocode E DIN EN 1991-2:2021-09

3 Messdatenerzeugung und Messtechnik

3.1 Theoretische Grundlagen - Komponenten der Messtechnik

3.1.1 Dehnungsmessstreifen / Wheatstonesche Brückenschaltung

Das grundlegende Funktionsprinzip eines Dehnungsmessstreifens (DMS) beruht darauf, dass die an der Oberfläche des Messobjekts auftretenden Dehnungen auf einen daran befestigten elektrischen Leiter übertragen werden, wodurch sich dessen Widerstand entsprechend ändert. Durch die Herstellung einer Wheatstoneschen Brückenschaltung kann mittels der Messung dieser Widerstandsänderung die auftretende Dehnungsänderung mit hoher Genauigkeit bestimmt werden. Der Zusammenhang zwischen Dehnung und Spannung in einem Bauteil wird dabei durch die für den jeweiligen Werkstoff und den Beanspruchungszustand geltenden Materialgesetze beschrieben. Im elastischen Verformungsbereich findet das Hookesche Gesetz zur Spannungsermittlung Anwendung. [23] Die Abbildung 3.1 zeigt den Prinzipaufbau eines Folien-Dehnungsmessstreifens mit metallischem Messgitter als Flachgitter.

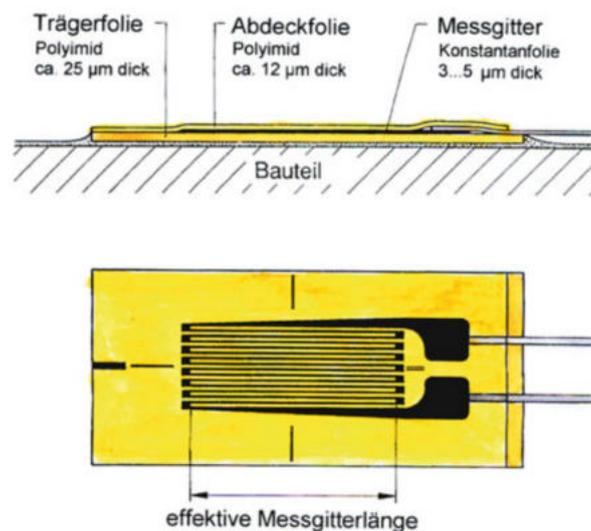


Abbildung 3.1: Prinzipaufbau eines Flachgitter DMS – entnommen aus [23]

Solche linearen Dehnungsmessstreifen dienen vor allem zur einachsigen Dehnungsermittlung, sodass die aktiven Teile des Widerstandsdrahts parallel liegen und in Messrichtung ausgerichtet sind. Lineare Dehnungsmessstreifen mit metallischem Messgitter, die gegenwärtig zur Verfügung stehen, weisen aktive Messgitterlängen von etwa 0,2 mm bis 150 mm auf. Ihre Nennwiderstände liegen unabhängig von der Messgitterlänge in der Regel in einer Spannweite zwischen 100 Ohm und 1000 Ohm. [23] In der Praxis finden bereits abgedeckte Dehnungsmessstreifen immer wieder Anwendung. Beispielhaft wird in der Abbildung 3.2 ein Dehnungsmessstreifen des Typs WFLA der Firma Tokyo Measuring Instruments Lab. aufgeführt. Dieser wasserdichte Dehnungsmessstreifen besitzt eine aufgebrauchte Schicht aus Epoxidharz. Hierdurch kann der Eintrag von Feuchtigkeit bei der Applikation und Nutzung des Dehnungsmessstreifens zum größten Teil verhindert werden.

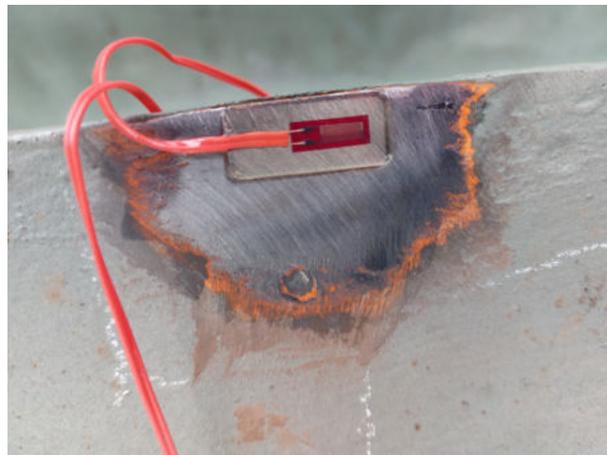


Abbildung 3.2: wasserdichter Dehnungsmessstreifen der Firma Tokyo Measuring Instruments Lab.

Wie zuvor beschrieben, erfährt der Dehnungsmessstreifen durch die auftretende Verformung eine Widerstandsänderung. Die Eingangsgröße des Dehnungsmessstreifens ist die von ihm erfasste Dehnung ε , während die Ausgangsgröße die durch diese Dehnungsänderung verursachte Widerstandsänderung $\Delta R/R$ ist. Der Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen wird durch den k -Faktor (sog. Proportionalitätskonstante) beschrieben. [23]

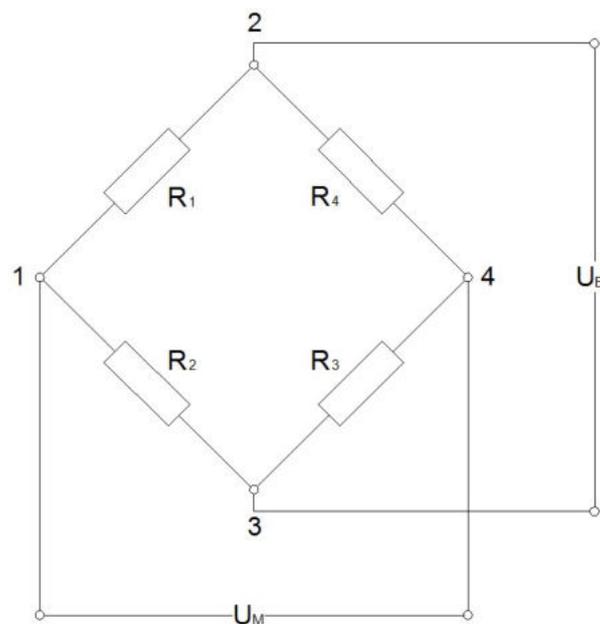
$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (3.1)$$

Der k -Faktor ist spezifisch für jeden Dehnungsmessstreifen, da dieser vom Messgitterwerkstoff abhängig ist. Einige Beispielwerte hierfür können der Tabelle 3.1 entnommen werden. Die von den Herstellern angegebenen k -Faktoren für Dehnungsmessstreifen sind in der Regel für Messungen bei Raumtemperatur gültig. [23]

Tabelle 3.1: k -Faktoren gebräuchlicher metallischer Messgitterwerkstoffe – entnommen aus [23]

Werkstoff (Legierungsbestandteile in %)	k -Faktor; 20 °C
Konstantan „Advance“ (60 Cu, 40 Ni)	$\approx 2,15$
Konstantan „Eureka“ (56 Cu, 44 Ni)	$\approx 2,0$
Isoelastic (36 Ni, 8 Cr, 3,5 Mn, 0,5 Mo, 52 Fe)	$\approx 3,6$
Nimonic 90 (46 Ni, 21 Cr, 21 Co, 5 Fe u. a.)	$\approx 1,8$
Karma 331 (74 Ni, 20 Cr, 3 Fe, 3 Al)	$\approx 2,3$
Nichrome (80 Ni, 20 Cr)	$\approx 2,1 \dots 2,5$
Platin-Wolfram (92 Pt, 8 W)	$\approx 4,0$

Die Wheatstonesche Brückenschaltung, in die die Dehnungsmessstreifen eines Aufnehmers integriert sind, bietet die Möglichkeit, Temperaturbeeinflussungen nahezu vollständig zu kompensieren [24]. Die Abbildung 3.3 zeigt den Aufbau einer solchen Wheatstoneschen Brückenschaltung.

**Abbildung 3.3:** Aufbau einer Wheatstoneschen Brückenschaltung – entnommen aus [23]

Die vier Zweige der Brückenschaltung werden durch die Widerstände R_1 bis R_4 gebildet. Die Brückeneckpunkte 2 und 3 bilden die Anschlüsse für die Brückenspeisung U_B . An den Eckpunkten 1 und 4 liegt die Brückenausgangsspannung U_M an, die dem Messsignal entspricht. Die Funktionsweise der Brückenschaltung beruht darauf, dass bei der Speisung der Schaltung an gegenüberliegenden Punkten die Spannung der jeweils anderen beiden gegenüberliegenden Punkte direkt mit den Widerstandsverhältnissen innerhalb der Brückenarme korreliert. Sind zum Beispiel

alle vier Widerstände in den Brückenweigen gleich ($R_1 = R_2 = R_3 = R_4$), ist die Ausgangsspannung null und es liegt ein sogenannter „abgeglicherer Zustand“ vor. Ändert sich ein Widerstand durch eine auftretende Verformung, ist die resultierende Ausgangsspannung ein Maß für diese Widerstandsänderung und wird als sog. „Verstimmung“ bezeichnet. Dieser Effekt wird beim Messen mit Dehnungsmessstreifen genutzt, indem die Widerstandsänderung eines in einem Brückenweig geschalteten Dehnungsmessstreifens erfasst wird. Die Ausgangsspannung der Schaltung dient somit als Maß für die Dehnung. [23] Die „Verstimmung“ einer Schaltung lässt sich nach [24] mit folgender Formel berechnen:

$$U_M = U_B \cdot \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (3.2)$$

Für den Fall, dass sich die Brücke in einem „abgeglichenen Zustand“ befindet, gilt:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

Die Ausgangsspannung U_M ist demzufolge null. Erfährt der Dehnungsmessstreifen nun eine Dehnung, ändert sich der Widerstand der Dehnungsmessstreifen um den Wert ΔR . Unter Berücksichtigung, dass bei einer Messung mit Dehnungsmessstreifen bei einer Wheatstoneschen Brücke für die Widerstände $R_1 = R_2$ und $R_3 = R_4$ anzusetzen ist, gilt nach [24] im Allgemeinen folgender Zusammenhang:

$$\frac{U_M}{U_B} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (3.3)$$

Eine ausführliche Herleitung dieser Gleichung kann [24] entnommen werden. Abschließend erfolgt das Einsetzen der in Gleichung (3.1) aufgezeigten Gesetzmäßigkeit. Hieraus folgt:

$$\frac{U_M}{U_B} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (3.4)$$

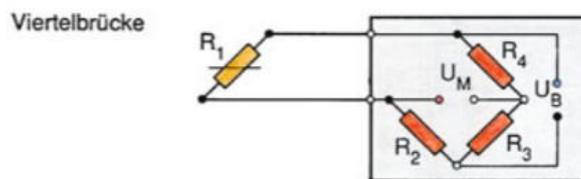


Abbildung 3.4: Ergänzung einer Viertelbrücke zur Vollbrücke durch zusätzliche Festwiderstände – entnommen aus [23]

Die zuvor beschriebene Gleichung (3.4) geht davon aus, dass sich alle Widerstände der Wheatstoneschen Brückenschaltung ändern [24]. Die Fachstelle Brückenmessung I.IAI 32 der DB InfraGO AG nutzt zur messtechnischen Untersuchung eine sogenannte Viertelbrücke, die durch das Hinzufügen von Festwiderständen zur Vollbrücke ergänzt wird (Abbildung 3.4). Hierzu wird ein Dehnungsmessstreifen zur einachsigen Dehnungsmessung appliziert. Dieser wird durch das Zuschalten von drei Festwiderständen zur Vollbrücke ergänzt. Der wesentliche Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass eine möglichst genaue Ermittlung der Dehnungen möglich ist. Der grundlegende Anwendungsbereich dieser Schaltung liegt in der Dehnungsmessung am Druck-/Zug- bzw. Biegestab.

Durch die Widerstandsmessung nur eines Dehnungsmessstreifens vereinfacht sich die Gleichung (3.4) zu:

$$\frac{U_M}{U_B} = \frac{k}{4} \cdot \varepsilon_1 \quad (3.5)$$

Die zu ermittelnde Dehnung ε ergibt sich demnach zu:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon = \frac{4}{k} \cdot \frac{U_M}{U_B} \cdot 1000 - \varepsilon_{th} \quad (3.6)$$

Die Ausgangsspannung U_M hat üblicherweise die Dimension „mV“, die Speisespannung U_B die Dimension „V“ und die Dehnung ε die Dimension „ $\mu\text{m}/\text{m}$ “. Aus diesem Grund hat eine Umrechnung der Einheiten mit dem Faktor 1000 zu erfolgen. Der Subtrahend ε_{th} ergibt sich aus der Temperaturdehnung des Dehnungsmessstreifens, die bei der Herstellung einer Vollbrücke aus der Ergänzung einer Viertelbrücke nicht kompensiert werden kann. Das grundlegende Kompensationsprinzip der Wheatstoneschen Brückenschaltung beruht darauf, dass gleichsinnige Dehnungsänderungen, die auf benachbarten Brückenarmen liegen, sich mit einem entgegengesetzten Vorzeichen vollständig kompensieren (siehe Gleichung (3.4)) [24]. Hierfür ist jedoch die Applikation von mindestens zwei Dehnungsmessstreifen, folglich die Herstellung einer Halbbrücke notwendig. Die Fachstelle Brückenmessung führt dementsprechend eine andere Vorgehensweise zur Eliminierung des Temperatureinflusses durch. Der durch den Subtrahenden ε_{th} entstehende Offset wird vor Beginn der Messung initial „genullt“, sodass dieser unberücksichtigt bleibt. Die Vorgehensweise wird damit begründet, dass die Temperatur sich relativ träge verhält und dadurch die Messung nicht weiter beeinflusst, da bei einem unbekanntem Spannungszustand nur die Spannung in Längsrichtung des DMS gemessen wird.

3.1.2 Kabel und Sechsheitertechnik

Insbesondere bei Messungen, bei denen eine hohe Genauigkeit erforderlich ist, spielt die Qualität des Messkabels zwischen dem applizierten Dehnungsmessstreifen und dem nachgeschalteten Verstärker eine entscheidende Rolle. Die grundlegende Aufgabe des Messkabels besteht zum einen darin, den Dehnungsmessstreifen durch Zufuhr einer Brückenspeisespannung U_B zu versorgen und zum anderen die am Brückenausgang anliegende Brückenmessspannung U_M zum Verstärker zu transportieren [23]. Auf diesen beiden Transportwegen kann die Nichtbeachtung einiger grundlegender Regeln stärkere Messfehler mit sich bringen. Die größte Fehlerquelle liegt im Transport der Speise- und Messspannung, welche nicht verlustfrei erfolgen kann. Das Messsignal, das von einer Brückenschaltung erzeugt wird, wird üblicherweise als Verhältnis der Brückenausgangsspannung U_M zur Brückenspeisespannung U_B dargestellt (siehe Gleichung (3.4)). Hier ist zu berücksichtigen, dass die Brückenspeisespannung U_B , die von der Speisespannungsquelle geliefert wird, nur vermindert die Brückenschaltung erreicht und die Brückenausgangsspannung U_M nicht in voller Höhe am Eingang des Messverstärkers anliegt. Dies wird unter anderem bei zunehmender Länge durch den Ohmschen Widerstand des Kabels beeinflusst [23], weshalb die Fachstelle Brückenmessung ausschließlich hochohmige Kabel zur Verminderung des Spannungsabfalls verwendet. Dieser Spannungsabfall hat zur Folge, dass falsche Dehnungen suggeriert werden [23].

Zur weiteren Kompensation der Spannungsabfälle in der Brückenspeise- und Brückenausgangsleitung findet die sog. Sechsheitertechnik Anwendung (siehe Abbildung 3.5). Das Prinzip dieser Schaltung kann [23] entnommen werden und wird nachfolgend beschrieben. Die Erfassung der Speisespannung U_B erfolgt über Fühlerleitungen, welche zum Messgerät mit der Speisespannungsquelle zurückgeführt werden. Im Anschluss findet ein Vergleich der rückgeführten Spannung mit der Sollspannung statt. Dazu wird die rückgeführte Spannung mittels eines Spannungsfolgers einer Vergleicherschaltung zugeführt. Der Speisespannungsgenerator wird so lange korrigiert, bis die am Aufnehmer anliegende Speisespannung der Sollspannung entspricht. Der sich zwischen der vom Speisespannungsgenerator erzeugten und der am Aufnehmer anliegenden Speisespannung ergebene Unterschied im Spannungsniveau ist mit dem Spannungsabfall in den Speiseleitungen gleichzusetzen. Durch diese Vorgehensweise fließen auch Widerstandsänderungen in den Speiseleitungen und im Aufnehmer ein, die durch Temperaturänderungen verursacht werden.

Darüber hinaus beeinflussen andere elektrische Felder, wie sie durch das Mobilfunknetz oder die Oberleitungen bzw. generell Stromleitungen entstehen, die Spannungen in der Messtechnik und erzeugen so einen Fehler. Diese Fehler aus diversen Störquellen werden durch die jeweils unterschiedlichen Vorzeichen eliminiert.

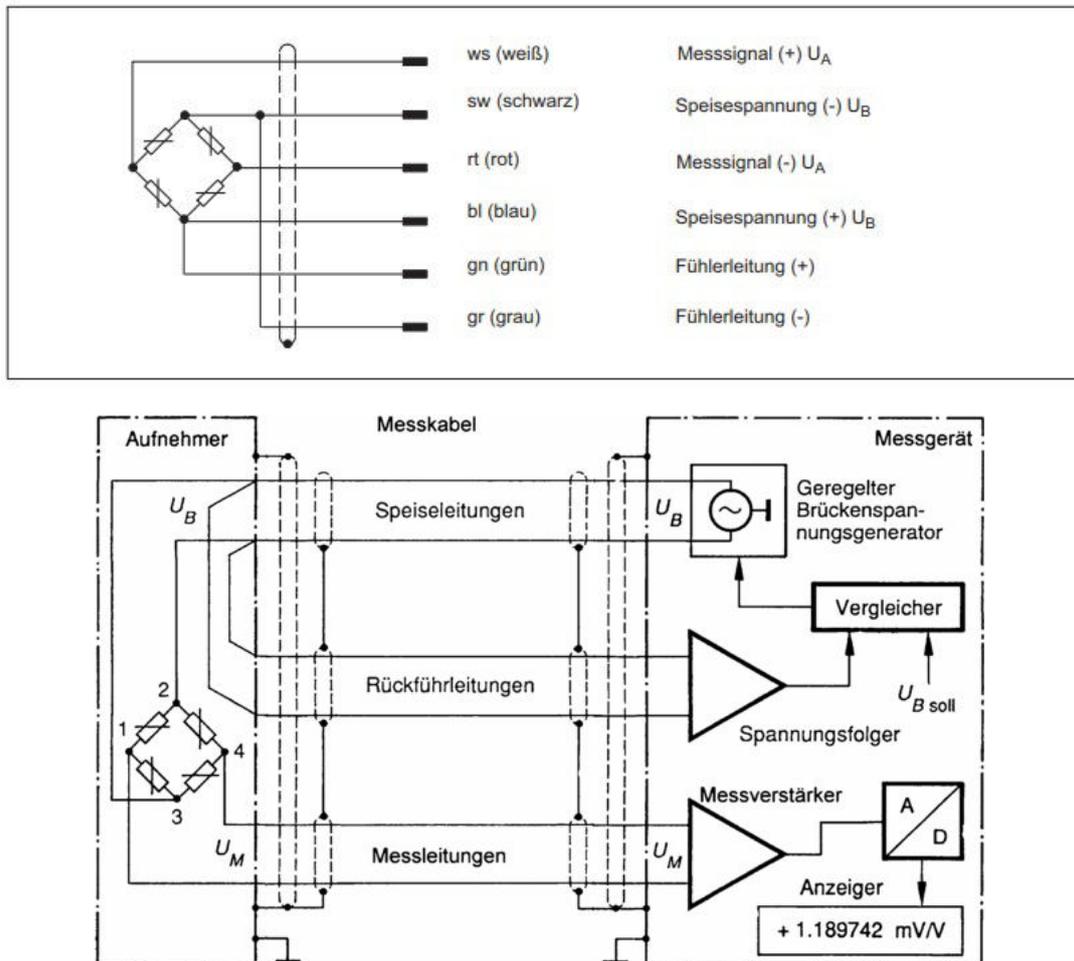


Abbildung 3.5: Darstellung der Sechseleitertechnik - entnommen aus [23] und [24]

3.1.3 Verstärker

Im Folgenden wird der klassische Aufbau eines Messverstärkers, wie er von der Fachstelle Brückenmessung zur messtechnischen Untersuchung verwendet wird, beschrieben. Zunächst lässt sich feststellen, dass der Verstärker kein Verstärker im klassischen Sinne ist, sondern neben der reinen Verstärkung des Messsignals zusätzliche Funktionen in der Signalverarbeitung übernimmt. Die Grundaufgabe des Verstärkers ist, dass zunächst im Millivoltbereich vorliegende Messsignal zur weiteren Verarbeitung auf den Voltbereich zu verstärken [23]. Da die Brückenschaltung der Dehnungsmessstreifen ein analoges Signal abgeben, muss der Messverstärker in der Lage sein

dieses verarbeiten zu können. Nach der Verstärkung des Messsignals erfolgt die Anwendung eines Tiefpassfilters (hierzu mehr in den Abschnitten 3.3.3 und 4.4.1), welcher zum Ausfiltern höherer überlagerter Messfrequenzen aus dem Messsignal dient [23]. Bei der Verwendung des Tiefpassfilters ist die Grenzfrequenz des Filters aus der Messfrequenz zu bestimmen, um das Abtasttheorem (siehe Abschnitt 3.3.2) nicht zu verletzen. Abschließend erfolgt die Anwendung eines Analog-Digital-Wandlers, welcher das analog vorliegende Messsignal in ein digitales Signal umwandelt, um es digital anzuzeigen und anschließend mit geeigneter Software bspw. am Computer weiterverarbeiten zu können [23].

3.2 Ablauf der Messungen – Datengewinnung

In diesem Abschnitt wird der Ablauf der Messdatenerzeugung exemplarisch beschrieben. Die Messdaten wurden im Vorfeld von der DB erzeugt und den Verfassern der vorliegenden Arbeit zur Verfügung gestellt. Eine eigenständige Messung wurde seitens der Verfasser nicht durchgeführt.

3.2.1 Vorbetrachtungen

Aufgrund des negativen Einflusses von Feuchtigkeit führt die DB Brückenmessungen mit Hilfe von DMS vorzugsweise in den Monaten März bis Oktober durch. Beim Applizieren der DMS muss der Einschluss von Feuchtigkeit vermieden werden, um einen guten Haftverbund zwischen diesem und der Stahloberfläche zu gewährleisten. Unter optimalen Bedingungen werden die Verformungen des Stahls vollständig auf die DMS übertragen, wobei diese präzise in Form von Dehnungen erfasst werden.

3.2.2 Versuchsaufbau

In diesem Kapitel erfolgt eine detaillierte Beschreibung des Versuchsaufbaus sowie die Erläuterung der einzelnen Arbeitsschritte. Im Zuge dessen wird auf die Versuchsvorbereitung und die Anordnung der messtechnischen Komponenten eingegangen.

Bestimmung der Messpunkte

Im ersten Schritt ist zu bestimmen, an welchen Punkten eine Messung erfolgen soll. Das Ziel der Messungen besteht in der Erfassung der maximalen Dehnungen. Aufgrund der Kosten der Messtechnik, des Arbeitsaufwands sowie der Datenmengen wird die Anzahl der benötigten Messpunkte auf das notwendige Minimum beschränkt.

Die zu untersuchenden stählernen Eisenbahnbrücken bestehen meist aus I-Profilen. In einer Querschnittsebene sind je nach Zugänglichkeit an drei bis vier Stellen DMS befestigt. Es werden jeweils zwei an den äußeren Kanten des Ober- und Untergurts des Trägers platziert, da dort die größten Randspannungen auftreten. Bei geschlossenen Fahrbahnen erfolgt die Installation eines DMS am Steg anstelle der beiden am Obergurt angebrachten DMS. Hiermit kann durch Extrapolation lediglich eine Näherungslösung für die Spannungen am Obergurt erzielt werden.

Applikation der DMS

Zunächst ist der Korrosionsschutz lokal vom Stahl abzuschleifen. Zudem muss die bearbeitete Stelle eine möglichst plane Oberfläche aufweisen, um eine Vordeformation der DMS zu vermeiden. Anschließend erfolgt das Aufbringen der Dehnungsmessstreifen. Die Fachstelle Brückenmessung (I.IAI 32) verwendet zur messtechnischen Untersuchung oftmals die in Abbildung 3.2 dargestellten DMS, da diese durch ihre Abdichtung mittels Epoxidharz weniger anfällig für Umwelteinflüsse wie Feuchtigkeit sind.

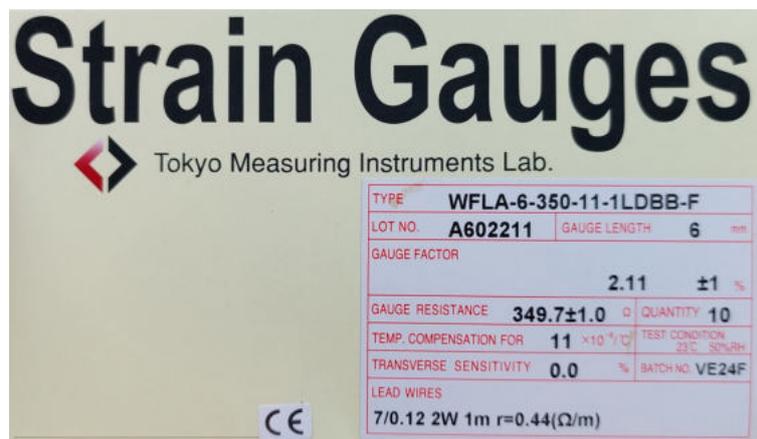


Abbildung 3.6: Herstellerangaben der verwendeten Dehnungsmessstreifen

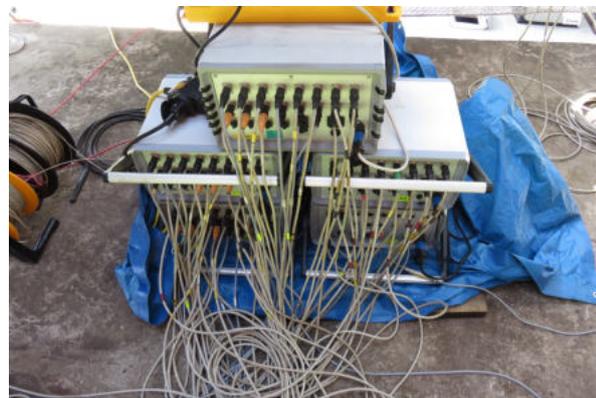
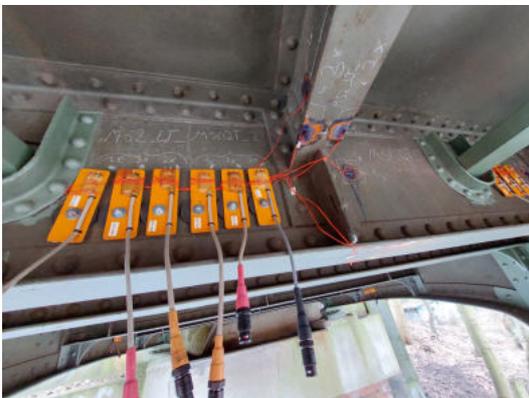
In der Abbildung 3.6 sind die technischen Spezifikationen der verwendeten DMS des Herstellers Tokyo Measuring Instruments Lab. zu finden. Der k -Faktor beträgt 2,11. Zur Reduzierung von Messfehlern ist der Temperatureausdehnungskoeffizient der DMS α_T dem des Stahls sehr ähnlich und beträgt $1,1 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Der angegebene Widerstand von 350Ω leitet sich aus dem benötigten Messbereich ab. Dieser Messbereich für die Dehnungen kann über das Hook'sche Gesetz bestimmt werden. Gemäß Normung beträgt der E-Modul des Stahls 210.000 N/mm^2 . Die zu messenden Stahlspannungen liegen in der Größenordnung von 10^2 N/mm^2 . Unter Berücksichtigung eines möglichen Offsets ist die Größenordnung von 10^3 N/mm^2 notwendig.

Damit ergibt sich der Messbereich der DMS zu:

$$\varepsilon_{\text{obs}} = \frac{\sigma}{E} = \frac{10^3 \text{ N/mm}^2}{210.000 \text{ N/mm}^2} \approx \pm 5000 \cdot 10^{-6} \text{ m/m} = \pm 5000 \text{ } \mu\text{m/m}$$

Herstellen der Messkette

Der Sensor, im vorliegenden Fall ein DMS, ist in der Lage Dehnungen in Form von Widerstandsänderungen zu erfassen und bildet somit den Anfang der Messkette. Der auf dem Stahl applizierte DMS wird innerhalb der Wheatstoneschen Brückenschaltung mit Festwiderständen verkabelt und dadurch zur Vollbrücke ergänzt (siehe Abbildung 3.7a). Mit Hilfe von Magneten werden die drei Festwiderstände am Stahlträger befestigt. Die geringe Erhöhung des Eigengewichts kann vernachlässigt werden. Von den DMS in Verbindung mit jeweils einer Kompensation führt je ein Kabel mit Sechsheitertechnik in einen Verstärker (Abbildung 3.7b). Dort erfolgt neben der Verstärkung des Signals auch eine Filterung sowie die Analog-Digital-Umwandlung. Der Verstärker wird extern mit einer Netzspannung von 230 V versorgt. Das Verstärkersignal wird anschließend über ein optisches Kabel in einen Computer gespeist. Auf diese Weise können die gewonnenen Messdaten in Form von Dehnungen abgerufen werden.



(a) Herstellung einer Vollbrücke aus DMS und Festwiderständen (b) Darstellung der Kabel mit Sechsheitertechnik und des Verstärkers

Abbildung 3.7: Installation der Messtechnik

3.2.3 Versuchsdurchführung

Die Versuche werden mit einer möglichst schweren Lokomotive durchgeführt, welche auch signifikante Beanspruchungen in der Brücke durch ihr Eigengewicht verursacht. Von entscheidender Bedeutung ist dabei, dass die zu messenden Beanspruchungen

in einer Größenordnung liegen, die nicht im Rauschen des Messsignals verschwinden.

Die Lokomotive wird manuell bei einer im Vorfeld definierten Geschwindigkeit möglichst konstant über das zu messende Brückenbauwerk gefahren. Um die Beschleunigungs- oder Bremsseffekte gering zu halten, ist eine konstante Geschwindigkeit die Voraussetzung. Mittels Lichtschranken werden die Achsen der Lok zeitlich bei der Auf- und Abfahrt von der Brücke erfasst. Damit wird indirekt die reale Geschwindigkeit der Lok während des jeweiligen Versuchs überwacht. Zur Simulation der statischen Belastung wird stets eine Versuchsreihe von Überfahrten mit der Geschwindigkeit $v = 10 \text{ km/h}$ durchgeführt. Die resultierenden Beanspruchungen können als quasi-statisch angesehen werden. Niedrigere Geschwindigkeiten lassen sich aus technischer Sicht nicht umsetzen. Alle weiteren Überfahrten erfolgen bei höheren Fahrgeschwindigkeiten.

Infolge der Überfahrt treten Verformungen an der Brücke auf, welche sich über die Verbundwirkung auch auf die DMS übertragen. Es entsteht ein Signal mit einer elektrischen Spannungsänderung, welches die gesamte Messkette durchläuft und in einem Computer in Form von Dehnungen ausgegeben wird.

3.3 Datenaufbereitung während der Messung

3.3.1 Abtastung des analogen Signals

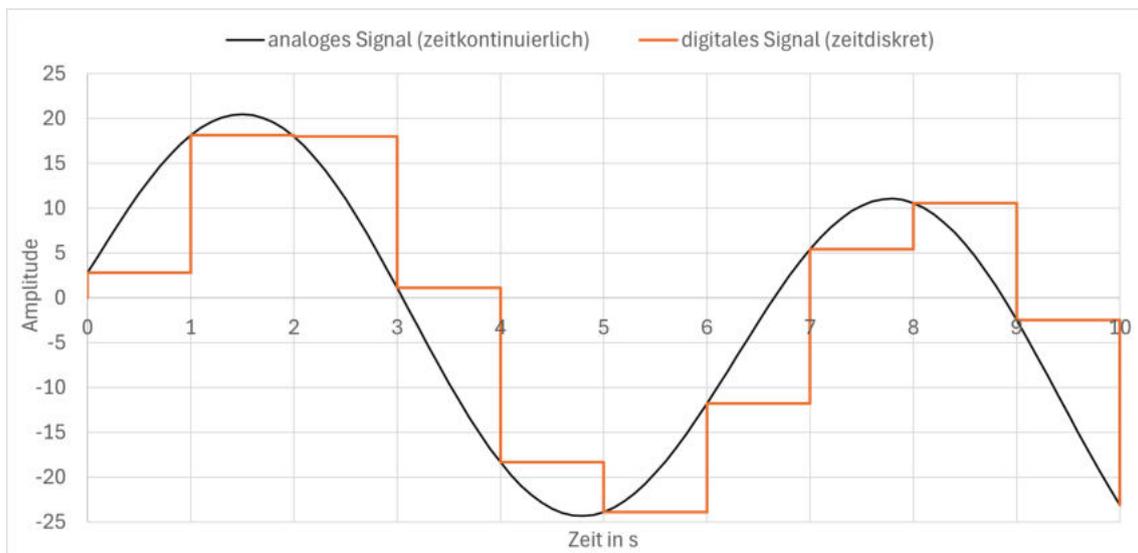


Abbildung 3.8: Vergleich analoges und digitales Signal

Innerhalb der Messkette hat der Verstärker die Aufgabe das analoge Signal in ein digitales Signal umzuwandeln und im Zuge dessen zu filtern. Das analoge Signal lässt sich als kontinuierlich beschreiben, d. h. es liegt zu jedem Zeitpunkt ein Messwert vor [25]. In Abbildung 3.8 ist beispielhaft ein analoges Signal als schwarze Kurve dargestellt. Die Abtastung des vorliegenden, zu messenden Signals wird in definierten Zeitschritten durchgeführt. Erfolgt eine Abtastung in äquidistanten Zeitschritten (= Zeitpunkte mit konstantem Abstand untereinander), so entsteht ein zeitdiskretes Signal [26]. Exemplarisch ist ein abgetastetes Signal (orange) in Abbildung 3.8 gezeigt, wo mit einem zeitlichen Abstand von je einer Sekunde ein Messwert erfasst wird. Hierbei wird die Bedeutung der Zeitschritte der Abtastung für die Genauigkeit der Messwerte bereits ersichtlich.

3.3.2 Bestimmung der Abtastrate

Die zeitlichen Abstände der Abtastung werden über die sogenannte Abtastrate, auch als Abtastfrequenz bezeichnet, festgelegt. Es besteht eine indirekte Proportionalität zwischen den zeitlichen Abständen der Abtastung t_A und der Abtastrate f_A :

$$f_A = \frac{1}{t_A \text{ [s]}} \quad \text{[Hz]} \quad (3.7)$$

Abtasttheorem und Aliasing

Die Festlegung einer geeigneten Abtastrate beruht auf dem Abtasttheorem von SHANNON, welches auch unter dem Nyquist-Theorem bekannt ist. Es besagt, dass die Abtastfrequenz f_A mindestens doppelt so hoch sein muss, wie die zu messende, größtmögliche Signalfrequenz f_S , um diese fehlerfrei rekonstruieren zu können [25].

$$f_A \stackrel{!}{>} 2f_S \quad (3.8)$$

Aliasing tritt bei Verletzung des Abtasttheorems auf und beschreibt die Überlappung benachbarter Frequenzbänder. In Folge der Unterabtastung werden falsche Signale und Frequenzen gewonnen. Der Effekt des Aliasings kann durch eine ausreichend hohe Abtastrate in Kombination mit einem Anti-Aliasing-Filter (Tiefpassfilter) verhindert werden. [27]

Zuverlässige Abtastrate

Beide Grenzfälle des Abtasttheorems werden in der Abbildung 3.9 dargestellt. Es zeigt sich, dass eine Abtastfrequenz, die der doppelten Signalfrequenz entspricht,

nicht ausreichend ist. Dies lässt sich anhand der Variante a aus der Abbildung 3.9 verdeutlichen, bei der lediglich die Nullstellen abgetastet werden, was den ungünstigsten Fall darstellt. Eine korrekte Rekonstruktion des analogen Signals kann in diesem Fall nicht erfolgen. Aus diesem Grund fordert das Abtasttheorem, dass die Abtastfrequenz f_A größer als die zweifache Signalfrequenz f_S ist. Variante b hingegen stellt den günstigsten Fall dar: Durch Beginn der Abtastung mit einem Offset von einer Sekunde werden die Extrema der Schwingung getroffen. Aufgrund des in der Regel unbekanntem Offsets findet dieser Fall jedoch keine praktische Anwendung.

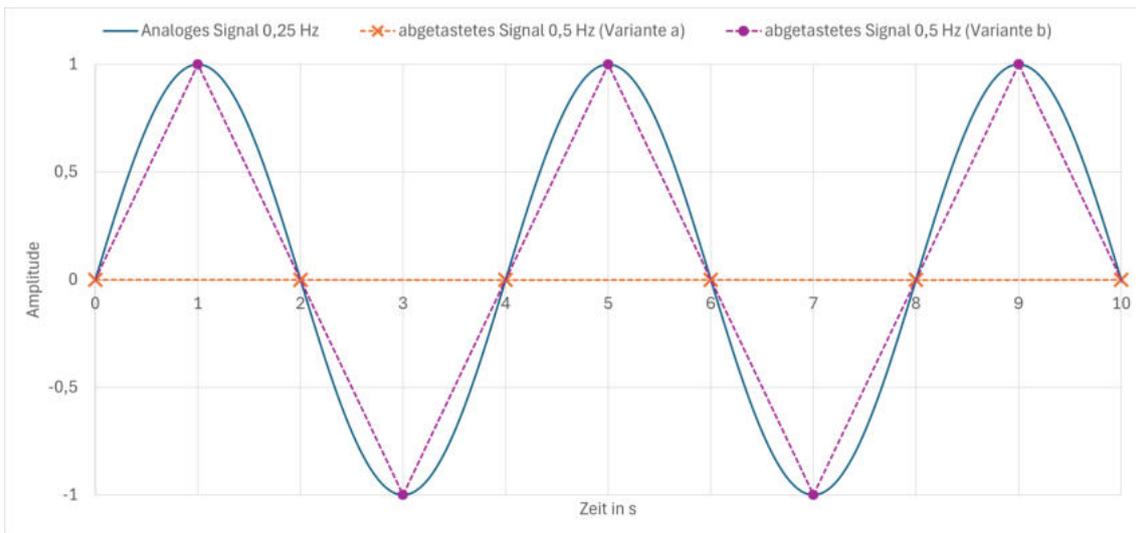


Abbildung 3.9: Abtastung eines analogen Signals mit der doppelten Signalfrequenz – Grenzfall des Abtasttheorems

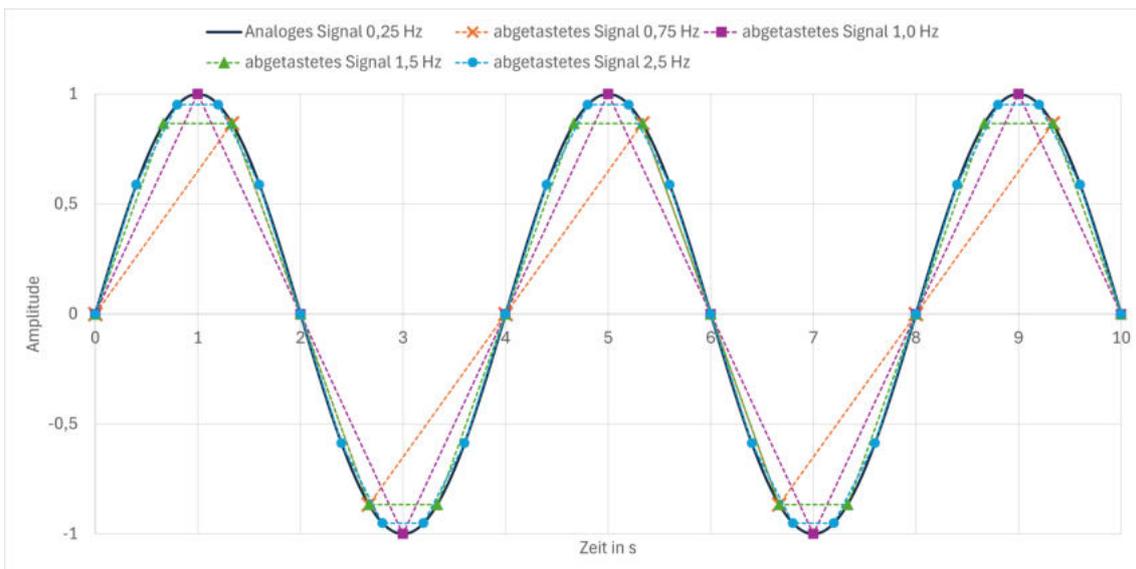


Abbildung 3.10: Abtastung eines analogen Signals mit verschiedener x-facher Signalfrequenz

Wird nun mit der dreifachen (0,75 Hz), vierfachen (1,0 Hz) oder sechsfachen (1,5 Hz) Signalfrequenz abgetastet, wie in Abbildung 3.10 dargestellt, können bereits gute Ergebnisse erzielt werden. Dennoch ergibt sich zum Teil eine signifikante Unterschreitung der Amplituden. Die Abtastung mit der zehnfachen Signalfrequenz (2,5 Hz) stellt bereits eine sehr gute Rekonstruktion des analogen Ausgangssignals dar (siehe Abbildung 3.10). Demnach kann geschlussfolgert werden, dass eine höhere Abtastrate hinsichtlich der Signalfrequenz präzisere Ergebnisse erzielt. In Anbetracht der hohen Datenmengen bei hohen Abtastraten muss ein Kompromiss gefunden werden.

Übertragung auf die vorliegenden Brücken

Zu Beginn sind Überlegungen zum Frequenzspektrum des vorliegenden Problems anzustellen. In Konsequenz des Abtasttheorems ist dann eine Abtastrate von mindestens der doppelten Frequenz erforderlich. Zur Verhinderung von Aliasing muss eine entsprechend hohe Grenzfrequenz des Filters festgelegt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Filter einen gewissen Übergangsbereich hat. Die Fachstelle Brückenmessung wählt die Abtastrate deswegen problemspezifisch, um eine ausreichend hohe Genauigkeit zu erreichen. Im vorliegenden Fall wurden die vier Brücken mit 300 Hz bzw. 1200 Hz abgetastet. Die Festlegung der Abtastrate hängt bspw. von der Fahrgeschwindigkeit der Belastungslok und von der Art der Fahrbahn (geschlossene Fahrbahn mit Schotterbett oder offene Fahrbahn mit direkter Befestigung der Gleise) ab. Des Weiteren ist der Aspekt der Leistungsfähigkeit der Messtechnik zu berücksichtigen. Infolgedessen muss die Wahl der Abtastrate stets als ein Kompromiss zwischen den Anforderungen und den technischen Möglichkeiten betrachtet werden.

3.3.3 Filterung des digitalen Signals

Das Signal muss nach der Abtastung auf die noch rekonstruierbaren, gemessenen Frequenzen beschränkt werden, damit das Abtasttheorem eingehalten ist. In Konsequenz ist das digitale Signal mit einem Anti-Aliasing-Filter zu filtern. Der Anti-Aliasing-Filter entspricht einem Tiefpassfilter, dessen Ziel es ist, das Frequenzspektrum des analogen Signals zu begrenzen [27]. Bei einer gewählten Abtastfrequenz von 300 Hz bzw. 1200 Hz beträgt die Grenzfrequenz des erforderlichen Tiefpassfilters:

$$f_{\text{Tpf},300} = \frac{1}{6} \cdot f_A = \frac{1}{6} \cdot 300 \text{ Hz} = 50 \text{ Hz}$$
$$f_{\text{Tpf},1200} = \frac{1}{6} \cdot f_A = \frac{1}{6} \cdot 1200 \text{ Hz} = 200 \text{ Hz}$$

Der Tiefpassfilter bewirkt, dass hohe Frequenzanteile aus dem Signal gefiltert werden und die tiefen Frequenzen den Filter „passieren“ [28]. An dieser Stelle wird auf eine weitere Filterung verzichtet, um eine Verfälschung des Rohsignals zu vermeiden. Die Aufbereitung der Messdaten erfolgt im Nachgang und wird in Abschnitt 4.4.1 behandelt. Zudem werden hier verschiedene Filter näher erläutert.

3.3.4 Rekonstruktion des ursprünglichen (analogen) Signals

Von einer Rekonstruktion eines Signals wird gesprochen, wenn die abgetasteten Datenpunkte durch eine Kurve miteinander verbunden werden. Die einfachste Rekonstruktion erfolgt durch eine lineare Verbindung der einzelnen Datenpunkte. Die Voraussetzung von mindestens zwei Datenpunkten je Periodendauer des ursprünglichen Signals T_S ist stets erfüllt, sodass die lineare Rekonstruktion immer anwendbar ist.

Des Weiteren kann eine Rekonstruktion über ein Polynom erfolgen. Der Grad des Polynoms wird durch die Anzahl der abgetasteten Datenpunkte je Periodendauer T_S um eins vermindert. Erfolgen bspw. fünf Abtastungen innerhalb einer Periodendauer, so kann der Grad der polynomischen Funktion maximal x^4 betragen.

Als Alternative zu den bisher genannten Verfahren wird zunehmend die Spline-Interpolation verwendet. Diese erfolgt abschnittsweise mit Polynomen niedrigen Grades und führt daher zu einer präzisen Rekonstruktion.

3.3.5 Zusammenfassung der Parameter

Zusammenfassend werden in der Tabelle 3.2 alle relevanten Kenngrößen zur Abtastung und Datenverarbeitung für die vier untersuchten Brücken aufgelistet.

Tabelle 3.2: Zusammenstellung der Kenngrößen der digitalen Signalerzeugung und -verarbeitung der untersuchten Brücken

Bauwerk	max. zu erfassende Frequenz f_s	Abtast-rate f_A	zeitl. Abstände der Abtastung t_A	Grenzfrequenz Tiefpassfilter f_{Tpf}
Brücke 1	50 Hz	300 Hz	0,00333 s	50 Hz
Brücke 2	200 Hz	1200 Hz	0,00083 s	200 Hz
Brücke 3	50 Hz	300 Hz	0,00333 s	50 Hz
Brücke 4	50 Hz	300 Hz	0,00333 s	50 Hz

4 Grundlagen der messwertgestützten Auswertung

4.1 Einführung

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen und theoretischen Aspekte der messwertbasierten Auswertung behandelt. Im Weiteren erfolgt eine Beschreibung der verwendeten Verfahren und Abläufe. Die hier in allgemeiner Form beschriebene Vorgehensweise gilt für die Auswertung der Messdaten, welche im Abschnitt 5 durchgeführt wird.

Den Verfassern dieser Arbeit wurde seitens der DB eine Anleitung zur Auswertung sowie eine Beispielauswertung zur Verfügung gestellt.

4.2 Ermittlung und Prüfung der Fahrgeschwindigkeit

Im Vorfeld der eigentlichen Auswertung ist es erforderlich, die tatsächliche Fahrgeschwindigkeit zu berechnen. Aus technischen Gründen ist eine konstante Überfahrt oft nicht möglich, sofern die Lokomotive nicht mit einem Tempomat ausgestattet ist. In der Konsequenz ist die Beständigkeit der Geschwindigkeit vom Lokführer abhängig. Des Weiteren können Überfahrten aus diversen anderen Gründen in ihrer ordnungsgemäßen Durchführung beeinträchtigt werden, wie bspw. durch einen Nothalt. Infolgedessen sind die Messwerte für die Auswertung nicht verwertbar. Die Prüfung der Fahrgeschwindigkeit dient daher der Auswahl geeigneter Messreihen für die nachfolgende Auswertung.

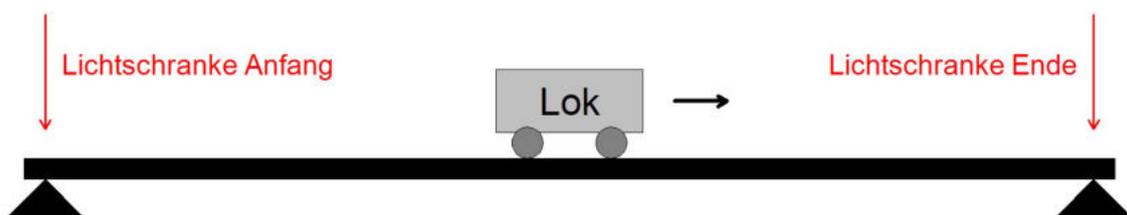


Abbildung 4.1: Position der Lichtschranken während der Messfahrten als schematische Darstellung

Die Lichtschranken am Anfang und am Ende der Brücke (siehe Abbildung 4.1) liefern die Daten, zu welchem Zeitpunkt (t_i) die einzelnen Achsen der Lokomotive auf das

Brückenbauwerk fahren bzw. dieses wieder verlassen. Zudem sind die Achsabstände der Lokomotive (s_i) aus dem jeweiligen Versuch bekannt, sodass eine Geschwindigkeit bei der Auffahrt (v_A) sowie bei der Abfahrt (v_B) berechnet werden kann.

Es gilt:

$$v_A = \frac{s}{\Delta t_A} = \frac{s}{t_{2,A} - t_{1,A}} \quad \text{sowie} \quad v_E = \frac{s}{\Delta t_E} = \frac{s}{t_{2,E} - t_{1,E}} \quad (4.1)$$

Die Abbildung 4.2 veranschaulicht die Ermittlung der Fahrgeschwindigkeit in einer skizzenhaften Darstellung. Im linken Teil der Grafik erfasst die Lichtschranke zum Zeitpunkt t_1 die erste Achse. Im weiteren Verlauf der Fahrt durchquert dann die zweite Achse zum Zeitpunkt t_2 die Lichtschranke. Daraus lässt sich die benötigte Dauer Δt ableiten, innerhalb derer beide Achsen mit einem definierten Achsabstand s die Lichtschranke passieren. Die Geschwindigkeit an der jeweiligen Lichtschranke lässt sich nun durch den Quotienten aus Weg und Änderung der Zeit bestimmen.

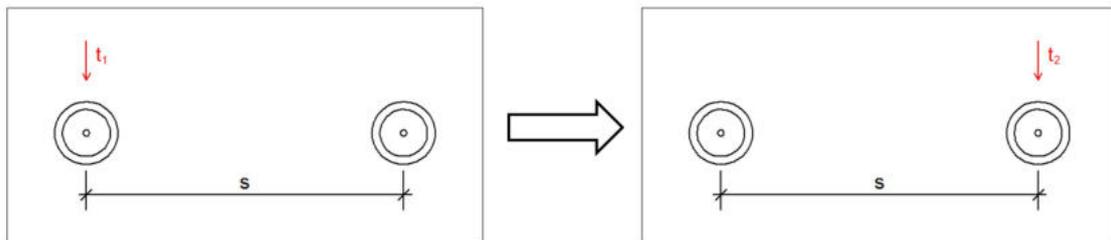


Abbildung 4.2: Ermittlung der Fahrgeschwindigkeit mittels Lichtschranken

Die Lichtschranken liefern zwei Geschwindigkeiten v_1 und v_2 am Anfang und am Ende des Brückenbauwerks. Diese Geschwindigkeiten werden in Excel analysiert. Zunächst wird der Mittelwert \bar{v} der Geschwindigkeit jeder Überfahrt mit der folgenden Gleichung gebildet:

$$\bar{v} = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (4.2)$$

mit:

- v_1 – Geschwindigkeit der Lok an Lichtschranke 1
- v_2 – Geschwindigkeit der Lok an Lichtschranke 2

Die Geschwindigkeitsänderung Δv ermittelt sich folgendermaßen :

$$\Delta v = v_2 - v_1 \quad (4.3)$$

Abschließend wird ein relativer Fehler f in Prozent berechnet:

$$f = \frac{\Delta v}{\bar{v}} \cdot 100 \quad (4.4)$$

Die Beurteilung der Qualität der Messwerte erfolgt zum einen anhand der Geschwindigkeitsänderung Δv , die bestenfalls ~ 1 km/h nicht überschreiten sollte, und zum anderen durch den relativen Fehler, der nicht mehr als ~ 5 % betragen sollte. Aufgrund der geringen Geschwindigkeit von $v = 10$ km/h bei der quasi-statischen Überfahrt resultieren häufig höhere relative Fehler, sodass hier der Grenzwert auf ~ 15 % gesetzt wird. Die Überschreitung der zuvor genannten Parameter hat den Entfall der jeweiligen Messfahrten zur Folge. Die Nichtberücksichtigung mehrerer Messfahrten einer Messreihe muss stets unter Beachtung einer späteren statistischen Auswertung erfolgen, für welche mindestens vier Messfahrten erforderlich sind.

Im Zuge dessen ist zusätzlich zu prüfen, dass die Geschwindigkeit der gesamten Messreihe nur geringen Schwankungen unterliegt. Anderenfalls sind einzelne Messfahrten aus der Auswertung auszuschließen oder eine neue Geschwindigkeitsgruppe zu definieren.

4.3 Ermittlung der Dehnungen aus dem Messsignal

Die Dehnungsermittlung erfolgt durch den Einsatz von Dehnungsmessstreifen. Diese ändern bei Verformung ihren elektrischen Widerstand. Die Theorie sowie die Anwendung der Dehnungsmessstreifen wurden in Kapitel 3.1.1 ausführlich erläutert. Die Dehnungsermittlung erfolgt unter Anwendung einer in einer Wheatstoneschen Brückenschaltung zur Vollbrücke ergänzten Viertelbrücke nach Gleichung (3.6)

$$\varepsilon_1 = \varepsilon = \frac{4}{k} \cdot \frac{U_M}{U_B} \cdot 1000 - \varepsilon_{\text{th}},$$

wobei die thermische Dehnung durch einen initialen Nullabgleich aus dem Messsignal eliminiert wurde.

4.4 Ermittlung der Spannungen

4.4.1 Aufbereitung der Messdaten

Zunächst ist die Aufbereitung der Messdaten erforderlich, bevor diese weiterverarbeitet und ausgewertet werden können. Nachfolgend werden die möglichen Arbeits-

schritte der digitalen Signalverarbeitung innerhalb einer Software beschrieben.

Nullabgleich

Die Durchführung eines Nullabgleichs bildet den ersten Bearbeitungsschritt. Im Zuge dessen wird aus einer definierten Anzahl der ersten oder letzten Datenpunkte, die näherungsweise null sind, der Mittelwert gebildet. Dieser Mittelwert wird anschließend von sämtlichen Datenpunkten abgezogen. Dadurch wird ein etwaiger Offset aus den Messdaten beseitigt.

Filtertechnik

Die Aufgabe von Filtern besteht darin, ungewünschte Signalanteile (Störsignale) herauszufiltern. Das Ziel dabei ist es bspw. Messrauschen zu unterdrücken oder ungewünschte Eigenfrequenzen des Messensors zu eliminieren. [28] Die Funktionsweise der klassischen Filter ist in Abbildung 4.3 dargestellt.

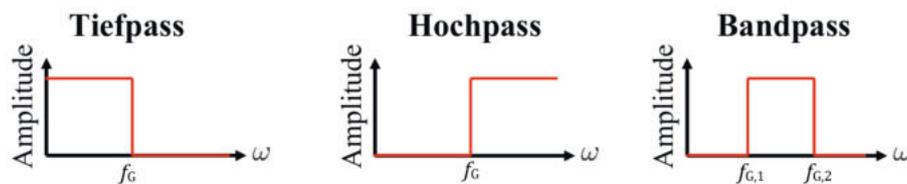


Abbildung 4.3: Ideale Darstellung der klassischen Filter – entnommen aus [29]

Der Tiefpassfilter erlaubt die tiefen Frequenzanteile, diese dürfen „passieren“. Die hohen Frequenzen werden unterdrückt. [28] Der Tiefpassfilter kommt zur Anwendung um den Aliasing-Effekt zu unterbinden, indem alle hohen Frequenzen, die das Abtasttheorem verletzen herausgefiltert werden. Zusätzlich dazu kann mithilfe des Filters hochfrequentes Messrauschen eliminiert werden. In Anbetracht der genannten Funktionen wird der Tiefpassfilter in der späteren Auswertung verwendet.

Analog dazu lässt der Hochpassfilter die hohen Frequenzanteile „passieren“, während die tiefen Frequenzen aus dem Signal herausgefiltert werden. Ein Bandpassfilter stellt eine Kombination aus einem Hoch- und Tiefpassfilter dar. Dieser lässt nur einen bestimmten Frequenzbereich zu, während alle Frequenzen außerhalb dieses Bereichs ausgeschlossen werden. [28] Die Abgrenzung der durchzulassenden und herauszufilternden Frequenzen erfolgt dabei durch die Definition einer Grenzfrequenz f_G .

Interpolation

Die Generierung einer hohen Anzahl von Datenpunkten und entsprechend großer Datenmengen durch hohe Abtastraten erfordert eine Reduktion der Datenpunkte

auf weniger Stützstellen. Dies kann durch den Einsatz verschiedener Interpolationsmethoden erreicht werden. Die Interpolation sollte dabei nur so grob gewählt werden, dass keine Informationen aus dem Messsignal verloren gehen. Die Interpolation kommt lediglich zur Anwendung, wenn dies der konkrete Fall erfordert.

Gleitendes Mittel

Das gleitende Mittel wird zur Glättung des Messsignals angewendet. Unter Angabe einer Anzahl von Datenpunkten wird von diesen der Mittelwert gebildet. Die gemittelten Datenpunkte bilden anschließend eine neue Messkurve. In diesem Zusammenhang ist darauf zu achten, dass durch den Vorgang des Glättens keine Informationen verloren gehen dürfen und folglich das Messsignal verfälscht wird. Die Anwendung des gleitenden Mittels dient der Reduzierung der Oszillation des Messsignals, welche durch Messrauschen verursacht wird. Je nach Qualität des Messsignals wird bei Bedarf das gleitende Mittel eingesetzt.

4.4.2 Umrechnung der Dehnungen in Spannungen

Nach der Aufbereitung der gemessenen Dehnungen müssen diese in Spannungen umgerechnet werden. Unter Zuhilfenahme des Hook'schen Gesetzes ergeben sich die Normalspannungen der einzelnen DMS gemäß folgender Gleichung:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \tag{4.5}$$

mit:

$$E = 210.000 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Elastizitätsmodul nach Ril 805.0103, Tabelle 1})$$

Die Auswertung der Rosetten ist nicht Bestandteil dieser Arbeit und wird daher nicht näher erläutert.

4.5 Statistische Bewertung der Messdaten

Die generierten Messdaten sind im Sinne der Statistik als Stichproben zu betrachten, da sie zwar repräsentativ sind, jedoch lediglich einen Ausschnitt der Grundgesamtheit darstellen (vgl. [30]). Dementsprechend sind die erfassten Messdaten mit gewissen Ungenauigkeiten behaftet. Diese ergeben sich zum einen aus den nicht exakt reproduzierbaren sowie nicht konstanten Umgebungsbedingungen, die durch Wettereinflüsse, elektrische Störfelder etc. bedingt sind, und zum anderen aus dem

Variieren der Fahrgeschwindigkeit der Belastungslök. Das Ergebnis wird folglich aus dem Messwert \pm Unsicherheit gebildet.

Zur statistischen Einordnung der Messwerte wird aufgrund der geringen Größe der Stichproben die Student-(t)-Verteilung herangezogen (vgl. [30]). Bereits ab vier Stichproben kann hiermit eine aussagekräftige, statistische Bewertung erzielt werden. Die Annahme eines symmetrisch verteilten Vertrauensintervalls um den Mittelwert lässt sich durch die Übereinstimmung des Mittelwerts mit dem Median überprüfen. Das Niveau des Vertrauensbereichs soll bei 98 % liegen, was einem üblichen Wert im Bauwesen entspricht.

Das arithmetische Mittel \bar{x} , auch Mittelwert genannt, ergibt sich durch den folgenden Ausdruck [31]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.6)$$

mit:

- x_i – einzelne Werte innerhalb der Stichprobe
- n – Anzahl der Werte innerhalb der Stichprobe

Zur Überprüfung, ob das Vertrauensintervall symmetrisch ist, wird der Mittelwert in Relation zum Median x_{ME} gesetzt. Bei einer ungeraden Anzahl von Werten innerhalb einer Stichprobe wird der Median als der numerisch in der Mitte liegende Wert berechnet. Dies wird mit Gleichung (4.7) beschrieben. Bei einer geraden Anzahl von Stichproben wird gemäß Gleichung (4.8) der Median aus dem Mittel der beiden Werte gebildet, die numerisch in der Mitte liegen. [31]

$$x_{\text{ME}} = x_{(n+1)/2} \quad (n \text{ ungerade}) \quad (4.7)$$

$$x_{\text{ME}} = \frac{x_{n/2} + x_{n/2+1}}{2} \quad (n \text{ gerade}) \quad (4.8)$$

Die Ermittlung der Standardabweichung s für Stichproben nach Gleichung (4.9) erfolgt durch das Wurzelziehen aus der Varianz s^2 , welche nur eine Näherung der „wahren“ Streuung der Grundgesamtheit darstellt. Die Varianz lässt sich als Summe der quadrierten Abweichungen der Einzelwerte vom Mittelwert dividiert durch die Anzahl der Werte innerhalb der Stichprobe definieren. [31]

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.9)$$

Im Anschluss ist der Vertrauensbereich des zufälligen Fehlers $f_{\bar{x}}$ unter Verwendung der Gleichung (4.10) zu bestimmen. Anhand des festgelegten Vertrauensniveaus wird ausgehend vom Mittelwert eine obere und untere Grenze für eine Stichprobe ermittelt [32]. Das Ziel besteht darin, Unsicherheiten abzudecken und den „wahren“ Wert zu erfassen.

$$f_{\bar{x}} = \pm \frac{t_p \cdot s}{\sqrt{n}} \quad (4.10)$$

Der Variable t_p in der Gleichung (4.10) wird in Abhängigkeit des Freiheitsgrades f mit Hilfe der Tabelle 4.1 gewählt. Der Freiheitsgrad einer Stichprobe beträgt:

$$f = n - 1 \quad (4.11)$$

Tabelle 4.1: Werte der t-Verteilung (Tabellenausschnitt) – entnommen aus [32]

f	Zweiseitiger Vertrauensbereich						
	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,998	0,999
	Einseitiger Vertrauensbereich						
	0,90	0,95	0,975	0,99	0,995	0,999	0,9995
1	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	318,309	636,578
2	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	22,327	31,600
3	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	10,215	12,924
4	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	7,173	8,610
5	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	5,893	6,869
6	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,208	5,959
7	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,785	5,408
8	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	4,501	5,041
9	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,297	4,781
10	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,144	4,587
11	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,025	4,437
12	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,930	4,318
13	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,852	4,221
14	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,787	4,140
15	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,733	4,073

Der Faktor t_p ist für die Korrektur der Verteilungsbreite zuständig. Im Vergleich zur Standardnormalverteilung verläuft die t-Verteilung somit flacher. In Abbildung 4.4 erfolgt eine direkte Gegenüberstellung der t-Verteilung einer Stichprobe von zehn Werten mit der Standardnormalverteilung der Grundgesamtheit.

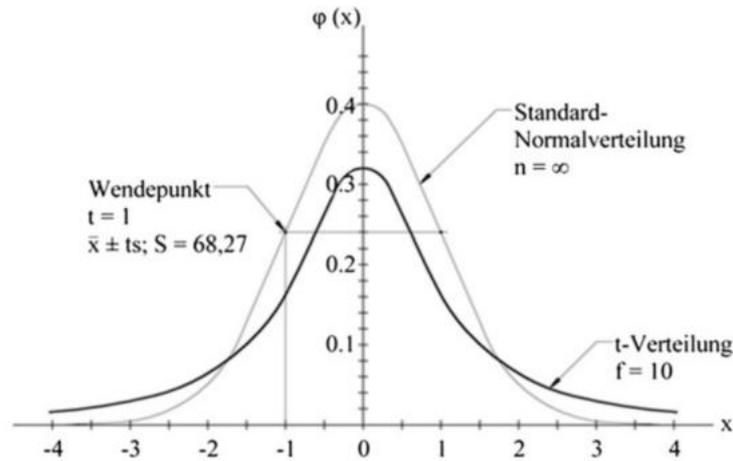


Abbildung 4.4: Standardnormalverteilung und t-Verteilung – entnommen aus [32]

Für die Grenzen des Vertrauensbereichs werden im Weiteren die Termini der DB übernommen. Die obere Grenze wird als „Maximum Maximorum Kurve“ (kurz: Maximorum) bezeichnet, was aus dem Lateinischen stammt und soviel bedeutet wie die größte der größten Kurven. Die untere Grenze erhält entsprechend die Benennung „Minimum Minimorum Kurve“ (kurz: Minimorum).

Das Maximorum σ_{Maxi} der Gleichung (4.12) und das Minimorum σ_{Mini} der Gleichung (4.13) für die maximalen Zugspannungen (positive Spannungen) ergibt sich aus dem Mittelwert der Zugspannungen $\bar{\sigma}_{\text{Zug}} \pm$ Vertrauensbereich.

$$\tilde{\sigma}_{\text{Maxi}} = \bar{\sigma}_{\text{Zug}} + \frac{t_p \cdot s}{\sqrt{n}} \quad (4.12)$$

$$\tilde{\sigma}_{\text{Mini}} = \bar{\sigma}_{\text{Zug}} - \frac{t_p \cdot s}{\sqrt{n}} \quad (4.13)$$

Für die maximalen Druckspannungen (negative Spannungen) betragen Maximorum und Minimorum demzufolge:

$$\tilde{\sigma}_{\text{Maxi}} = \bar{\sigma}_{\text{Druck}} - \frac{t_p \cdot s}{\sqrt{n}} \quad (4.14)$$

$$\tilde{\sigma}_{\text{Mini}} = \bar{\sigma}_{\text{Druck}} + \frac{t_p \cdot s}{\sqrt{n}} \quad (4.15)$$

Darüber hinaus wird ein relativer Fehler f_{rel} in Prozent angegeben, welcher sich nach Gleichung (4.16) ermitteln lässt.

$$f_{\text{rel}} = \frac{t_p \cdot s}{\sqrt{n}} \cdot \frac{1}{|\bar{\sigma}|} \cdot 100 \quad (4.16)$$

Die zuvor erläuterte Vorgehensweise zur statistischen Bewertung erfolgt in Excel. Für Berechnung der oberen und unteren Grenze des Vertrauensintervalls (Maximumum, Minimumum), sowie des relativen Fehlers werden entsprechende Excel-Funktionen verwendet.

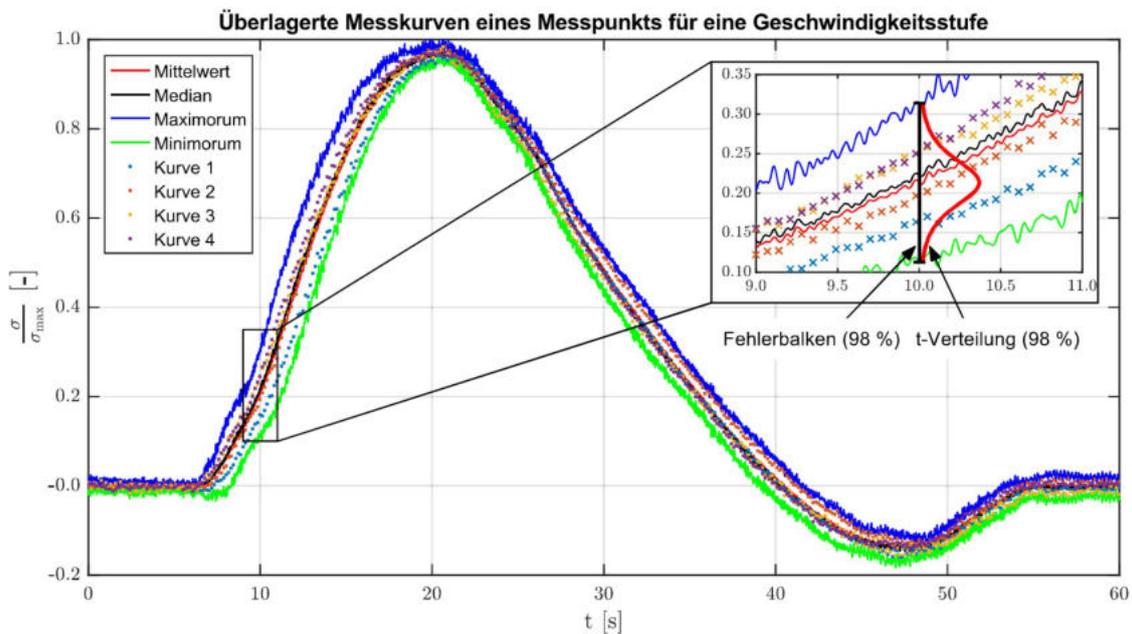


Abbildung 4.5: Exemplarische Darstellung einer statistischen Auswertung – erstellt von der DB

Die Abbildung 4.5 veranschaulicht beispielhaft eine statistische Auswertung, bei der für jeden Messpunkt einer Geschwindigkeitsstufe in Abhängigkeit der Zeit eine statistische Bewertung vorgenommen wurde. Sämtliche, resultierende Kurven sind in dem Diagramm aufgetragen. In der Vergrößerung ist die t-Verteilung der Messdaten abgebildet. Die Differenz zwischen Maximumum und Minimumum kennzeichnet den Vertrauensbereich.

4.6 Bestimmung des dynamisches Zuwachses und Beiwertes

Die Vergrößerung der aus der messtechnisch ermittelten Dehnung berechneten Spannung σ kann durch Zugüberfahrten mit Geschwindigkeiten $v > 0$ km/h sowohl durch einen relativen Zuwachs der Spannung als auch durch einen absoluten Zuwachs quantifiziert werden. Der absolute Zuwachs wird durch den dynamischen Zuwachs $\Delta\sigma$ abgebildet, während der relative Zuwachs der dynamische Beiwert $1 + \varphi$ ist. Diese Vereinfachung gilt jedoch nur, sofern Fliehkräfte und Beschleunigungsanteile sowie Resonanzerscheinungen keinen Einfluss auf die Spannungsermittlung haben. In der Praxis sind statische Belastungen mit $v = 0$ km/h nicht realisierbar, weshalb eine quasi-statische Belastung bei einer Zugüberfahrt mit $v = 10$ km/h zur Spannungsermittlung zugrunde gelegt wird. Die Ermittlung des dynamischen Zuwachses $\Delta\sigma(v)$ ergibt sich demnach aus der Differenz der maximalen Spannung bei $v > 10$ km/h und der quasi-statischen Spannung bei $v = 10$ km/h. Es gilt demnach:

$$\Delta\sigma(v) = \max(|\sigma(v)|) - \max(|\sigma(v = 10 \text{ km/h})|) \quad (4.17)$$

Wie in Kapitel 4.5 erläutert, findet zusätzlich eine statistische Bewertung der Messdaten statt, sodass nun das statistische Maximorum und Minimorum der Spannung in die Berechnung eingehen. Die Ermittlung des dynamischen Zuwachses ergibt sich somit zu:

$$\Delta\tilde{\sigma}(v) = \tilde{\sigma}_{\text{Maxi}}(v) - \tilde{\sigma}_{\text{Mini}}(v = 10 \text{ km/h}) \quad (4.18)$$

Der dynamische Beiwert $1 + \varphi$ ist definiert als der Quotient aus dem dynamischen Zuwachs $\Delta\tilde{\sigma}(v)$ und dem aus der quasi-statischen Zugüberfahrt ermittelten Minimorum $\tilde{\sigma}_{\text{Mini}}(v = 10 \text{ km/h})$ der Spannung.

$$1 + \varphi = 1 + \frac{\Delta\tilde{\sigma}(v)}{\tilde{\sigma}_{\text{Mini}}(v = 10 \text{ km/h})} \quad \text{für } v > 10 \text{ km/h} \quad (4.19)$$

Dieses Konzept stellt eine Erweiterung der in [33] beschriebenen Erkenntnisse zur messtechnischen Ermittlung des dynamischen Zuwachses und Beiwertes durch WEBER und KEHL dar, welche bereits im Jahr 1987 beim Bau der Hammer Eisenbahnbrücke über den Rhein Belastungsversuche durchführten. Durch die statistische Einordnung der ermittelten Spannung in Abhängigkeit der durchgeführten Messfahrten und der Annahme, dass diese einer student'schen t-Verteilung folgen, können bereits für eine geringe Anzahl an Stichproben (Messfahrten) statistisch sichere Aussagen

über den dynamischen Zuwachs und Beiwert getroffen werden. Weiterhin wird festgelegt, dass die Auswertung lediglich für Spannungen mit $\sigma > 10 \text{ N/mm}^2$ erfolgt, um den Einfluss des Messrauschens zu minimieren. Es gilt darüber hinaus, dass der dynamische Beiwert nur für solche dynamischen Zuwächse $\Delta\tilde{\sigma}(v)$ ausgewertet wird, wenn diese das gleiche Vorzeichen wie das ermittelte Maximorum der zugehörigen Spannung $\tilde{\sigma}_{\text{Maxi}}$ aufweisen. Andernfalls wird der dynamische Beiwert immer zu 1,0 gesetzt.

4.7 Messwertgestützte Spannungseinflusslinien

4.7.1 Das Konzept der Einflusslinie

„Die Einflusslinie beschreibt den Einfluss einer Einheitslast mit variablem Angriffspunkt m auf eine Zustandsgröße Z an einem bestimmten Punkt r des gegebenen Systems“ [34]. Einflusslinien finden dort Anwendung, wo eine ortsveränderliche Lastbeanspruchung (sog. Wanderlast) auftritt. Die Ermittlung von Einflusslinien findet sowohl für Schnittgrößen, bspw. Biegemoment, Querkraft, Normalkraft, als auch für Verformungen Anwendung. Auch für aus Werkstoffgesetzen abgeleitete Größen, wie die Spannung, sind Einflusslinien erstellbar. [34]

In der Abbildung 4.6 ist das statische System sowie die sich ergebene Einflusslinie aus der Wanderlast $P = 1$ dargestellt. Die Einflusslinienordinaten η_m bzw. η_r stellen den Wert der Zustandsgröße Z – hier das Biegemoment – dar, wenn die Wanderlast im Punkt m bzw. Punkt r des statischen Systems steht.

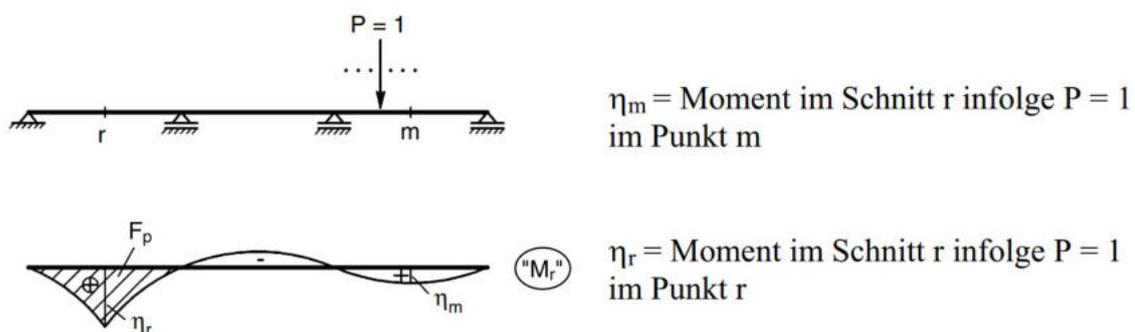


Abbildung 4.6: Einflusslinie für das Biegemoment unter einer ortsveränderlichen Last $P = 1$ – entnommen aus [34]

4.7.2 Verfahren von Braune

Zur Ermittlung der Einflusslinien wird das in [35] beschriebene Verfahren von WOLFGANG BRAUNE angewandt, welches die Bestimmung von Einflusslinien aus Dehnungsmessungen unter beliebig wandernden Lasten ermöglicht. Innerhalb dieser Arbeit erfolgt die Bestimmung der Einflusslinien jedoch für die Spannung (sog. Spannungseinflusslinien). Diese können über das Hook'sche Gesetz ($\sigma = E \cdot \varepsilon$) in die gemessene Dehnung ε zurückgerechnet werden, sofern der linear-elastische Bereich des Werkstoffs nicht überschritten wird.

Die Grundlage für das Verfahren von BRAUNE bildet die Möglichkeit, bei gegebener Belastung, die Verformungslinie aus einer vorhandenen Einflusslinie bestimmen zu können. Hierfür wird die jeweilige Last schrittweise über die Einflusslinie bewegt. Die sich hieraus ergebene Verformung, welche fortan als Dehnung bezeichnet wird, lässt sich durch die folgende Beziehung beschreiben:

$$\varepsilon_i = \Sigma P_i \cdot \eta_i \quad (4.20)$$

mit:

P_i – Achslast des Lastenzugs

η_i – Ordinate der Einflusslinie

Die Abbildung 4.7 zeigt die Ermittlung einer Verformungslinie für ein zweiachsiges Fahrzeug mit dem Achsabstand a und den Lasten P_1 und P_2 , wobei $P_1 = P_2$ gilt. In a) ist das statische System in Form eines gelenkig gelagerten Einfeldträgers dargestellt. Darunter befindet sich die ermittelte Einflusslinie für das maximale Biegemoment bei $0,5 \cdot L$. In b) wird das schrittweise Überfahren der Einflusslinien durch den Lastenzug dargestellt. In c) ist die Ermittlung der zugehörigen Verformungslinie zu sehen.

In Schritt 1 befindet sich lediglich die Achse P_1 auf dem Träger, sodass sich im Punkt $x_1 = a$ eine Dehnung von $\varepsilon_1 = P_1 \cdot \eta_1$ ergibt. Diese wird als Ordinate auf der Verformungslinie aufgetragen. In Schritt 2 befinden sich beide Achslasten auf dem Träger. Für den Punkt $x_2 = 2a$ ergibt sich eine Verformungslinienordinate von $\varepsilon_2 = P_1 \cdot \eta_2 + P_2 \cdot \eta_1$. Die Last P_2 steht auf dem Punkt x_1 , sodass die Verformungslinienordinate für diesen Punkt mit ε_1 bereits bekannt ist. Für den dritten Schritt erfolgt das Vorgehen analog. Die Dehnung im Punkt $x_3 = 3a$ beträgt $\varepsilon_3 = P_1 \cdot \eta_3 + P_2 \cdot \eta_2$. Achse P_2 rückt um a auf $x_2 = 2a$ weiter, woraus sich eine Dehnung von ε_2 ergibt.

Aufgrund gleicher Achslasten lässt sich die Ermittlung der Verformungslinienordinaten durch $\varepsilon_i = P \cdot (\eta_i + \eta_{i-1})$ zusammenfassen.

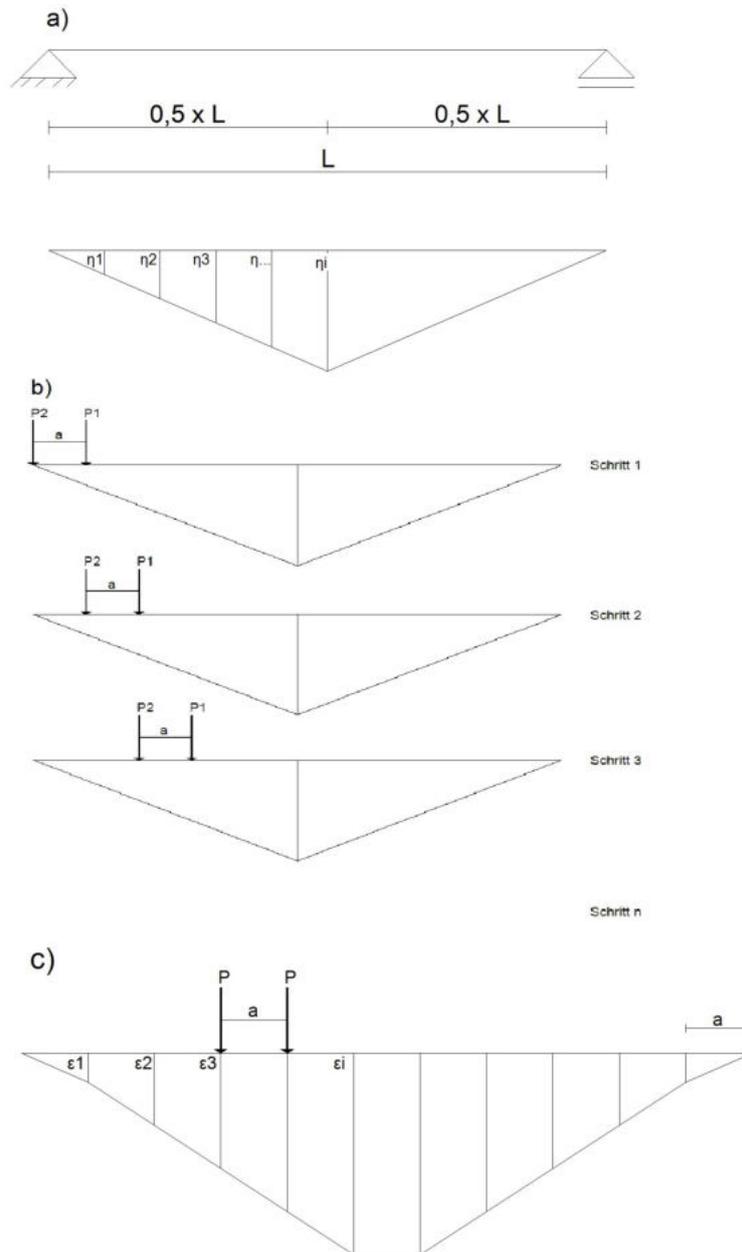


Abbildung 4.7: Ermittlung der Verformungslinie aus einer Einflusslinie anhand eines zweiachsigen Fahrzeugs

Die größte Dehnung ε_i hängt vom Produkt der zweiten Achse P_2 ab. Im vorliegenden Beispiel wächst ε_i so lange an, bis die Achse P_2 im Abstand a vor der maximalen Ordinate der Einflusslinie steht. Steht die Achse P_2 auf der maximalen Ordinate der Einflusslinie entsteht im vorliegenden Beispiel ein Plateau in der Verformungslinie, welches zum einen aufgrund der Symmetrie in der Einflusslinie und damit verbun-

denen gleichen η_i und zum anderen aufgrund der symmetrischen Belastung entsteht. Überschreitet die Achse P_2 die maximale Ordinate η_i , fallen auch die Dehnungen ε_i ab, bis P_2 den Träger verlässt. Die Verformungslinie folgt demnach der Einflusslinie und wird zusätzlich um den Achsabstand a verlängert. Weitere Beispiele zur Ermittlung der Verformungslinie aus der Einflusslinie mit bspw. drei- oder vierachsigen Fahrzeugen können [35] entnommen werden.

Im umgekehrten Sinn besteht ebenfalls die Möglichkeit aus einer bei Belastung gemessenen Verformungslinie die zugehörige Einflusslinie zurückzurechnen. Die Voraussetzung hierfür ist die Gültigkeit des Superpositionsgesetzes sowie eine konstante Geschwindigkeit der überfahrenden Achsen. Für das zuvor gewählte Beispiel eines zweiachsigen Fahrzeugs mit gleichen Achslasten P ergibt sich die Ordinate der Einflusslinie zu:

$$\varepsilon_i = P \cdot (\eta_i + \eta_{i-1}) \quad (4.21)$$

$$\eta_i = \frac{\varepsilon_i}{P} - \eta_{i-1} \quad (4.22)$$

Das beispielhaft vorgestellte Vorgehen zur rekursiven Ermittlung der Einflusslinie aus der Verformungslinie führt bei allen, eindeutig mit rechnerischen Annahmen bestimmten Verformungslinien zur Rückrechnung der genauen, vorgegebenen Einflusslinie. Bei der Rückrechnung gemessener Verformungslinien ergeben sich aufgrund nicht exakt erfassbarer äußerer Einflüsse größere Unterschiede in der Rückrechnung der Einflusslinienordinaten η_i . Hier empfiehlt es sich, die Einflusslinie durch Überfahrt der Lasten aus beiden Belastungsrichtungen (von links nach rechts und von rechts nach links) zu ermitteln und die Ergebnisse zu überlagern. Die Abbildung 4.8 zeigt ein solches Vorgehen. In a) ist die aus einem zweiachsigen Fahrzeug mit unterschiedlichen Achslasten gemessene Verformungslinie dargestellt. In b) erfolgt die Überfahrt der Achslasten von links nach rechts. Dargestellt ist die sich ergebene Einflusslinie. In c) wird die Einflusslinie bei rückwärtiger Überfahrt der Achslasten dargestellt. Diese Einflusslinie beginnt am Ende der Verformungslinie aus a) bzw. einen Achsabstand vor dem Ende der von links ermittelten Einflusslinie aus b). Wird nun die Einflusslinie um den Achsabstand a verschoben, ergibt sich die aus beiden Fahrtrichtungen zusammengesetzte Einflusslinie d), welche sich weitestgehend decken.

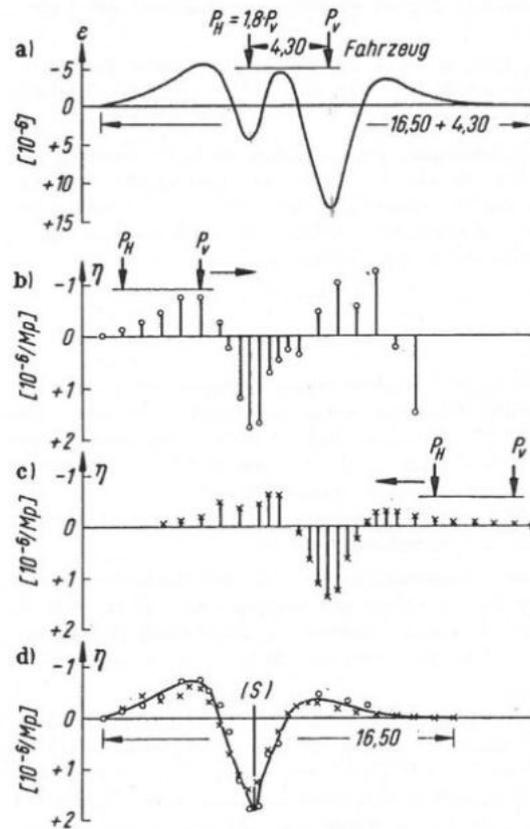


Abbildung 4.8: Ermittlung der Einflusslinie aus einer gemessenen Verformungslinie – entnommen aus [35]

4.8 Bestimmung des messwertgestützten Schwingfaktors

Die Einflusslinie ist ein allgemein gültiges Abbild der ungünstigsten Laststellungen für die maßgebenden Beanspruchungen des jeweiligen statischen Systems des Bauteils. Sie ermöglicht es, jeden beliebigen Zug über die Brücke „fahren“ zu lassen und dadurch verursachten maximalen und minimalen Spannungen ermitteln zu können. Die messwertgestützten Spannungseinflusslinien werden für das Lastmodell 71 und für die sechs Idealtypen der Betriebslastenzüge ausgewertet. Da das LM 71 keinem realen Zug entspricht, muss dieses Lastbild so geteilt werden, dass entlastende Effekte vermieden werden. Die Spannungen der sechs idealen Betriebslastenzüge hingegen, werden unter Berücksichtigung von entlastenden Effekten berechnet. Für jeden Messpunkt resultieren somit Minimal- und Maximalwerte der Spannungen infolge LM 71 und infolge des jeweils maßgebenden Idealtyps der Betriebslastenzüge.

Der Schwingfaktor hat die Aufgabe das LM 71 so zu skalieren, dass es die dynamischen Effekte der einzelnen idealen Betriebslastenzüge (Blz) abdeckt, wie bereits in Abbildung 2.9 beschrieben. Die Vorzeichen in Gleichung (4.23) entsprechen entweder Druck- (–) oder Zugspannungen (+) und dürfen daher untereinander nicht gemischt werden.

$$\Phi \cdot \sigma_{\text{LM71}} \geq \max(\sigma_{\text{Blz},i} + \Delta\sigma_{\text{Blz},i}) \quad (4.23)$$

Die Ermittlung des Schwingfaktors erfolgt anhand drei verschiedener Definitionen. Zur eindeutigen Unterscheidung werden die Schwingfaktoren in dieser Arbeit mit römischen Ziffern fortlaufend nummeriert. Alle drei nachfolgenden Gleichungen beruhen auf der Annahme, dass der dynamische Zuwachs infolge der Loküberfahrt für sämtliche andere Betriebslastenzüge identisch ist.

$$\Phi_{\text{obs,I}} = \frac{\sigma_{\text{LM71}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}} \quad (4.24)$$

$$\Phi_{\text{obs,II}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}} \quad (4.25)$$

$$\Phi_{\text{obs,III}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} \cdot (1 + \varphi(v))}{\sigma_{\text{LM71}}} \quad (4.26)$$

Die Definition von $\Phi_{\text{obs,I}}$ nach Gleichung (4.24) bedingt, dass das LM 71 stets alle sechs Idealtypen der Betriebslastenzüge abbilden kann. Hierbei wird die Spannung, welche durch das LM 71 hervorgerufen wird, mit dem maßgebenden dynamischen Zuwachs beaufschlagt und auf das Spannungsniveau des LM 71 bezogen.

In den weiteren Definitionen $\Phi_{\text{obs,II}}$ und $\Phi_{\text{obs,III}}$ wird auf dem Bruchstrich die Spannung infolge des maßgebenden idealen Betriebslastenzugs mit dem dynamischen Zuwachs addiert bzw. mit dem ausschlaggebenden dynamischen Beiwert multipliziert. Schließlich wird der jeweilige Term durch die sich aus dem LM 71 ergebende Spannung dividiert. Seitens der DB InfraGO AG, Abteilung Brückenmessung, I.IAI 32 ist die Gleichung (4.26) die derzeitige bevorzugte Definition. Die Gleichung (4.25) stammt von WEBER aus der Veröffentlichung [33].

Die gesamte Auswertung beschränkt sich auf das Lastmodell 71. Die erläuterte Vorgehensweise lässt sich jedoch analog auf das SW/0 und SW/2 übertragen.

5 Auswertung von Messungen an stählernen Vollwandträgerbrücken

Nachfolgend werden vier verschiedene Brücken der DB messtechnisch untersucht. Die dafür notwendigen Grundlagen wurden bereits in Kapitel 4 behandelt. Das Ziel der Auswertung ist die Ermittlung des messwertgestützten Schwingfaktors Φ_{obs} . Die Ergebnisse sollen abschließend im Kontext der geltenden Normung eingeordnet und diskutiert werden.

5.1 Brücke 1

5.1.1 Bauwerksbeschreibung

Die vorliegende Eisenbahnüberführung (EÜ) in Vollwandträgerbauweise ist als Gerberträger mit zwei Zwischenauflagern ausgeführt. Die Stützweiten der drei Öffnungen betragen 4,70 m + 15,06 m + 4,70 m. Die Gerbergelenke sind direkt über den Stützen angeordnet. Eine seitliche Ansicht der Brücke 1 kann der Abbildung 5.1 entnommen werden.



Abbildung 5.1: seitliche Ansicht der Brücke 1

Die beiden Gleise liegen jeweils gerade im Schotterbett auf den Überbauten. Die Schienenführung erfolgt eingleisig über die Vollwandträger der zwei voneinander getrennten Überbauten. Beide Überbauten bestehen aus zwei im Abstand von 3,20 m liegenden Hauptträgern, einem mittleren Längsträger sowie 19 Querträgern mit Abständen von 1,58 m und 1,42 m. Die EÜ kreuzt die darunterliegende Straße schiefwinklig, wodurch die Endquerträger ebenfalls schiefwinklig zum restlichen Oberbau verlaufen.

5.1.2 Lage und Bezeichnung der Messschnitte

Zur messtechnischen Untersuchung der Brücke 1 werden vier Messschnitte auf dem Überbau 2 definiert. Der festgelegte Messbereich ist in der Draufsicht und im Querschnitt der Brücke in Abbildung 5.2 gekennzeichnet.

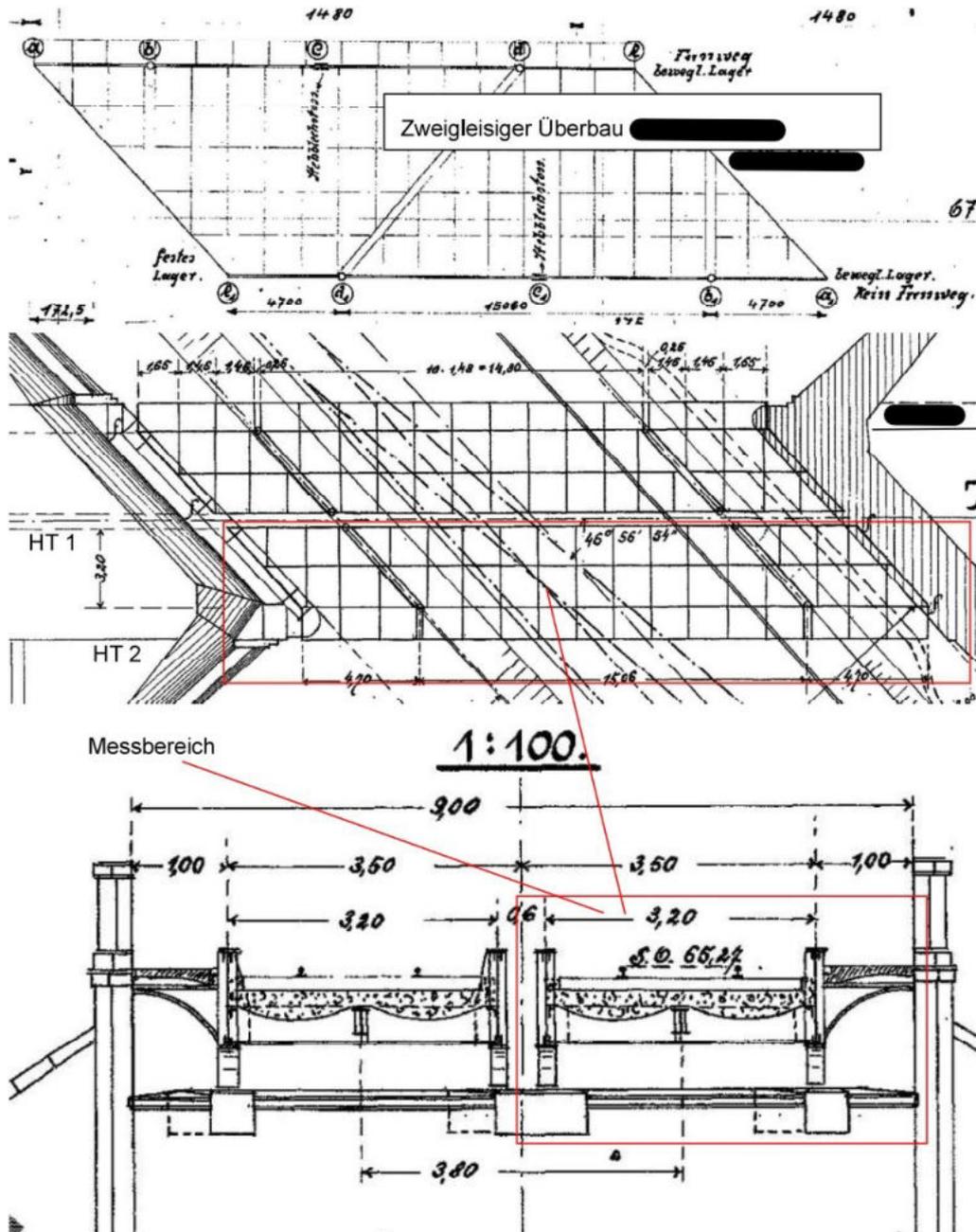


Abbildung 5.2: Draufsicht und Querschnitt der Brücke 1 mit markiertem Messbereich

Die Abbildung 5.3 stellt die Lage der Messschnitte der Brücke 1 dar. Zur eindeutigen Zuordnung werden die vier Messschnitte lokalisiert und durch die folgenden Bauteile gekennzeichnet:

- Messschnitt 1: EQT über der ersten Zwischenstütze
- Messschnitt 2: LT im Endfeld, $x = 4,70 \text{ m} + 1,48 \text{ m}/2 = 5,44 \text{ m}$
- Messschnitt 3: HT neben Stegblechstoß, $x = 4,70 \text{ m} + 1,50 \text{ m} = 6,20 \text{ m}$ und QT 2 des mittleren Feldes
- Messschnitt 4: Brückenmitte, $x = 12,23 \text{ m}$

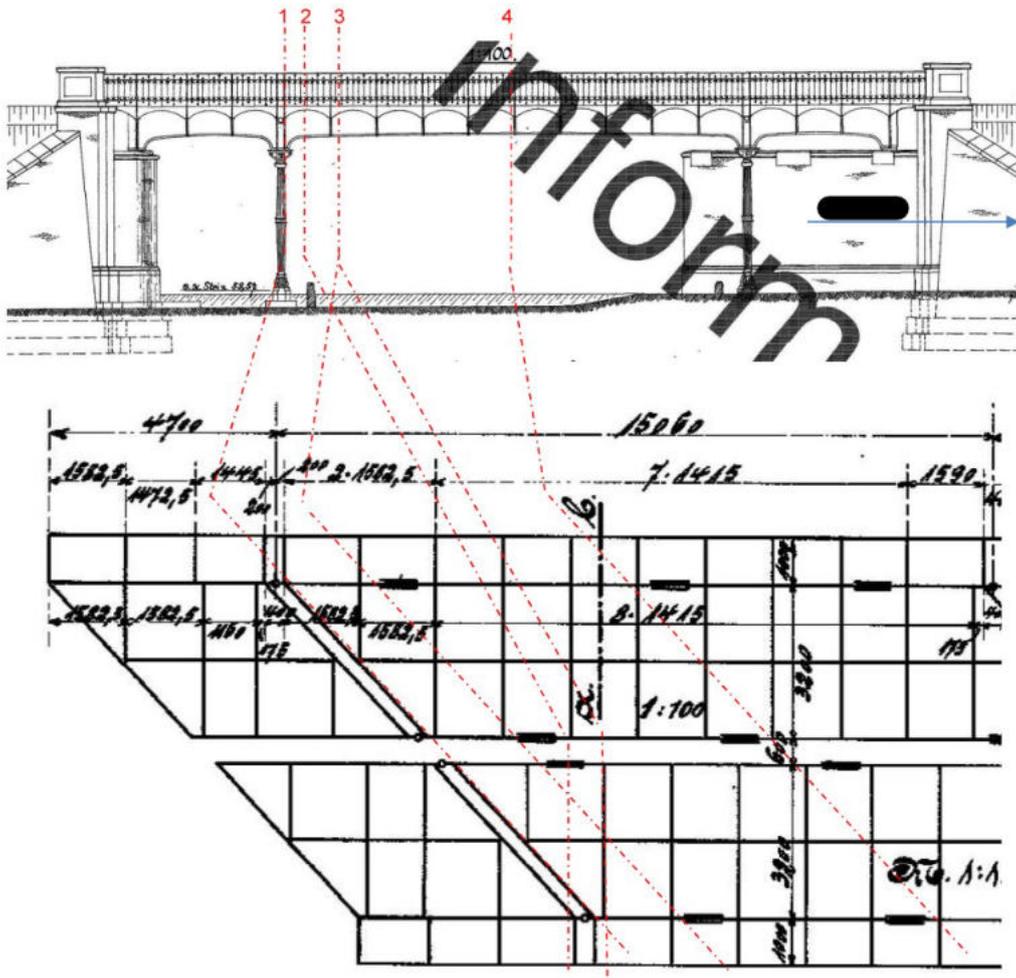


Abbildung 5.3: Lage der Messschnitte auf Brücke 1

5.1.3 Lage und Bezeichnung der Messpunkte

Nachfolgend werden die gesetzten Messpunkte je Messschnitt dargestellt. Die einzelnen DMS sind dabei mit einem roten Pfeil gekennzeichnet und die Rosetten als blauer, dreizackiger Stern. Da die Rosetten nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit sind, werden sie im Weiteren nicht aufgeführt oder näher betrachtet.

Messschnitt 1

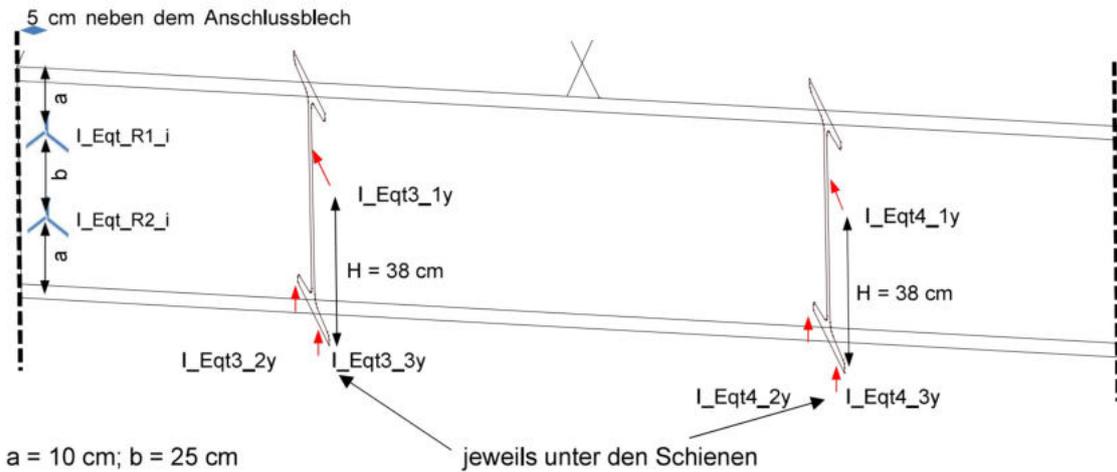


Abbildung 5.4: Lage und Bezeichnung der Messpunkte im Messschnitt 1 der Brücke 1

Am Endquerträger werden jeweils drei DMS unter den Schienen angeordnet, davon zwei am Untergurt und einer am Steg. Aus den sechs Messpunkten gemäß Abbildung 5.4 resultieren sechs Messkanäle.

Messschnitt 2

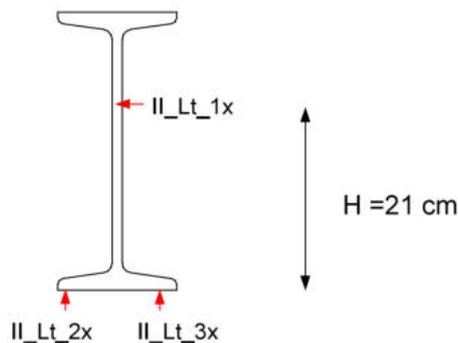


Abbildung 5.5: Lage und Bezeichnung der Messpunkte im Messschnitt 2 der Brücke 1

Am Längsträger werden insgesamt drei DMS, zwei am Untergurt und einer am Steg, appliziert und somit drei Messkanäle erzeugt. Die drei Messpunkte können der Abbildung 5.5 entnommen werden.

Messschnitt 3

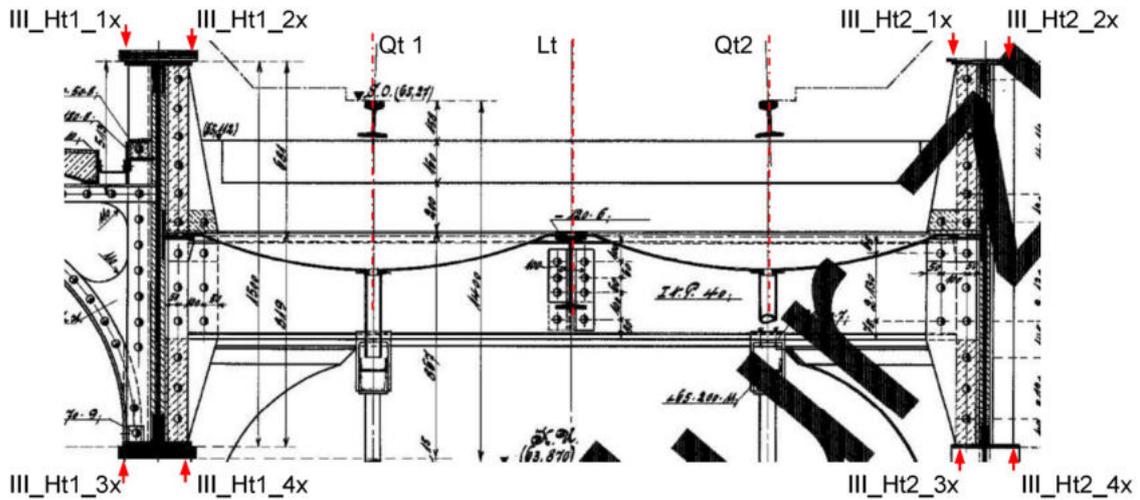


Abbildung 5.6: Lage und Bezeichnung der Messpunkte auf dem HT im Messschnitt 3 der Brücke 1

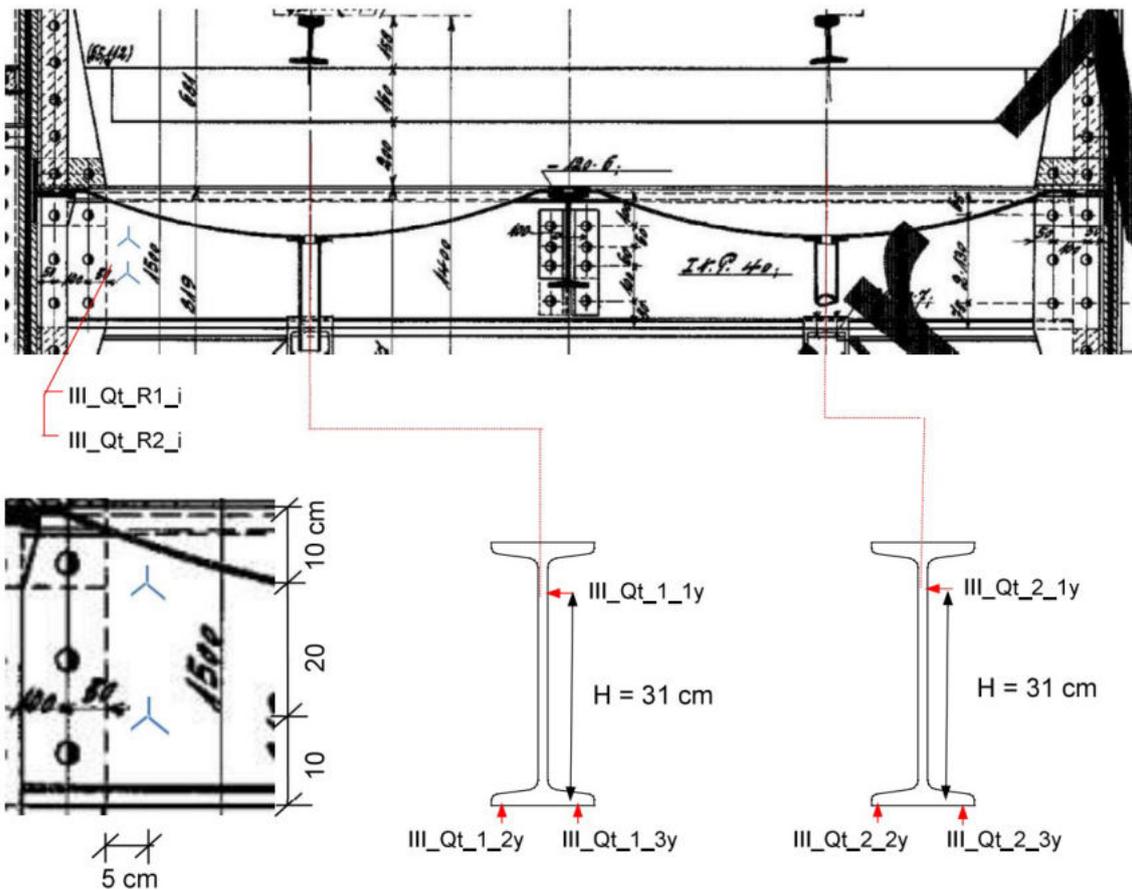


Abbildung 5.7: Lage und Bezeichnung der Messpunkte auf dem QT im Messschnitt 3 der Brücke 1

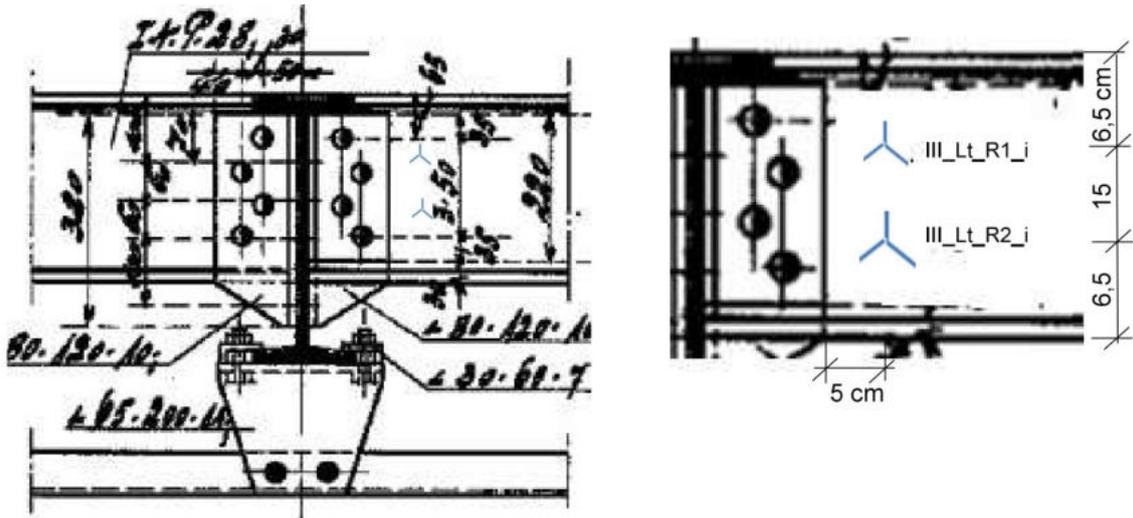


Abbildung 5.8: Lage und Bezeichnung der Messpunkte auf dem LT im Messschnitt 3 der Brücke 1

In diesem Messschnitt werden jeweils zwei DMS am Ober- und am Untergurt der beiden Hauptträger installiert, wie in Abbildung 5.6 beschrieben. Des Weiteren sind am Querträger unter beiden Schienen jeweils drei DMS, davon zwei am Untergurt und einer am Steg, befestigt (siehe Abbildung 5.7). Insgesamt umfasst der Messschnitt 3 demnach 14 Messkanäle.

Messschnitt 4

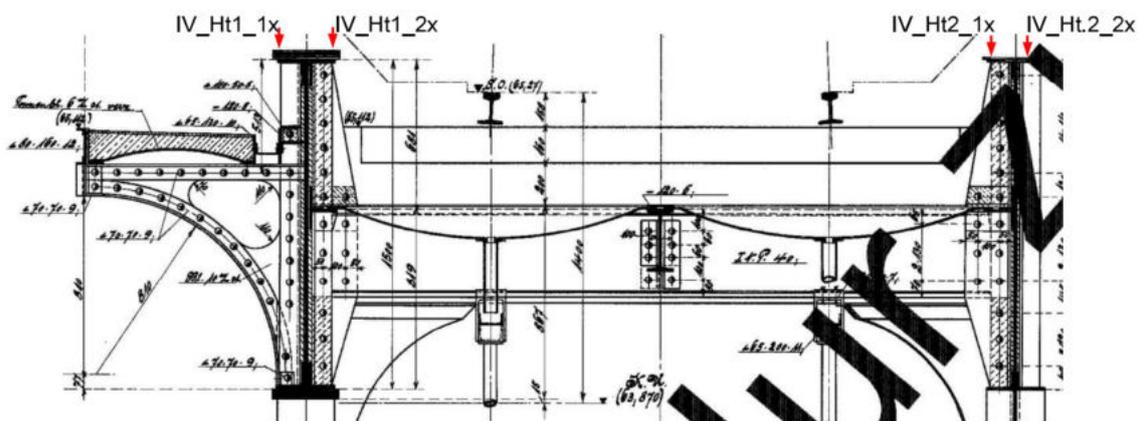


Abbildung 5.9: Lage und Bezeichnung der Messpunkte im Messschnitt 4 der Brücke 1

An beiden Hauptträgern werden jeweils zwei DMS am Obergurt in Brückenmitte platziert. Es entstehen vier Messkanäle. Diese Messpunkte sind in Abbildung 5.9 gekennzeichnet.

5.1.4 Verkehrslasten

Die Erfassung der Messwerte erfolgt durch Überfahrten einer 4-achsigen Lokomotive in definierten Geschwindigkeitsstufen. Diese betragen hier $v = 10$ km/h, $v = 50$ km/h und $v = 80$ km/h. Als Belastungslok wird eine Diesellokomotive der DB der Baureihe 218 mit der konkreten Bezeichnung „BR218-191-50“ verwendet. In Abbildung 5.10 ist die Belastungslok mit ihren zugehörigen Achslasten und Achsabständen zu sehen.



Abbildung 5.10: Belastungslok BR218 der DB mit ihren Achslasten und Achsabständen – Bildquelle: <https://tinyurl.com/2xbuqmk>

Die Messfahrten mit der Belastungslok dienen als Grundlage für die Ermittlung messwertgestützter Einflusslinien sowie dynamischer Zuwächse und Beiwerte. Aus statistischen Gesichtspunkten sind hierfür mindestens vier Messungen je Geschwindigkeitsstufe erforderlich.

5.1.5 Ermittlung und Prüfung der Fahrgeschwindigkeiten

Die Beurteilung der Fahrgeschwindigkeiten der Belastungslok erfolgt auf der Grundlage des in Abschnitt 4.2 beschriebenen Vorgehens. Die Auswertung findet in Excel statt und ist im Anhang 1 - A angefügt.

Für die Messreihe $v = 10$ km/h werden nur Messfahrten mit einer Differenz Δv von bis zu 1,16 km/h mit einem zugehörigen relativen Fehler f von 12 % verwendet. Der höhere relative Fehler bei $v = 10$ km/h ist akzeptabel, da die absolute Differenz auf die sehr geringe Endgeschwindigkeit bezogen werden muss. Die Differenz Δv ist technisch bedingt und liegt in der gleichen Größenordnung wie die der anderen Geschwindigkeitsstufen. Im Zuge der Filterung werden sechs Messfahrten mit jeweils höheren Abweichungen verworfen werden. Die geringe Anzahl von vier Messfahrten eignet sich dennoch zur statistischen Auswertung.

Die Messreihe $v = 50$ km/h wird zu $v = 45$ km/h korrigiert, aufgrund der durchgängig unterschrittenen festgelegten Geschwindigkeit. Lediglich eine Messfahrt wird von der

Messreihe ausgeschlossen, da diese der Geschwindigkeit $v = 50$ km/h zugeordnet werden müsste. Der relative Fehler liegt bei der gesamten Messreihe unter 3 %. Lediglich die letzte Messfahrt der Messreihe $v = 80$ km/h muss entfallen, da hier deutlich erkennbar die Testgeschwindigkeit unterschritten wurde und zusätzlich ein nicht zu vernachlässigender Beschleunigungsvorgang stattfand. Bei dieser Messfahrt wurde an der ersten Lichtschranke $v_1 = 17,75$ km/h registriert während an der zweiten Lichtschranke $v_2 = 29,65$ km/h gemessen wurde. Alle weiteren Messfahrten sind von sehr hoher Qualität, da sie eine Differenz Δv von 1 km/h nicht überschreiten, bei einem relativen Fehler von maximal 1,14 %.

Damit ergeben sich für die Brücke 1 die folgenden Geschwindigkeitsstufen mit zugehöriger Anzahl der Messfahrten, die im weiteren Verlauf für die Auswertung herangezogen werden:

$v = 10$ km/h		4 Messfahrten
$v = 45$ km/h		9 Messfahrten
$v = 80$ km/h		10 Messfahrten

5.1.6 Analyse und Verarbeitung der Messdaten

Im Weiteren erfolgt eine kurze Beschreibung der Datenverarbeitung und Auswertung. Dabei wird auf Besonderheiten der vorliegenden Brücke eingegangen.

Ermittlung der Spannungen

Zur Bestimmung der Spannungen aus den gemessenen Dehnungen wird bei allen Messreihen ein Nullabgleich mit den ersten 200 Datenpunkten durchgeführt sowie ein Tiefpassfilter mit der Messfrequenz 300 Hz und Grenzfrequenz 20 Hz angewendet. Das Ergebnis dieser Bearbeitung ist die Verminderung des Oszillierens und das Auslaufen der Messkurve auf näherungsweise Null.

Statistische Bewertung der Messdaten

Innerhalb der Messreihe $v = 10$ km/h kommt es an mehreren Messpunkten zu höheren relativen Fehlern von bis zu 11,5 %. Dies kann zum einen auf die schwankende Fahrgeschwindigkeit durch Beschleunigungs- und Bremsvorgänge und zum anderen auf die kleine Stichprobe zurückgeführt werden. Die übrigen Messreihen $v = 45$ km/h und $v = 80$ km/h weisen geringe relative Fehler von bis zu 5 % auf. Die gesamte statistische Auswertung der Spannungen von Brücke 1 ist dem Anhang 1 - B zu entnehmen.

Bestimmung des dynamisches Zuwachses und Beiwertes

Für die Ermittlung der dynamischen Zuwächse und Beiwerte wird die Grenzspannung auf 10 N/mm^2 gesetzt. Alle Spannungen, die kleiner als dieser Grenzwert sind, bleiben in der weiteren Auswertung unberücksichtigt. Die Einführung dieses Grenzwertes dient als Maßnahme zur Reduktion des Einflusses des Messrauschens. Im Anhang 1 - C ist eine Darstellung der dynamischen Zuwächse und Beiwerte zu finden.

Messwertgestützte Spannungseinflusslinien

Die Erstellung der Spannungseinflusslinien für $v = 10 \text{ km/h}$ erfolgt mit der Fahrt „Test_069“, da während dieser Loküberfahrt die geringsten Schwankungen in der Geschwindigkeit festgestellt werden konnten. Die Rückrechnung der Spannungen mithilfe der erstellten EFL führt zu teils signifikanten Abweichungen, die auf das verwendete Verfahren von BRAUNE zurückzuführen sind und sich nicht vermeiden lassen. Hierbei liegt der Fokus auf dem Abbilden des grundlegenden Verlaufs sowie der Extrema.

Bestimmung des messwertgestützten Schwingfaktors

Zunächst sind die maßgebenden Spannungen des Lastmodells 71 sowie der Idealtypen zu filtern. Dies erfolgt im Anhang 1 - D. Hierbei erzeugt immer der Betriebslastenzug 6 die betragsmäßig höchsten Spannungen, bis auf einen Fall, wo der Betriebslastenzug 1 ungünstiger wirkt.

Die Schwingfaktoren werden anhand der Gleichungen (4.24), (4.25) und (4.26) für jeden ausgewerteten Messpunkt bestimmt. Hierfür ist der Anhang 1 - E heranzuziehen. Anschließend wird der maßgebende Schwingfaktor bauteilbezogen ermittelt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden im folgenden Abschnitt behandelt.

5.1.7 Ergebnisse der Messdatenauswertung

Hauptträger

Es werden die Ergebnisse des Hauptträgers 2 im Messschnitt 3 stellvertretend für alle Hauptträger der Brücke 1 betrachtet, da hier der größte Wert für den messwertgestützten Schwingfaktor Φ_{obs} generiert wird.

Die Spannungsverläufe aller Messpunkte des Hauptträgers 2 im Messschnitt 3 werden in Abbildung 5.11 gezeigt. Die Spannungen erfahren mit steigender Geschwin-

digkeit keinen signifikanten Spannungszuwachs (siehe auch Tabelle 5.1). Daher wird nur $v = 10 \text{ km/h}$ und $v_{\max} = 80 \text{ km/h}$ aufgeführt. Ein Aufschwingen der Brücke kann somit im analysierten Geschwindigkeitsbereich nicht festgestellt werden. Die Spannungsverläufe sind an der horizontalen Achse in den Diagrammen gespiegelt, d. h. der Messpunkt am Obergurt entspricht dem Untergurt mit umgekehrtem Vorzeichen. Am Obergurt wirken somit im Mittel minimale Druckspannungen von $\sigma = -20,0 \text{ N/mm}^2$ und am Untergurt maximale Zugspannungen von $\sigma = 19,2 \text{ N/mm}^2$ bei der Loküberfahrt mit $v = 10 \text{ km/h}$. Die höchste Untersuchungsgeschwindigkeit $v_{\max} = 80 \text{ km/h}$ ruft mittlere Spannungen von $\sigma = -20,1 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 19,5 \text{ N/mm}^2$ hervor. Der Vorzeichenwechsel der Spannungslinien kurz vor dem Auslaufen auf Null weist auf eine schwach ausgeprägte Durchlaufwirkung hin. Der Messschnitt befindet sich nahe der Zwischenstützung.

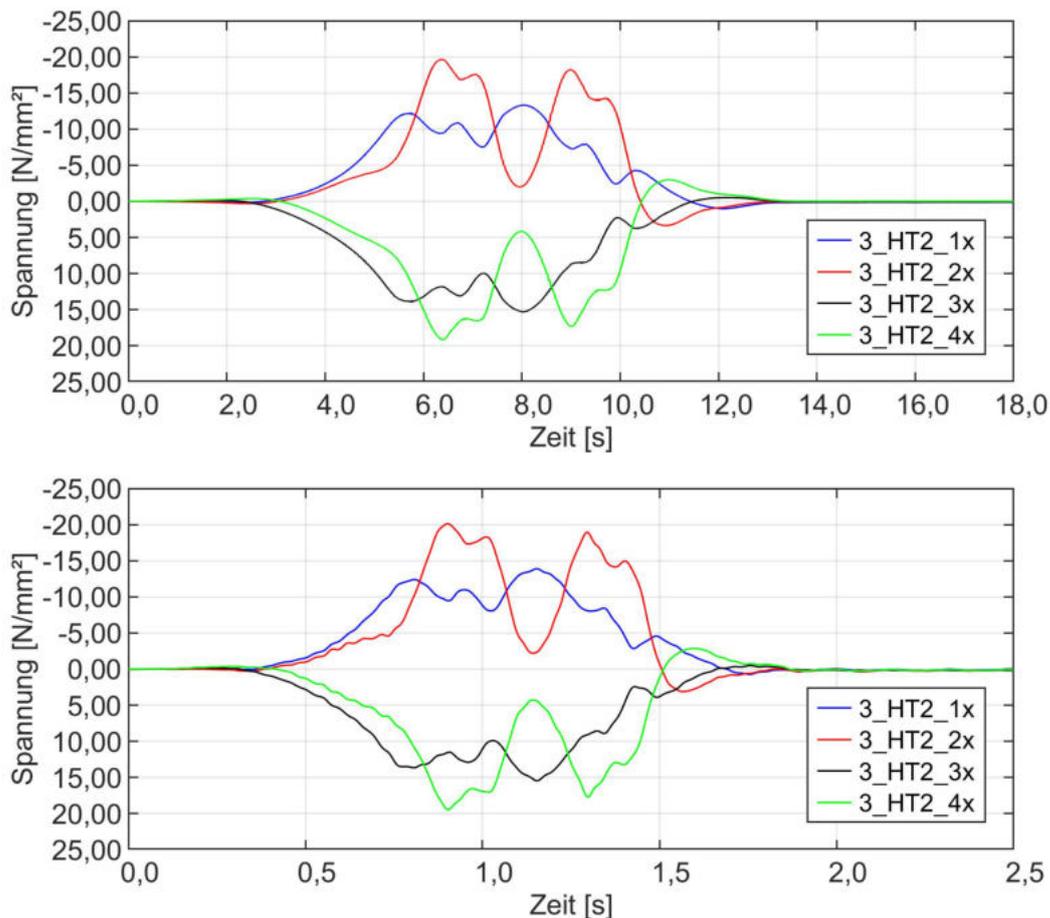


Abbildung 5.11: Spannungen am Hauptträger Brücke 1 infolge der Belastungslok, $v = 10 \text{ km/h}$ (oben) und $v_{\max} = 80 \text{ km/h}$ (unten)

Die jeweils sehr unterschiedlichen Spannungsverläufe der beiden Messpunkte am Obergurt sowie der beiden Messpunkte am Untergurt entspringen aus dem räum-

lichen Tragverhalten des Hauptträgers. Hierbei spielt der Einfluss der Biegung um die schwache Trägerachse sowie die Torsionsbeanspruchung eine wesentliche Rolle. Bei den Messpunkten „3_HT2_1x“ sowie „3_HT2_3x“ handelt es sich um die dem Gleis zugewandten Messpunkte und bei „3_HT2_2x“ und „3_HT2_4x“ um die dem Gleis abgewandten Messpunkte.

Tabelle 5.1: Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungslök am Hauptträger Brücke 1

Hauptträger 2 (Messschnitt 3) Brücke 1					
dynamischer Effekt	Geschwindigkeit	3_HT2_1x	3_HT2_2x	3_HT2_3x	3_HT2_4x
dynamischer Zuwachs in N/mm ²	10 km/h	-0,92	-0,79	2,24	0,33
	45 km/h	-0,61	-0,86	1,70	0,56
	80 km/h	-0,94	-0,78	1,62	0,74
	maßgeb.	-0,94	-0,86	2,24	0,74
dynamischer Beiwert in –	10 km/h	1,07	1,04	1,16	1,02
	45 km/h	1,05	1,04	1,12	1,03
	80 km/h	1,07	1,04	1,12	1,04
	maßgeb.	1,07	1,04	1,16	1,04

Die Tabelle 5.1 bildet die dynamischen Zuwächse und die dazugehörigen dynamischen Beiwerte $1 + \varphi$ über alle Geschwindigkeitsstufen ab. Der größte dynamische Beiwert von 1,16 ergibt sich am Messpunkt „3_HT2_3x“ unter $v = 10$ km/h. Dieser Beiwert resultiert aus einem dynamischen Spannungszuwachs von 2,24 N/mm². Die kleine Stichprobe bei $v = 10$ km/h führt zu einem größeren Vertrauensintervall, wodurch folglich die Ergebnisse im Vergleich zu den anderen beiden Geschwindigkeitsstufen maßgebend werden. Darüber hinaus spiegelt sich die Symmetrie der Spannungsverläufe gleichermaßen in den dynamischen Beiwerten wider. Die Messpunkte „3_HT2_2x“ und „3_HT2_4x“ sind nahezu identisch und „3_HT2_1x“ sowie „3_HT2_3x“ sind sich ähnlich.

Die Spannungseinflusslinie für den Messpunkt „3_HT2_3x“ kann der Abbildung 5.12 entnommen werden. Der Verlauf der EFL weist auf eine deutliche Durchlaufträgercharakteristik hin.

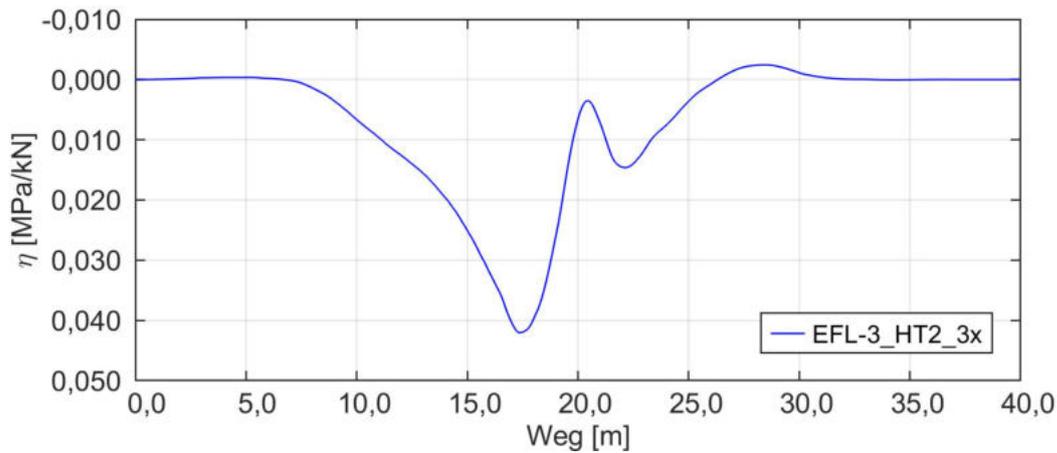


Abbildung 5.12: Einflusslinie Hauptträger Brücke 1 resultierend aus Fahrt „Test_069“

Tabelle 5.2: Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Hauptträger Brücke 1

Hauptträger 2 (Messschnitt 3) Brücke 1					
Größe	Einheit	3_HT2_1x	3_HT2_2x	3_HT2_3x	3_HT2_4x
Spannung LM 71	N/mm ²	-31,73	-44,57	37,83	43,11
Spannung Blz 6		-31,36	-40,07	36,58	39,49
maßg. Geschw.	km/h	80	45	10	80
maßg. dyn. Zuwachs	N/mm ²	-0,94	-0,86	2,24	0,74
maßg. dyn. Beiwert	–	1,07	1,04	1,16	1,04
$\Phi_{\text{obs,I}} = \frac{\sigma_{\text{LM71}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	–	1,03	1,02	1,06	1,02
$\Phi_{\text{obs,II}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	–	1,02	1,00	1,03	1,00
$\Phi_{\text{obs,III}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} \cdot (1 + \varphi(v))}{\sigma_{\text{LM71}}}$	–	1,06	1,00	1,12	1,00

Die unter Zuhilfenahme der Einflusslinien ermittelten, betragsmäßig größten Spannungen infolge LM 71 und dem maßgebenden ideellen Betriebslastenzug 6 sowie die maßgebenden Werte aus der vorherigen Tabelle sind in der Tabelle 5.2 aufgeführt. Die quasi-statischen Spannungen des LM 71 übersteigen an allen vier Messpunkten die Spannungen des Betriebslastenzuges 6. Im maßgebenden Messpunkt „3_HT2_3x“ betragen die Spannungen infolge LM 71 $\sigma_{\text{LM71}} = 37,83 \text{ N/mm}^2$ und infolge des Betriebslastenzugs 6 $\sigma_{\text{Blz6}} = 36,58 \text{ N/mm}^2$. Im unteren Teil der Tabelle werden die

Schwingfaktoren der drei Berechnungsvarianten aufgelistet, die sich aus den Eingangsgößen im oberen Tabellenabschnitt ergeben. In allen drei Fällen wird der Schwingfaktor von 1,03 bis 1,12 im Messpunkt „3_HT2_3x“ maßgebend.

Längsträger

Im Folgenden liegt der Fokus auf den Ergebnissen des Längsträgers im Messschnitt 2 der Brücke 1. Die Messungen des Längsträgers wurden nur an dieser einen Messstelle durchgeführt.

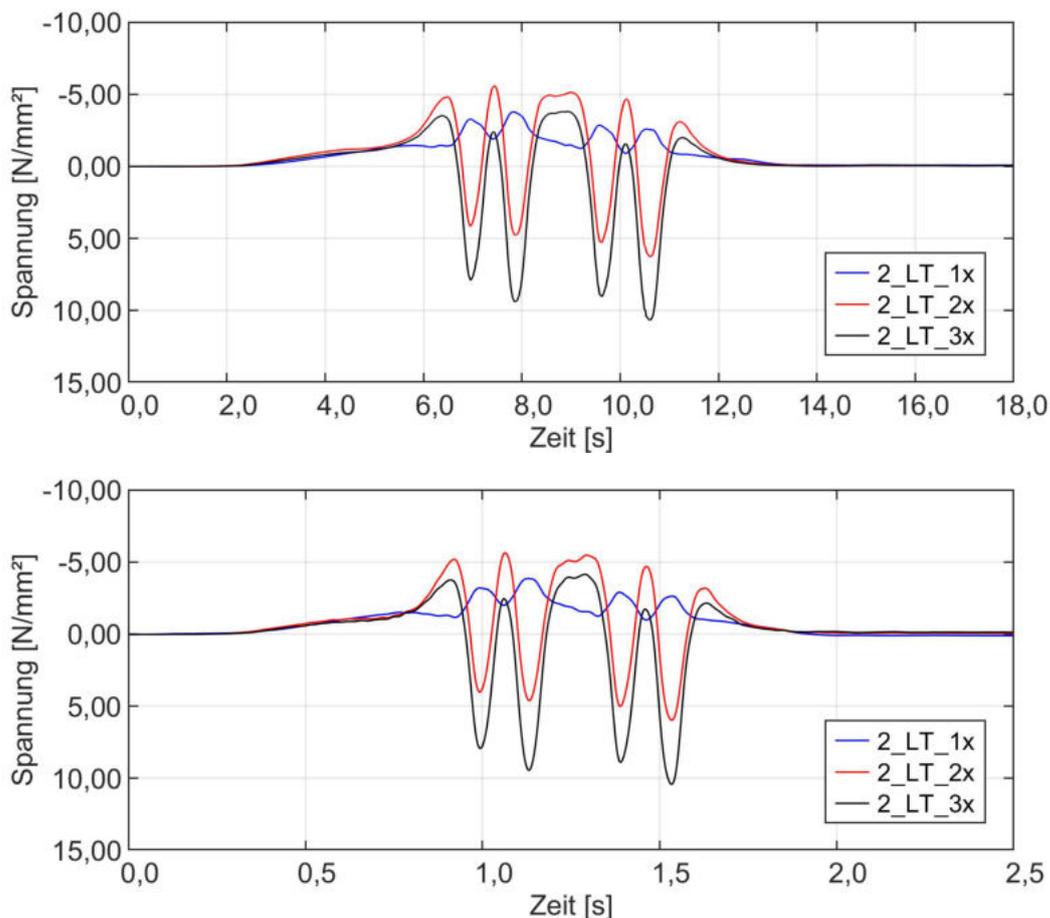


Abbildung 5.13: Spannungen am Längsträger Brücke 1 infolge der Belastungslok, $v = 10 \text{ km/h}$ (oben) und $v_{\max} = 80 \text{ km/h}$ (unten)

Sämtliche Spannungsverläufe der Messpunkte des Längsträgers im Messschnitt 2 werden in Abbildung 5.13 in einem Diagramm aufgetragen. Der Untergurt, wo sich die Messpunkte „2_LT_2x“ und „2_LT_3x“ befinden, wird auf Zug beansprucht. Hier wirken maximale mittlere Zugspannungen von $\sigma = 10,4 \text{ N/mm}^2$ bei $v = 10 \text{ km/h}$ und von $\sigma = 10,2 \text{ N/mm}^2$ bei $v = 80 \text{ km/h}$. Die unterschiedlichen Amplituden der beiden Messpunkte am Untergurt sind eine Konsequenz der räumlichen Beanspruchung des

Längsträgers. Die Beanspruchung auf Biegung um die schwache Trägerachse sowie die Torsionsbeanspruchung können in der Realität nicht ausgeschlossen werden. Der Messpunkt „2_LT_1x“ befindet sich am Steg und ist ohne Extrapolation nur bedingt aussagekräftig. Zudem lässt sich ein beidseitiger Einspanneffekt durch die Vorzeichenwechsel feststellen.

In der Tabelle 5.3 sind die dynamischen Zuwächse und die dazugehörigen dynamischen Beiwerte $1 + \varphi$ des Längsträgers über alle Geschwindigkeitsstufen aufgelistet. Aufgrund der betragsmäßig geringen Spannungen an den anderen Messpunkten wird nur der Messpunkt „2_LT_3x“ ausgewertet. Dort resultiert ein dynamischer Beiwert von 1,18 bei einer Fahrgeschwindigkeit von $v = 10$ km/h unter einem dynamischen Spannungszuwachs von $1,68$ N/mm². Zudem ist zu beobachten, dass sich hier mit steigender Geschwindigkeit der Einfluss der Dynamik auf den Spannungszuwachs verringert.

Tabelle 5.3: Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungslök am Längsträger Brücke 1

Längsträger (Messschnitt 2) Brücke 1				
dynamischer Effekt	Geschwindigkeit	2_LT_1x	2_LT_2x	2_LT_3x
dynamischer Zuwachs in N/mm ²	10 km/h	—	—	1,68
	45 km/h	—	—	1,19
	80 km/h	—	—	0,82
	maßgeb.	—	—	1,68
dynamischer Beiwert in –	10 km/h	—	—	1,18
	45 km/h	—	—	1,12
	80 km/h	—	—	1,09
	maßgeb.	—	—	1,18

Die Abbildung 5.14 zeigt die Spannungseinflusslinie für den Messpunkt „2_LT_3x“. In dem Kurvenverlauf spiegelt sich ebenfalls die beidseitige Durchlaufwirkung durch den Vorzeichenwechsel wider.

Die Schwingfaktoren mit ihren zugehörigen Eingangsgrößen sind in der Tabelle 5.4 enthalten. Auf Basis der Spannungseinflusslinie ergeben sich die betragsmäßig größten Spannungen infolge LM 71 $\sigma_{LM71} = 16,18$ N/mm² und dem maßgebenden ideellen Betriebslastenzug 1 $\sigma_{Blz1} = 13,20$ N/mm² im Untergurt. Hierbei ist die Spannung des

LM 71 größer als der Betriebslastenzug 1. Wegen fehlender Vergleichswerte werden die Schwingfaktoren im Messpunkt „2.LT_3x“ als maßgebend angenommen.

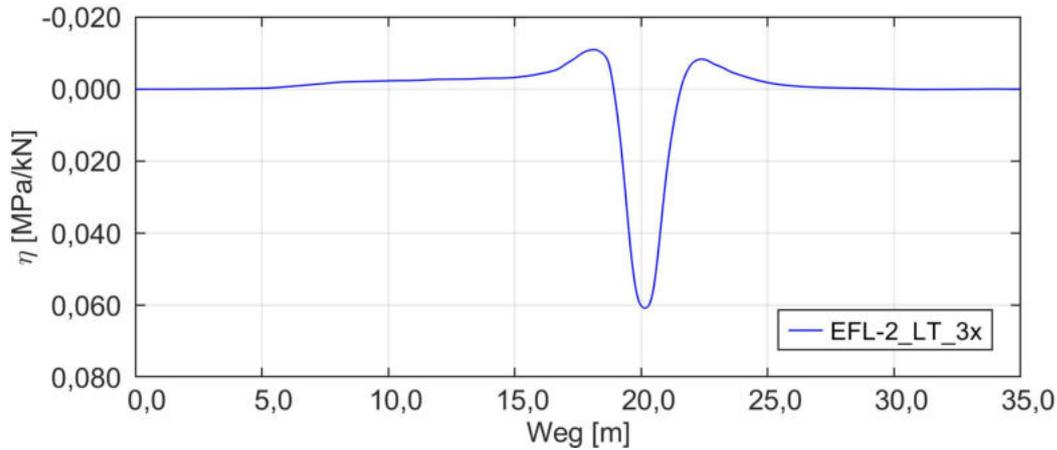


Abbildung 5.14: Einflusslinie Längsträger Brücke 1 resultierend aus Fahrt „Test_069“

Tabelle 5.4: Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Längsträger Brücke 1

Längsträger (Messschnitt 2) Brücke 1				
Größe	Einheit	2.LT_1x	2.LT_2x	2.LT_3x
Spannung LM 71	N/mm ²	—	—	16,18
Spannung Blz 1		—	—	13,20
maßg. Geschw.	km/h	—	—	10
maßg. dyn. Zuwachs	N/mm ²	—	—	1,68
maßg. dyn. Beiwert	—	—	—	1,18
$\Phi_{\text{obs,I}} = \frac{\sigma_{\text{LM71}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	—	—	—	1,10
$\Phi_{\text{obs,II}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	—	—	—	1,00
$\Phi_{\text{obs,III}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} \cdot (1 + \varphi(v))}{\sigma_{\text{LM71}}}$	—	—	—	1,00

Querträger

Nachfolgend werden die Ergebnisse des Querträgers 2 im Messschnitt 3 erläutert. Aufgrund des sich dort ergebenden, ungünstigsten Schwingfaktors Φ_{obs} gelten die dargestellten Ergebnisse für sämtliche Querträger der Brücke 1.

Die Diagramme der Abbildung 5.15 umfassen jeweils alle Spannungsverläufe der betrachteten Messstelle. Die Messpunkte „3_QT2.2y“ und „3_QT2.3y“ gehören zum Untergurt und erfahren bei $v = 10 \text{ km/h}$ eine maximale mittlere Zugbeanspruchung von $\sigma = 22,1 \text{ N/mm}^2$ sowie bei $v = 80 \text{ km/h}$ von $\sigma = 21,6 \text{ N/mm}^2$. Die Abweichungen der beiden Messpunkte zueinander sind auf das räumliche Tragverhalten des Trägers zurückzuführen. Angesichts der sehr geringen Druckspannungen befindet sich der Messpunkt „3_QT2.1y“ im Steg in der Nähe der neutralen Faser und wird daher nicht ausgewertet.

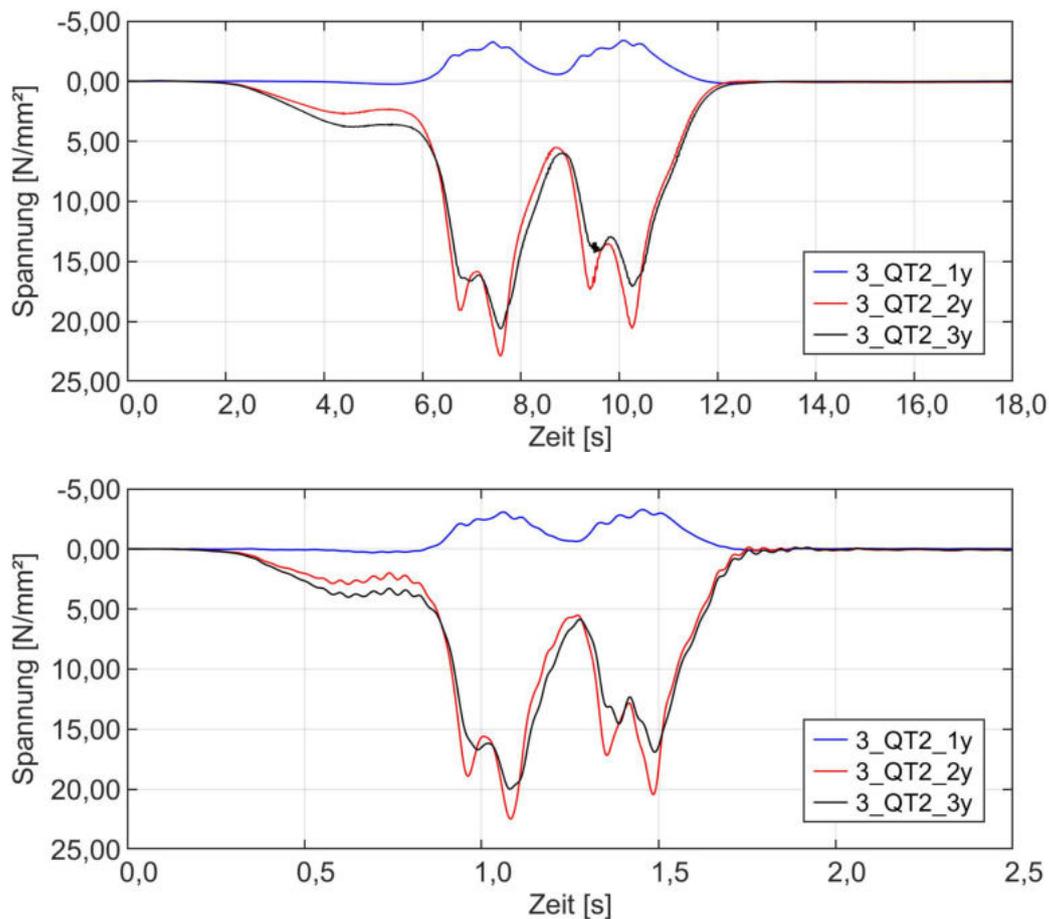


Abbildung 5.15: Spannungen am Querträger Brücke 1 infolge der Belastungslök, $v = 10 \text{ km/h}$ (oben) und $v_{\text{max}} = 80 \text{ km/h}$ (unten)

Die dynamischen Zuwächse und die dazugehörigen dynamischen Beiwerte $1 + \varphi$ über alle Geschwindigkeitsstufen sind in der Tabelle 5.5 zusammengestellt. Der größte dynamische Beiwert von 1,22 ergibt sich dabei am Messpunkt „3_QT2.2y“ unter $v = 10 \text{ km/h}$ bei einem dynamischen Spannungszuwachs von $4,41 \text{ N/mm}^2$. Weiterhin ist eine Verringerung des dynamischen Spannungszuwachses bzw. des dynamischen Beiwertes bei zunehmender Geschwindigkeit zu erkennen.

Tabelle 5.5: Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungslök am Querträger Brücke 1

Querträger 2 (Messschnitt 3) Brücke 1				
dynamischer Effekt	Geschwindigkeit	3_QT2_1y	3_QT2_2y	3_QT2_2y
dynamischer Zuwachs in N/mm ²	10 km/h	—	4,41	2,14
	45 km/h	—	3,13	1,63
	80 km/h	—	2,68	0,90
	maßgeb.	—	4,41	2,14
dynamischer Beiwert in –	10 km/h	—	1,22	1,11
	45 km/h	—	1,16	1,08
	80 km/h	—	1,13	1,05
	maßgeb.	—	1,22	1,11

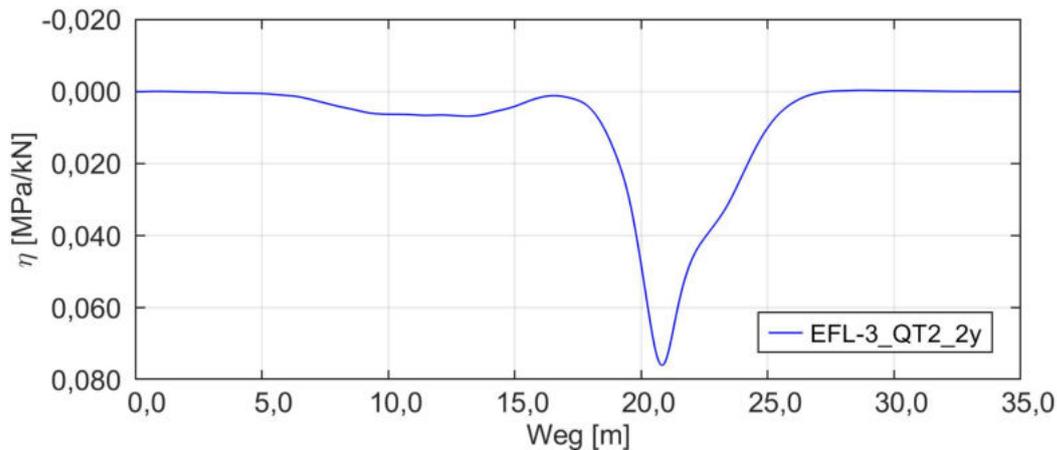


Abbildung 5.16: Einflusslinie Querträger Brücke 1 resultierend aus Fahrt „Test_069“

Die Spannungseinflusslinie für den maßgebenden Messpunkt „3_QT2_2y“ ist in der Abbildung 5.16 dargestellt. Aus der vorliegenden Einflusslinie lässt sich eine Durchlaufwirkung ableiten. Im linken Teil der EFL ist eine globale Biegung erkennbar. Der starke Knick im mittleren Bereich des Diagramms bildet die lokale Biegung ab.

Die im oberen Teil der Tabelle 5.6 aufgeführten maßgebenden Spannungen infolge LM 71 $\sigma_{LM71} = 46,18 \text{ N/mm}^2$ und dem ungünstigsten ideellen Betriebslastenzug 6 $\sigma_{Blz6} = 40,48 \text{ N/mm}^2$ des Messpunktes „3_QT2_2y“ werden auf der Grundlage der gezeigten Einflusslinie berechnet. An der betrachteten Messstelle sind die Spannungen aus dem Lastmodell 71 stets größer als aus dem Betriebslastenzug 6.

Die Ermittlung der Schwingfaktoren erfolgt mithilfe der in Tabelle 5.6 enthaltenen Eingangsgrößen. Alle drei untersuchten Berechnungsvarianten des Schwingfaktors erreichen im Messpunkt „3_QT2.2y“ ihren Maximalwert, der bis zu 1,10 beträgt.

Tabelle 5.6: Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Querträger Brücke 1

Querträger 2 (Messschnitt 3) Brücke 1				
Größe	Einheit	3_QT2.1y	3_QT2.2y	3_QT2.3y
Spannung LM 71	N/mm ²	—	46,18	42,38
Spannung Blz 6		—	40,48	37,65
maßg. Geschw.	km/h	—	10	10
maßg. dyn. Zuwachs	N/mm ²	—	4,41	2,14
maßg. dyn. Beiwert	—	—	1,22	1,11
$\Phi_{\text{obs,I}} = \frac{\sigma_{\text{LM71}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	—	—	1,10	1,05
$\Phi_{\text{obs,II}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	—	—	1,00	1,00
$\Phi_{\text{obs,III}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} \cdot (1 + \varphi(v))}{\sigma_{\text{LM71}}}$	—	—	1,07	1,00

Endquerträger

Im Weiteren werden die Ergebnisse des Endquerträgers 4 im Messschnitt 1 erläutert. Da hier der maximale Schwingfaktor Φ_{obs} auftritt, lassen sich die Ergebnisse auf alle Endquerträger der Brücke 1 übertragen.

Die Abbildung 5.17 zeigt die Spannungs-Zeit-Diagramme infolge der Überfahrt der Belastungslok für die betrachtete Messstelle. Am Untergurt, an dem die Messpunkte „1_EQT4.2y“ und „1_EQT4.3y“ angebracht sind, wirken im Mittel maximale Zugspannungen in Höhe $\sigma = 21,5 \text{ N/mm}^2$ mit der Geschwindigkeit $v = 10 \text{ km/h}$ und $\sigma = 20,7 \text{ N/mm}^2$ mit $v = 80 \text{ km/h}$. Wie bereits zuvor beim Querträger lassen sich auch hier aus dem räumlichen Lastabtrag die Abweichungen der beiden Messpunkte zueinander ableiten. Der Vorzeichenwechsel zu Beginn des Spannungsverlaufs deutet auf einen Einspanneffekt hin. Aufgrund der mangelnden Zugänglichkeit wurde der Messpunkt „1_EQT4.1y“ am Steg appliziert und bleibt daher ohne eine Extrapolation in der Ergebnisbetrachtung unberücksichtigt.

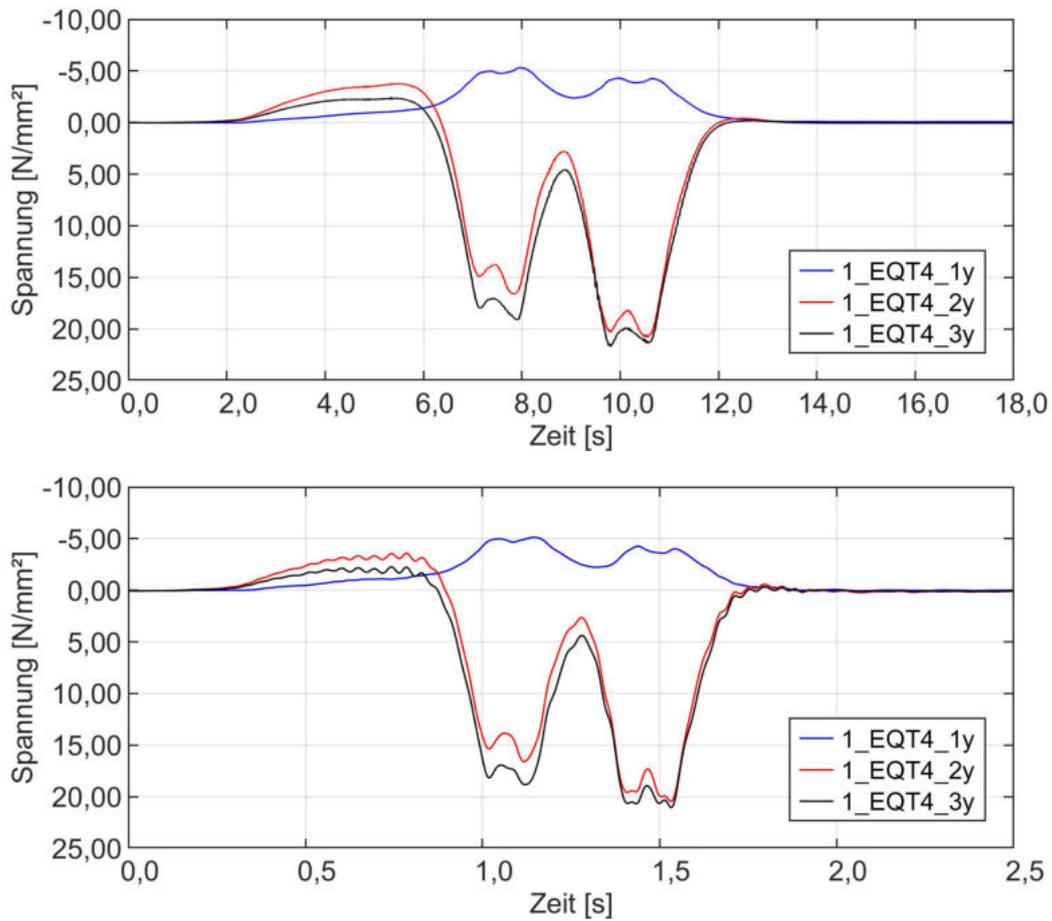


Abbildung 5.17: Spannungen am Endquerträger Brücke 1 infolge der Belastungslok, $v = 10 \text{ km/h}$ (oben) und $v_{\max} = 80 \text{ km/h}$ (unten)

Tabelle 5.7: Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungslok am Endquerträger Brücke 1

Endquerträger 4 (Messschnitt 1) Brücke 1				
dynamischer Effekt	Geschwindigkeit	1_EQT4_1y	1_EQT4_2y	1_EQT4_3y
dynamischer Zuwachs in N/mm^2	10 km/h	—	4,57	0,55
	45 km/h	—	2,84	0,37
	80 km/h	—	2,83	0,06
	maßgeb.	—	4,57	0,55
dynamischer Beiwert in —	10 km/h	—	1,26	1,03
	45 km/h	—	1,16	1,02
	80 km/h	—	1,16	1,00
	maßgeb.	—	1,26	1,03

Die Entwicklung der dynamischen Zuwächse $\Delta\sigma$ und die jeweils zugehörigen dynamischen Beiwerte $1 + \varphi$ über alle Geschwindigkeitsstufen werden in Tabelle 5.7 dargestellt. Der maximale dynamische Beiwert am Messpunkt „1_EQT4_2y“ beträgt 1,26 bei einer Fahrgeschwindigkeit von $v = 10$ km/h einhergehend mit einem dynamischen Spannungszuwachs von $4,57$ N/mm². Bei den höheren Geschwindigkeitsstufen dieses Messpunktes reduziert sich die dynamische Beanspruchung.

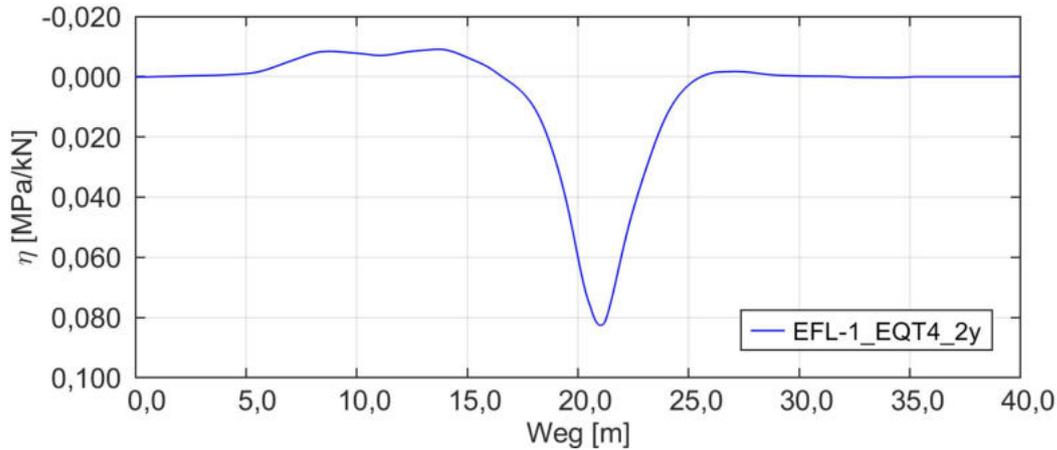


Abbildung 5.18: Einflusslinie Endquerträger Brücke 1 resultierend aus Fahrt „Test_069“

Tabelle 5.8: Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Endquerträger Brücke 1

Endquerträger 4 (Messschnitt 1) Brücke 1				
Größe	Einheit	1_EQT4_1y	1_EQT4_2y	1_EQT4_3y
Spannung LM 71	N/mm ²	—	44,93	49,63
Spannung Blz 6		—	38,07	42,82
maßg. Geschw.	km/h	—	10	10
maßg. dyn. Zuwachs	N/mm ²	—	4,57	0,55
maßg. dyn. Beiwert	—	—	1,26	1,03
$\Phi_{\text{obs,I}} = \frac{\sigma_{\text{LM71}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	—	—	1,10	1,01
$\Phi_{\text{obs,II}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	—	—	1,00	1,00
$\Phi_{\text{obs,III}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} \cdot (1 + \varphi(v))}{\sigma_{\text{LM71}}}$	—	—	1,07	1,00

Die Spannungseinflusslinie für den maßgebenden Messpunkt „1_EQT4_2y“ ist in dem Diagramm der Abbildung 5.18 aufgetragen. In dem Kurvenverlauf dieser spiegelt sich ebenfalls die geringe einseitige Durchlaufwirkung durch den Vorzeichenwechsel wider. Vordergründig zeigt sich in der Einflusslinie jedoch ein Einfeldsystem.

Aus der Einflusslinie lassen sich die maßgebenden Spannungen infolge LM 71 und dem ungünstigsten ideellen Betriebslastenzug 6 bestimmen, die in der Tabelle 5.8 angegeben sind. Die Spannungen aus dem Lastmodell 71 übersteigen die Spannungen aus dem Betriebslastenzug 6 in beiden Messpunkten. Für den maßgebenden Messpunkt ergibt sich dabei $\sigma_{LM71} = 44,93 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_{Blz6} = 38,07 \text{ N/mm}^2$. Im unteren Teil der Tabelle 5.8 sind die ermittelten Schwingfaktoren aufgeführt, wobei sich die ungünstigsten Werte für den Messpunkt „1_EQT4_2y“ ergeben.

Zusammenfassung

Zusammenfassend werden die maßgebenden bauteilspezifischen Schwingfaktoren für die Brücke 1 in der Tabelle 5.9 dargestellt. Die aus den Messwerten ermittelten Schwingfaktoren Φ_{obs} erstrecken sich über den Bereich von 1,00 bis 1,12. Der nach DIN EN 1991-2 bzw. DIN EN 1991-2/NA ermittelte Schwingfaktor Φ_{cal} unter Annahme sorgfältig instand gehaltener Gleise wird den messwertgestützten Schwingfaktoren Φ_{obs} gegenübergestellt. Die Berechnung des Schwingfaktors gemäß Norm ist im Anhang 1 - F zu finden.

Tabelle 5.9: Maßgebende bauteilbezogene Schwingfaktoren der Brücke 1

maßgebender bauteilbezogener Schwingfaktor Brücke 1					
Schwingfaktor	Einheit	HT	LT	QT	EQT
$\Phi_{\text{obs,I}} = \frac{\sigma_{LM71} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{LM71}}$	–	1,06	1,10	1,10	1,10
$\Phi_{\text{obs,II}} = \frac{\sigma_{Blz} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{LM71}}$	–	1,03	1,00	1,00	1,00
$\Phi_{\text{obs,III}} = \frac{\sigma_{Blz} \cdot (1 + \varphi(v))}{\sigma_{LM71}}$	–	1,12	1,00	1,07	1,07
$\Phi_{\text{cal}} = \frac{1,44}{\sqrt{L_{\Phi} - 0,2}} + 0,82$	–	1,29	1,55	1,45	1,45

5.2 Brücke 2

5.2.1 Bauwerksbeschreibung

Die zu untersuchende Eisenbahnüberführung ist in drei Streckenteilbauwerke (STB) gegliedert, welche jeweils drei Öffnungen besitzen. Die Konstruktion des STB 1 besteht aus einem Fachwerk und wurde bereits stillgelegt. Dementsprechend wird dieses im Weiteren nicht betrachtet. Die STB 2 und 3 sind eingleisig ausgeführt und als geschweißte Vollwandträger in Verbindung mit einer offenen Fahrbahn gebaut (siehe Abbildung 5.19). Alle drei STB sind insgesamt jeweils 153,816 m lang und in den Drittelpunkten gestützt, sodass die Länge der Öffnungen 51,272 m beträgt.



Abbildung 5.19: Ansicht der Brücke 2 (oben: Öffnung 1+2; unten: Öffnung 3)

Auf dem oberen Bild der Abbildung 5.19 ist die erste und zweite Öffnung, ein Widerlager sowie beide Pfeiler zu erkennen und im unteren Bild die dritte Öffnung sowie das andere Widerlager. Zudem befindet sich das STB 3 im Vordergrund der Ansicht in Abbildung 5.19. Der Abstand der Hauptträger zueinander beträgt 4,20 m und der Abstand der Querträger 3,944 m. Die Längsträger sind 1,35 m vom jeweiligen Hauptträger entfernt. In der Abbildung 5.20 ist der Pfeiler 1 dargestellt, während im Vordergrund das STB 3 und im Hintergrund die Fachwerkkonstruktion (STB 1) zu sehen ist.



Abbildung 5.20: Ansicht Brücke 2 (Pfeiler 1)

Die vorgenommenen Messungen am STB 3 dienen der Überprüfung der durchgeführten Instandsetzungs- und Sanierungsarbeiten. Im Zuge dessen wurde ebenfalls das statische sowie dynamische Verhalten bewertet.

5.2.2 Lage und Bezeichnung der Messschnitte

In Vorbereitung auf die Messungen am Überbau 2 der Brücke 2 werden vier Messschnitte festgelegt. Die Lage der Messschnitte ist in Abbildung 5.21 verortet. Um eine eindeutige Zuordnung zu ermöglichen, werden die Messschnitte wie folgt lokalisiert und durch die folgenden Bauteile gekennzeichnet:

- Messschnitt I: keine Dehnungsmessung, daher im Weiteren vernachlässigt
- Messschnitt II: LT in Trägermitte zur mittleren Öffnung hin
- Messschnitt III: Zuglaschen zwischen HT und Widerlager, QT 1
- Messschnitt IV: HT Ober- und Untergurt (sowie an jedem HT eine Diagonalbrücke zur Messung reiner Normaldehnung)

5.2.3 Lage und Bezeichnung der Messpunkte

Nachfolgend werden die Dehnungsmesspunkte der einzelnen Messschnitte abgebildet.

Messschnitt II

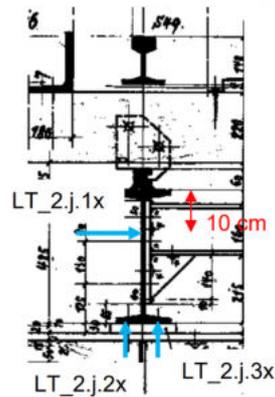


Abbildung 5.22: Lage und Bezeichnung der Messpunkte auf dem LT im Messschnitt II der Brücke 2

An den Längsträgern werden drei DMS angeordnet, davon zwei am Untergurt und einer am Steg. Je Längsträger werden somit drei Messkanäle erzeugt. Die drei Messpunkte sind in der Abbildung 5.22 dargestellt. Bei zwei Längsträgern entstehen sechs Messpunkte.

Messschnitt III

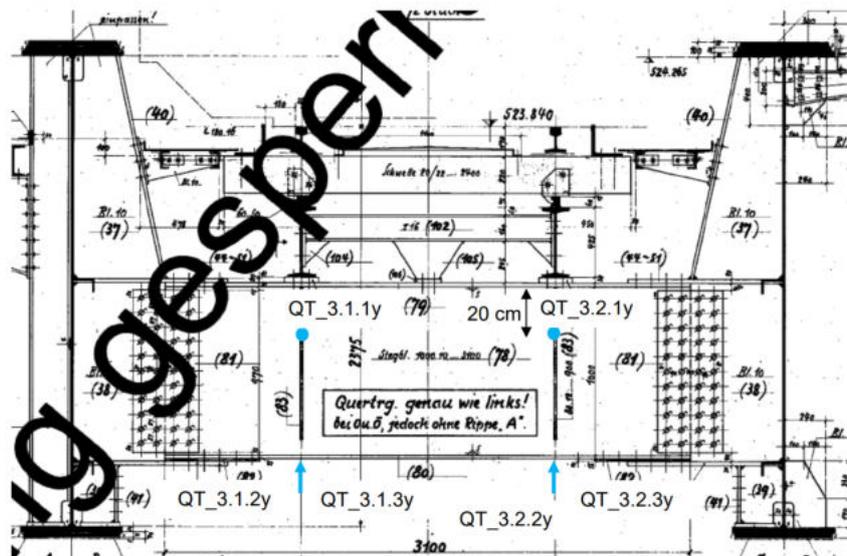


Abbildung 5.23: Lage und Bezeichnung der Messpunkte auf dem QT im Messschnitt III der Brücke 2

Am Querträger 1 werden unter beiden Schienen jeweils drei DMS angebracht. Zwei der DMS befinden sich am Untergurt und einer am Steg, wie in Abbildung 5.7 gezeigt. Daraus resultieren sechs Messpunkte in diesem Messschnitt.

Messschnitt IV

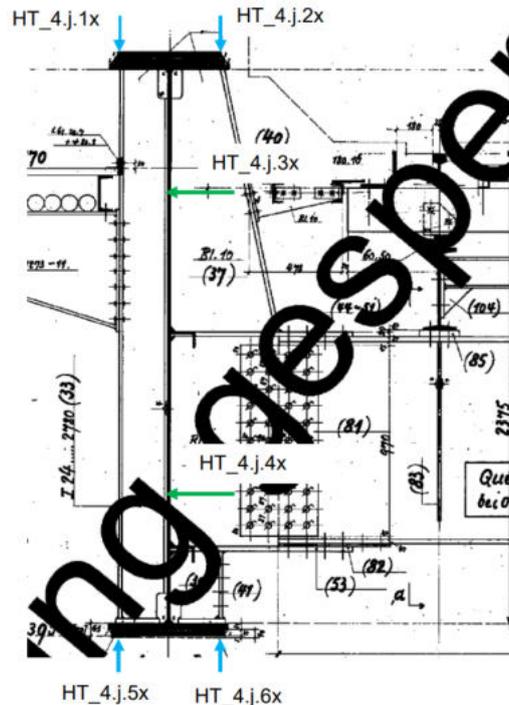


Abbildung 5.24: Lage und Bezeichnung der Messpunkte auf dem HT im Messschnitt IV der Brücke 2

Gemäß der Abbildung 5.24 werden an beiden Hauptträgern je zwei DMS am Ober- sowie am Untergurt appliziert. Die Messpunkte „HT_4.1.3x“ und „HT_4.1.4x“ sowie „HT_4.2.3x“ und „HT_4.2.4x“ am Steg dienen zur Erfassung der reinen Normaldehnung. Insgesamt umfasst der Messschnitt IV demnach 12 Messpunkte.

5.2.4 Verkehrslasten

Im Rahmen der veranlassten Messungen wird die Brücke 2 durch Überfahrten einer 4-achsigen Lokomotive in unterschiedlichen, definierten Geschwindigkeitsstufen belastet. Die Geschwindigkeitsstufen sollen hierbei $v = 10$ km/h, $v = 50$ km/h, sowie $v = 80$ km/h betragen. Die Belastungslok ist wie zuvor bei Brücke 1 eine Diesellokomotive der DB der Baureihe 218 mit der Bezeichnung „BR218-191-50“. In Abbildung 5.25 ist die Belastungslok mit ihren zugehörigen Achslasten und Achsabständen nochmals dargestellt.

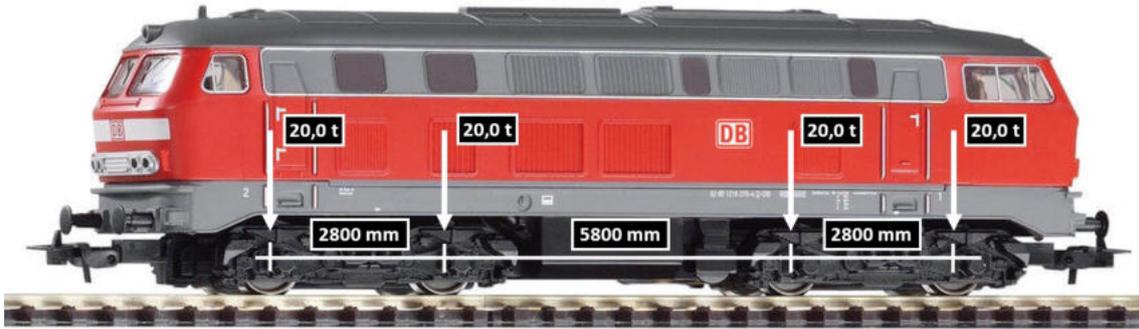


Abbildung 5.25: Belastungslok BR218 der DB mit ihren Achslasten und Achsabständen – Bildquelle: <https://tinyurl.com/2xbuqmk>

Die erfassten Messfahrten bilden die Grundlage für die Ermittlung der messwertgestützten Einflusslinien sowie der dynamischen Beiwerte und Zuwächse. Die statistische Auswertung der Daten verlangt dabei mindestens vier Messungen je Geschwindigkeitsstufe.

5.2.5 Ermittlung und Prüfung der Fahrgeschwindigkeiten

Die Fahrgeschwindigkeiten der Belastungslok werden gemäß des Abschnittes 4.2 untersucht und bewertet. Die Auswertung erfolgt mithilfe von Excel und ist dem Anhang 2 - A zu entnehmen.

Für die Geschwindigkeitsstufe $v = 10$ km/h werden nur Messfahrten mit einer maximalen Differenz Δv von bis zu 1,0 km/h verwendet. Fünf Messfahrten erfüllen die Bedingung. Unter diesen tritt eine maximale Differenz von $\Delta v = 0,29$ km/h bei einem relativen Fehler von $f = 2,09$ %. Alle weiteren Fahrten finden keine Berücksichtigung. Aufgrund der Durchschnittsgeschwindigkeiten, die zwischen 13 km/h und 14 km/h liegen, wird die Messreihe zu $v = 15$ km/h korrigiert.

Aufgrund der stark schwankenden Geschwindigkeiten wird eine Unterteilung der Messreihe $v = 50$ km/h in $v = 35$ km/h, $v = 50$ km/h und $v = 55$ km/h erforderlich. Die Geschwindigkeitsstufen $v = 35$ km/h und $v = 50$ km/h müssen jedoch entfallen, da hier die Mindestanzahl der benötigten Testfahrten unterschritten wird. Von der Geschwindigkeitsstufe $v = 55$ km/h werden drei Messfahrten mit einer Differenz Δv von bis zu 1,13 km/h mit einem zugehörigen relativen Fehler f von 1,96 % berücksichtigt. Anzumerken ist jedoch, dass die geringe Anzahl von drei Testfahrten nicht optimal für die statistische Auswertung ist.

Die Messreihe $v = 80$ km/h wird zu $v = 75$ km/h korrigiert. Sämtliche Messfahrten sind von guter Qualität mit einer Differenz Δv von ca. 2 km/h bei einem relativen Fehler von unter 3 %. Eine der Fahrten wird aufgrund ihrer zu geringen Durch-

schnittsgeschwindigkeit verworfen.

Somit resultieren für die Brücke 2 die folgenden Geschwindigkeitsstufen mit entsprechend zugehöriger Anzahl der Messfahrten, die im Folgenden für die Auswertung verwendet werden:

$v = 15 \text{ km/h}$	5 Messfahrten
$v = 55 \text{ km/h}$	3 Messfahrten
$v = 75 \text{ km/h}$	5 Messfahrten

5.2.6 Analyse und Verarbeitung der Messdaten

Dieser Abschnitt umfasst eine kompakte Darstellung der Datenverarbeitung und Auswertung einschließlich der spezifischen Merkmale der betrachteten Brücke.

Ermittlung der Spannungen

Zur Bestimmung der Spannungen aus den gemessenen Dehnungen wird bei allen Messreihen ein Nullabgleich mit den ersten 200 Datenpunkten durchgeführt sowie ein Tiefpassfilter mit der Messfrequenz 1200 Hz und Grenzfrequenz 20 Hz angewendet. Das Ergebnis dieser Bearbeitung ist eine Verminderung des Oszillierens und ein Auslaufen der Messkurve auf näherungsweise Null.

Statistische Bewertung der Messdaten

In der Messreihe $v = 15 \text{ km/h}$ kommt es an den Messpunkten am Längsträger zu höheren relativen Fehlern von bis zu 18,5 %. Auch die Messreihe $v = 55 \text{ km/h}$ weist an den Längsträgern ähnlich hohe relative Fehler von bis zu 10,5 % auf. Dies kann an der geringen Beanspruchung liegen, denn die übrigen Messpunkte überschreiten in allen Geschwindigkeitsstufen einen relativen Fehler von $f = 5 \%$ nicht. Die statistische Auswertung der Spannungen erfolgt im Anhang 2 - B.

Bestimmung des dynamischen Zuwachses und Beiwertes

Für die Ermittlung der dynamischen Zuwächse und Beiwerte werden nur Spannungen, die größer als 10 N/mm^2 sind, berücksichtigt. Sämtliche Spannungen, die kleiner als der Grenzwert sind, werden nicht ausgewertet, um den Einfluss des Messrauschens zu minimieren. Hierzu ist der Anhang 2 - C heranzuziehen.

Messwertgestützte Spannungseinflusslinien

Die Spannungseinflusslinien für die Geschwindigkeitsstufe $v = 15$ km/h werden aus der Messfahrt „Fahrt037“ erzeugt. Die getroffene Auswahl dieser Fahrt ist dadurch begründet, dass die relevanten Spannungswerte überwiegend dem Durchschnitt entsprechen. Aufgrund der vielen Datenpunkte durch die hohe Abtastrate wird für die Erstellung der EFL die Anzahl der Datenpunkte der gewählten Fahrt auf 10.000 Stützstellen interpoliert. Die Rückrechnungen der Spannungen mithilfe der erstellten EFL führen zu guten bis sehr guten Übereinstimmungen. Jedoch tritt bei den EFL häufig ein starkes Oszillieren auf.

Bestimmung des messwertgestützten Schwingfaktors

Die betragsmäßig maximalen Spannungen des Lastmodells 71 sowie des maßgebenden Idealtyps werden im Anhang 2 - D ermittelt. Im überwiegenden Teil der Messpunkte wird der Betriebslastenzug 6 maßgebend, in wenigen anderen Punkten der Betriebslastenzug 3.

Die Schwingfaktoren werden anschließend anhand der Gleichungen (4.24), (4.25) und (4.26) für jeden ausgewerteten Messpunkt berechnet. Es folgt die bauteilspezifische Bestimmung des maßgebenden Schwingfaktors. Die Schwingfaktoren befinden sich im Anhang 2 - E. Die Ergebnisse der Auswertung werden im nachfolgenden Abschnitt präsentiert.

5.2.7 Ergebnisse der Messdatenauswertung

Hauptträger

Nachfolgend werden die Ergebnisse für den maßgebenden Hauptträger im Messschnitt IV präsentiert. Die Messungen des Hauptträgers wurden nur an dieser einen Messstelle durchgeführt. Der ungünstigste Wert, den der Schwingfaktor Φ_{obs} annimmt, entsteht am Hauptträger 1. Diese Ergebnisse gelten stellvertretend für alle Hauptträger dieser Brücke.

Die Spannungsverläufe sämtlicher Messpunkte am Hauptträger 1 im Messschnitt IV werden in der Abbildung 5.26 gezeigt. Wie bereits im Rahmen der Ergebnisauswertung von Brücke 2 erläutert, erfahren die Spannungen mit steigender Geschwindigkeit keinen signifikanten Spannungszuwachs. Dies wird aus der Tabelle 5.10 ersichtlich. Aus diesem Grund wird nur $v = 15$ km/h und $v_{\text{max}} = 75$ km/h dargestellt. Die Vorzeichenwechsel im Spannungsverlauf kennzeichnen die drei Öffnungen des Tragwerks (dreifeldriges Durchlaufsystem).

Des Weiteren sind die Kurvenverläufe der Spannungen an der horizontalen Achse in den Diagrammen gespiegelt. Die Messpunkte am Obergurt „HT_4.1.1x“ und „HT_4.1.2x“ entsprechen denen am Untergurt „HT_4.1.5x“ und „HT_4.1.6x“ mit umgekehrtem Vorzeichen. Am Obergurt wirken im Mittel minimale Druckspannungen von $\sigma = -21,4 \text{ N/mm}^2$ und am Untergurt maximale Zugspannungen von $\sigma = 25,1 \text{ N/mm}^2$ bei quasi-statischer Belastung. Die maximal untersuchte Geschwindigkeit $v_{\max} = 75 \text{ km/h}$ erzeugt am Obergurt $\sigma = -21,8 \text{ N/mm}^2$ und am Untergurt $\sigma = 26,0 \text{ N/mm}^2$ im Mittel. Die Spannungen des Messpunktes am Steg „HT_4.1.3x“ sind für den Schwingfaktor nicht von Bedeutung und bleiben deshalb in den Tabellen 5.10 sowie 5.11 unberücksichtigt.

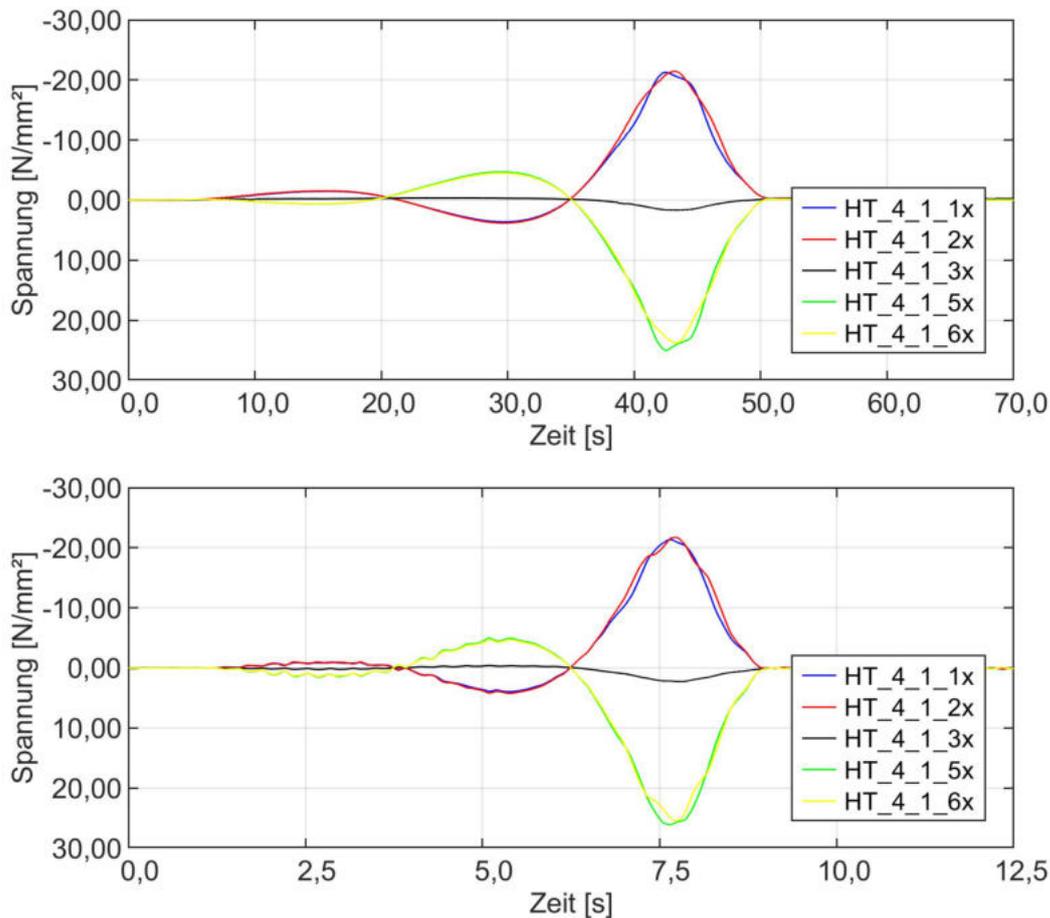


Abbildung 5.26: Spannungen am Hauptträger Brücke 2 infolge der Belastungslok, $v = 15 \text{ km/h}$ (oben) und $v_{\max} = 75 \text{ km/h}$ (unten)

Die Tabelle 5.10 bildet die dynamischen Zuwächse $\Delta\sigma$ und die dazugehörigen dynamischen Beiwerte $1 + \varphi$ über alle Geschwindigkeitsstufen ab. Der größte dynamische Beiwert beträgt 1,09 und ergibt sich am Messpunkt „HT_4.1.6x“ infolge der Loküberfahrt mit $v = 55 \text{ km/h}$ bei $\Delta\sigma = 2,06 \text{ N/mm}^2$.

Tabelle 5.10: Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungsllok am Hauptträger Brücke 2

Hauptträger 1 (Messschnitt IV) Brücke 2					
dynamischer Effekt	Geschwindigkeit	HT_4.1.1x	HT_4.1.2x	HT_4.1.5x	HT_4.1.6x
dynamischer Zuwachs in N/mm ²	15 km/h	-0,70	-0,58	0,58	0,42
	55 km/h	-0,74	-0,71	2,03	2,06
	75 km/h	-0,69	-0,84	1,35	1,87
	maßgeb.	-0,74	-0,84	2,03	2,06
dynamischer Beiwert in –	15 km/h	1,03	1,03	1,02	1,02
	55 km/h	1,04	1,03	1,08	1,09
	75 km/h	1,03	1,04	1,05	1,08
	maßgeb.	1,04	1,04	1,08	1,09

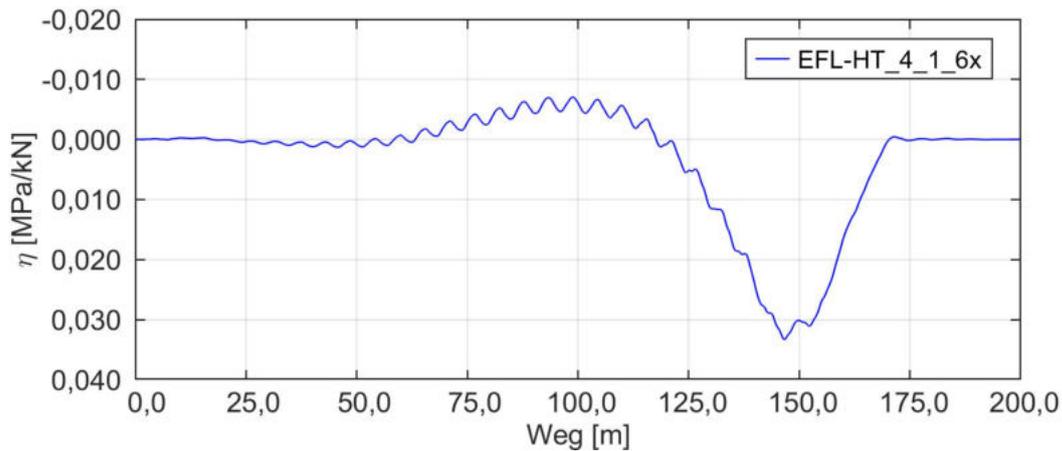


Abbildung 5.27: Einflusslinie Hauptträger Brücke 2 resultierend aus Fahrt „Fahrt037“

Die Spannungseinflusslinie für den maßgebenden Messpunkt „HT_4.1.6x“ ist der Abbildung 5.27 zu entnehmen. In Analogie zum Spannungsverlauf wechseln auch hier die Vorzeichen der Kurve, gleichbedeutend mit einer Durchlaufwirkung. Das Oszillieren der EFL stammt aus dem Ermittlungsverfahren nach BRAUNE.

Unter Zuhilfenahme der Einflusslinien werden die betragsmäßig größten Spannungen infolge LM 71 und dem maßgebenden ideellen Betriebslastenzug 6 ermittelt. Diese Spannungen sind zusammen mit den maßgebenden Werten aus vorheriger Tabelle in der Tabelle 5.2 aufgeführt. Die quasi-statischen Spannungen des LM 71 übersteigen

an allen vier Messpunkten die Spannungen des Betriebslastenzuges 6. Für den betrachteten Messpunkt „HT_4.1.6x“ betragen die Spannungen $\sigma_{LM71} = 86,13 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_{Blz6} = 83,52 \text{ N/mm}^2$. In der unteren Tabellenhälfte werden die Schwingfaktoren der drei Berechnungsvarianten aufgelistet, welche sich aus den Eingangsgrößen im oberen Tabellenabschnitt ergeben. In allen drei Varianten wird der Schwingfaktor im Messpunkt „HT_4.1.6x“ maßgebend. Hierfür ergibt sich ein Wert im Bereich von 1,00 bis 1,05.

Tabelle 5.11: Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Hauptträger Brücke 2

Hauptträger 1 (Messschnitt IV) Brücke 2					
Größe	Einheit	HT_4.1.1x	HT_4.1.2x	HT_4.1.5x	HT_4.1.6x
Spannung LM 71	N/mm ²	-83,75	-84,14	91,17	86,13
Spannung Blz 6		-75,05	-78,36	87,45	83,52
maßg. Geschw.	km/h	55	75	55	55
maßg. dyn. Zuwachs	N/mm ²	-0,74	-0,84	2,03	2,06
maßg. dyn. Beiwert	–	1,04	1,04	1,08	1,09
$\Phi_{\text{obs,I}} = \frac{\sigma_{LM71} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{LM71}}$	–	1,01	1,01	1,02	1,02
$\Phi_{\text{obs,II}} = \frac{\sigma_{Blz} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{LM71}}$	–	1,00	1,00	1,00	1,00
$\Phi_{\text{obs,III}} = \frac{\sigma_{Blz} \cdot (1 + \varphi(v))}{\sigma_{LM71}}$	–	1,00	1,00	1,04	1,05

Längsträger

Der Fokus dieses Abschnitts liegt auf den Ergebnissen des Längsträgers im Messschnitt II. Die Datenerfassung erfolgt lediglich in diesem einen Messschnitt.

Sämtliche Spannungsverläufe der Messpunkte am maßgebenden Längsträger 2 im Messschnitt II werden in Abbildung 5.28 dargestellt. Der Untergurt mit den Messpunkten „LT_2.2.2x“ und „LT_2.2.3x“ wird auf Zug beansprucht. Die beiden Spannungsverläufe sind nahezu deckungsgleich. Dabei wirken im Mittel maximale Zugspannungen von $\sigma = 21,5 \text{ N/mm}^2$ bei $v = 15 \text{ km/h}$ sowie $\sigma = 22,5 \text{ N/mm}^2$ bei $v = 75 \text{ km/h}$. Es lässt sich außerdem ein beidseitiger Einspanneffekt durch die Vorzeichenwechsel feststellen. Der Messpunkt „LT_2.2.1x“ befindet sich am Steg des Längsträgers und ist ohne Extrapolation nur bedingt aussagekräftig.

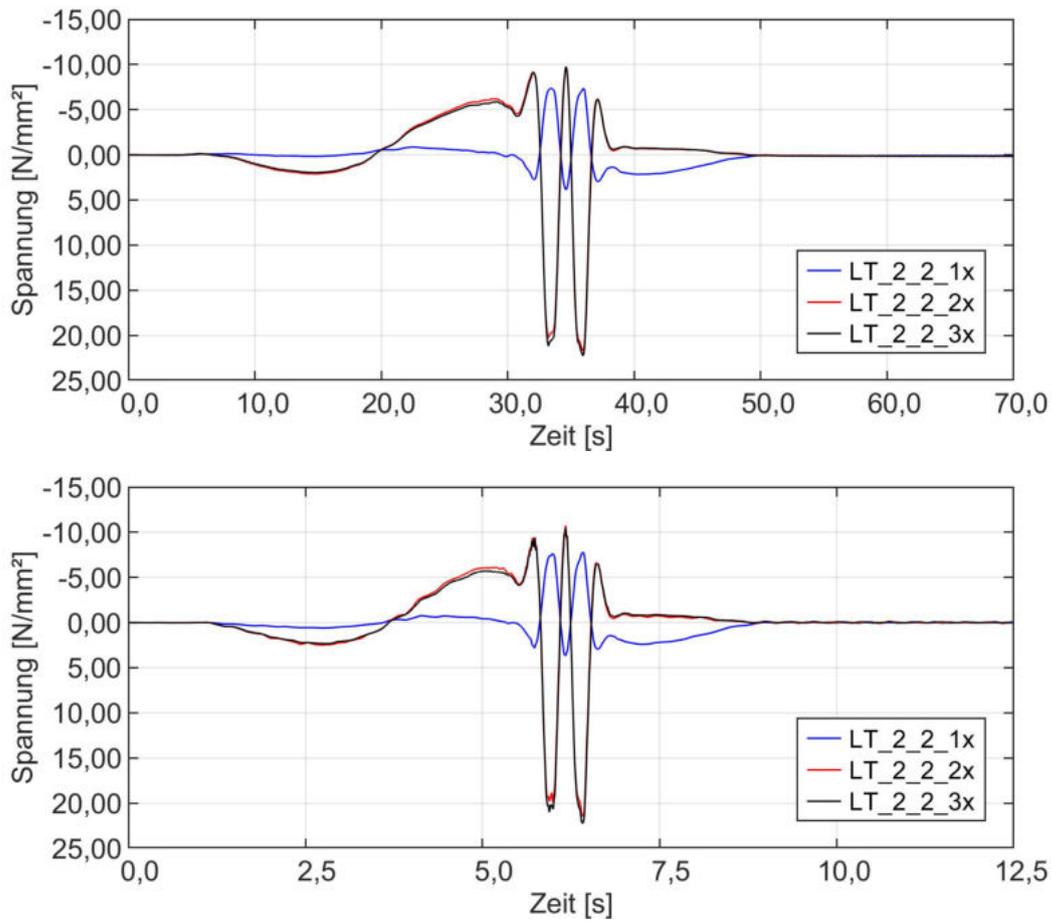


Abbildung 5.28: Spannungen am Längsträger Brücke 2 infolge der Belastungslok, $v = 15 \text{ km/h}$ (oben) und $v_{\max} = 75 \text{ km/h}$ (unten)

Tabelle 5.12: Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungslok am Längsträger Brücke 2

Längsträger 2 (Messschnitt 2) Brücke 2				
dynamischer Effekt	Geschwindigkeit	LT_2_2_1x	LT_2_2_2x	LT_2_2_3x
dynamischer Zuwachs in N/mm^2	15 km/h	—	-3,86	-3,43
	55 km/h	—	-4,38	-3,88
	75 km/h	—	-2,46	-2,35
	maßgeb.	—	-4,38	-3,88
dynamischer Beiwert in —	15 km/h	—	1,45	1,39
	55 km/h	—	1,51	1,44
	75 km/h	—	1,29	1,27
	maßgeb.	—	1,51	1,44

Grundsätzlich verkörpert der Untergurt des Längsträgers ein auf vorwiegend Zug beanspruchtes Bauteil, jedoch erfährt der Träger zusätzlich signifikante Druckbeanspruchungen. Die Auswertung der Schwingfaktoren für Druck liefert ungünstigere Ergebnisse als für Zug, sodass im Weiteren die Werte für die Druckbeanspruchung betrachtet werden.

In der Tabelle 5.12 sind die dynamischen Zuwächse $\Delta\sigma$ und die zugehörigen dynamischen Beiwerte $1 + \varphi$ des Längsträgers über alle Geschwindigkeitsstufen aufgelistet. Für den Messpunkt „LT_2_2_2x“ resultiert ein dynamischer Beiwert von 1,51 bei der Fahrgeschwindigkeit $v = 55 \text{ km/h}$ unter einem dynamischen Spannungszuwachs von $-4,38 \text{ N/mm}^2$. Zudem ist zu beobachten, dass hier mit steigender Geschwindigkeit der Einfluss der Dynamik auf den Spannungszuwachs zunächst ansteigt und sich dann wieder verringert.

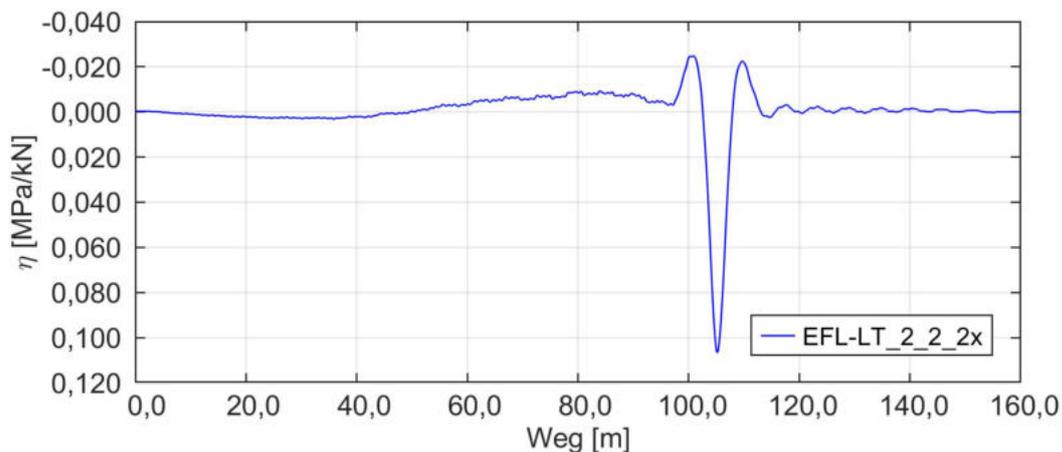


Abbildung 5.29: Einflusslinie Längsträger Brücke 2 resultierend aus Fahrt „Fahrt037“

Die Abbildung 5.29 zeigt die Spannungseinflusslinie für den Messpunkt „LT_2_2_2x“. In dem Kurvenverlauf spiegelt sich ebenfalls die beidseitige Durchlaufwirkung durch den Vorzeichenwechsel wider. Die Schwingfaktoren mit ihren zugehörigen Eingangsgrößen sind in der Tabelle 5.13 enthalten. Auf Basis der Spannungseinflusslinie ergeben sich die betragsmäßig größten Spannungen infolge LM 71 und dem maßgebenden ideellen Betriebslastenzug 3. Hierbei sind die Spannung des Betriebslastenzuges 3 größer als die des LM 71. Am maßgebenden Messpunkt „LT_2_2_2x“ resultieren Spannungen von $\sigma_{LM71} = -43,11 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_{Blz3} = -44,17 \text{ N/mm}^2$ sowie Schwingfaktoren von 1,10 bis 1,55 je nach Vorgehensweise bei der Berechnung.

Tabelle 5.13: Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Längsträger Brücke 2

Längsträger 2 (Messschnitt II) Brücke 2				
Größe	Einheit	LT_2.2.1x	LT_2.2.2x	LT_2.2.3x
Spannung LM 71	N/mm ²	—	-43,11	-41,51
Spannung Blz 3		—	-44,17	-42,80
maßg. Geschw.	km/h	—	55	55
maßg. dyn. Zuwachs	N/mm ²	—	-4,38	-3,88
maßg. dyn. Beiwert	—	—	1,51	1,48
$\Phi_{\text{obs,I}} = \frac{\sigma_{\text{LM71}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	—	—	1,10	1,09
$\Phi_{\text{obs,II}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	—	—	1,13	1,12
$\Phi_{\text{obs,III}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} \cdot (1 + \varphi(v))}{\sigma_{\text{LM71}}}$	—	—	1,55	1,48

Querträger

Nachfolgend werden die Ergebnisse des Querträgers 1 im Messschnitt III erläutert. Die Applikation der DMS erfolgte nur an diesem einen Querträger im Messschnitt III unter beiden Schienen, wodurch sich zwei Messstellen ergeben. Der dort resultierende, ungünstigste Schwingfaktor Φ_{obs} gilt für sämtliche Querträger der Brücke 2.

Die Diagramme der Abbildung 5.30 umfassen jeweils alle Spannungsverläufe der betrachteten Messstelle für $v = 15$ km/h und $v_{\text{max}} = 75$ km/h. Die Messpunkte „QT_3.1.2y“ und „QT_3.1.3y“ gehören zum Untergurt und erfahren dementsprechend eine maximale Zugbeanspruchung im Mittel von $\sigma = 38,4$ N/mm² bei $v = 15$ km/h sowie $\sigma = 39,4$ N/mm² bei $v = 75$ km/h. Die sehr geringen Abweichungen der beiden Messpunkte zueinander lassen sich auf den Einfluss der Biegung um die schwache Trägerachse sowie die Verwölbung zurückführen. Darüber hinaus ist aufgrund der schwach ausgeprägten Negativbereiche der Spannungen am Untergurt von einer geringen Einspannwirkung auszugehen. Angesichts der sehr geringen Druckspannungen befindet sich der Messpunkt „QT_3.1.1y“ am Steg und ist ohne Extrapolation nur bedingt aussagekräftig.

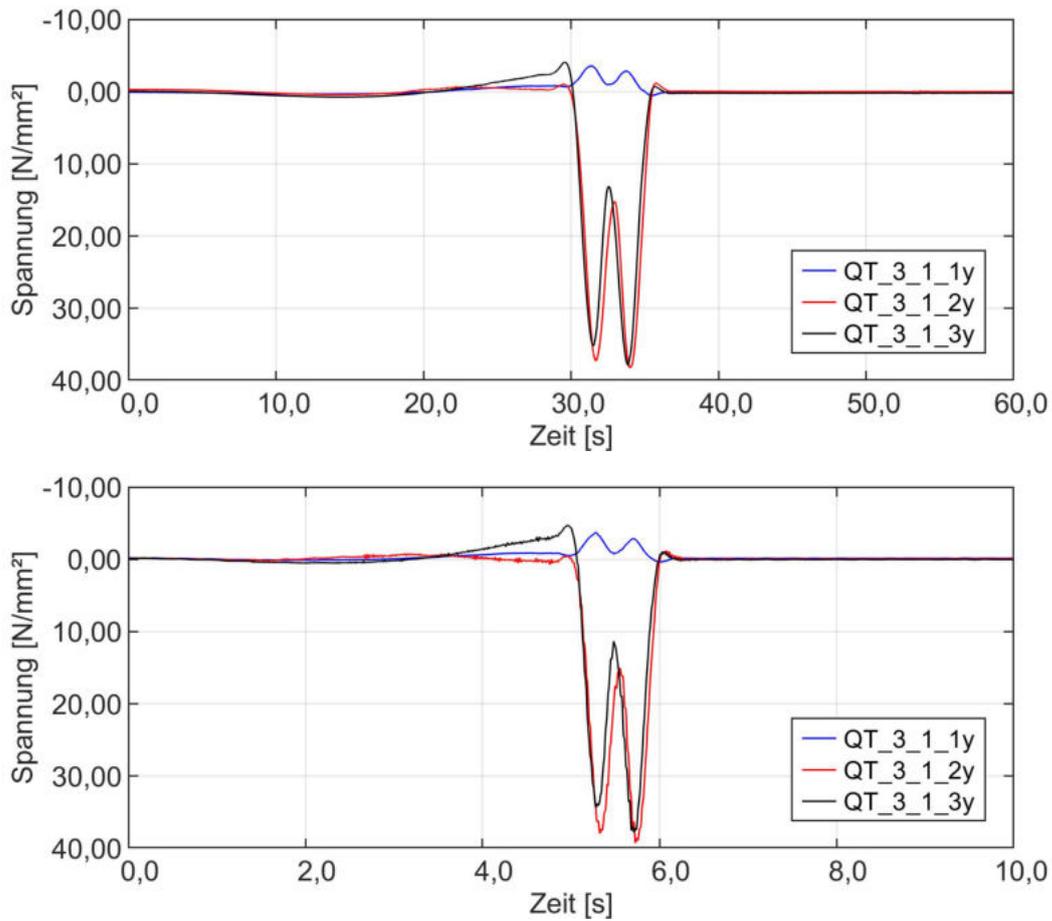


Abbildung 5.30: Spannungen am Querträger Brücke 2 infolge der Belastungslok, $v = 15 \text{ km/h}$ (oben) und $v_{\max} = 75 \text{ km/h}$ (unten)

Tabelle 5.14: Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungslok am Querträger Brücke 2

Querträger 1 (Messschnitt III) Brücke 2				
dynamischer Effekt	Geschwindigkeit	QT_3.1.1y	QT_3.1.2y	QT_3.1.3y
dynamischer Zuwachs in N/mm^2	15 km/h	—	1,21	1,92
	55 km/h	—	1,18	1,42
	75 km/h	—	2,04	1,25
	maßgeb.	—	2,04	1,92
dynamischer Beiwert in —	15 km/h	—	1,03	1,05
	55 km/h	—	1,03	1,04
	75 km/h	—	1,05	1,03
	maßgeb.	—	1,05	1,05

Eine Zusammenstellung der dynamischen Zuwächse $\Delta\sigma$ und der zugehörigen dynamischen Beiwerte $1 + \varphi$ für alle Geschwindigkeitsstufen ist in der Tabelle 5.14 enthalten. Der größte dynamische Beiwert von 1,05 ergibt sich dabei am Messpunkt „QT_3.1.2y“ unter $v = 15$ km/h. Der betreffende Beiwert geht aus einem dynamischen Spannungszuwachs von 2,04 N/mm² hervor. Es zeichnet sich ein konstantes Verhalten der dynamischen Beiwerte in Abhängigkeit der untersuchten Geschwindigkeiten ab.

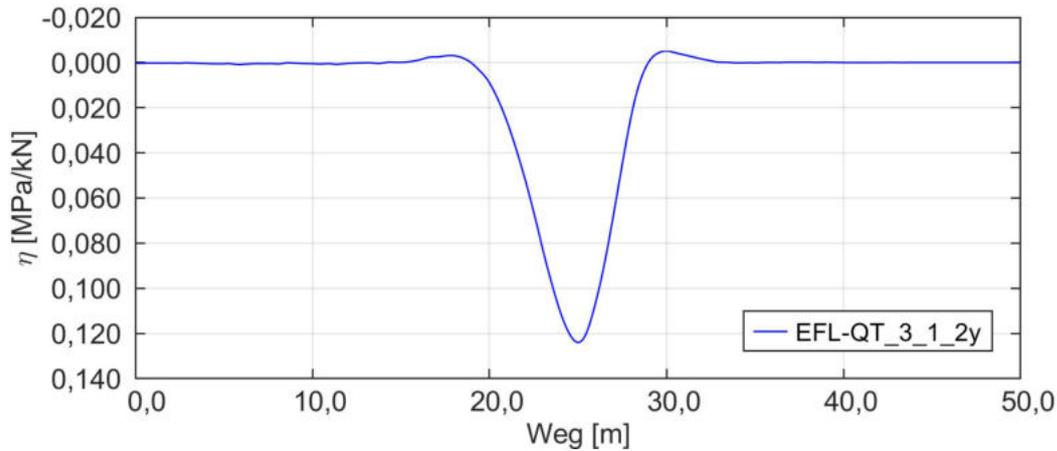


Abbildung 5.31: Einflusslinie Querträger Brücke 2 resultierend aus Fahrt „Fahrt037“

Tabelle 5.15: Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Querträger Brücke 2

Querträger 1 (Messschnitt 3) Brücke 2				
Größe	Einheit	QT_3.1.1y	QT_3.1.2y	QT_3.1.3y
Spannung LM 71	N/mm ²	—	92,56	89,24
Spannung Blz 6		—	79,99	76,68
maßg. Geschw.	km/h	—	75	15
maßg. dyn. Zuwachs	N/mm ²	—	2,04	1,92
maßg. dyn. Beiwert	—	—	1,05	1,05
$\Phi_{\text{obs,I}} = \frac{\sigma_{\text{LM71}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	—	—	1,02	1,02
$\Phi_{\text{obs,II}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	—	—	1,00	1,00
$\Phi_{\text{obs,III}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} \cdot (1 + \varphi(v))}{\sigma_{\text{LM71}}}$	—	—	1,00	1,00

Die Spannungseinflusslinie für den maßgebenden Messpunkt „QT_3.1.2y“ ist in der Abbildung 5.31 dargestellt. Aus der vorliegenden Einflusslinie lässt sich ableiten, dass es sich bei dem betrachteten Bauteil um ein Einfeldsystem mit beidseitig geringem Einspanneffekt handelt.

Die im oberen Teil der Tabelle 5.15 aufgeführten maßgebenden Spannungen infolge LM 71 und dem ungünstigsten ideellen Betriebslastenzug 6 werden auf der Grundlage der jeweiligen Einflusslinie berechnet. Die Spannungen aus dem Lastmodell 71 sind stets größer als aus dem Betriebslastenzug 6. Am betrachteten Messpunkt entstehen die Spannungen $\sigma_{LM71} = 92,56 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_{Blz6} = 79,99 \text{ N/mm}^2$. Die Ermittlung der Schwingfaktoren erfolgt mithilfe der in Tabelle 5.15 enthaltenen Eingangsgrößen. Alle drei untersuchten Berechnungsvarianten des Schwingfaktors erreichen im Messpunkt „QT_3.1.2y“ ihren Maximalwert von bis zu 1,02.

Zusammenfassung

Die maßgebenden Schwingfaktoren für Brücke 2 bezogen auf die Bauteilgruppen sind in der Tabelle 5.16 zusammengestellt. Diese sind in der Größenordnung von 1,00 bis 1,55 angesiedelt. Als Vergleich zu den messwertgestützten Schwingfaktoren Φ_{obs} wird der Schwingfaktor Φ_{cal} unter Annahme sorgfältig instand gehaltener Gleise gemäß DIN EN 1991-2 bzw. DIN EN 1991-2/NA bestimmt. Die Berechnung des Schwingfaktors Φ_{cal} ist dem Anhang 2 - F zu entnehmen.

Tabelle 5.16: Maßgebende bauteilbezogene Schwingfaktoren der Brücke 2

maßgebender bauteilbezogener Schwingfaktor Brücke 2				
Schwingfaktor	Einheit	HT	LT	QT
$\Phi_{\text{obs,I}} = \frac{\sigma_{LM71} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{LM71}}$	–	1,02	1,10	1,02
$\Phi_{\text{obs,II}} = \frac{\sigma_{Blz} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{LM71}}$	–	1,00	1,13	1,00
$\Phi_{\text{obs,III}} = \frac{\sigma_{Blz} \cdot (1 + \varphi(v))}{\sigma_{LM71}}$	–	1,05	1,55	1,00
$\Phi_{\text{cal}} = \frac{1,44}{\sqrt{L_{\Phi} - 0,2}} + 0,82$	–	1,00	1,41	1,35

5.3 Brücke 3

5.3.1 Bauwerksbeschreibung

Das betrachtete Bauwerk ist eine Eisenbahnüberführung als Vollwandträgerbrücke, welche aus mehreren Streckenteilbauwerken (STB) besteht. In der Abbildung 5.32 ist eine Ansicht der Unterseite der Brücke dargestellt, welche die Tragkonstruktion zeigt. Die messtechnische Untersuchung erfolgt ausschließlich für das Streckenteilbauwerk 3. Dieses ist eingleisig als dreifeldriger Gerberträger ausgeführt und schließt schiefwinklig an die Endquerträger an. Die Endfelder weisen eine Stützweite von $L = 5,34$ m und das Mittelfeld eine Stützweite von $L = 14,84$ m auf. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf der Überführung beträgt $v = 160$ km/h.



Abbildung 5.32: Ansicht der betrachteten Eisenbahnüberführung

5.3.2 Lage und Bezeichnung der Messschnitte

Die durchgeführte Messung findet auf der Grundlage von fünf festgelegten Messschnitten statt. Die angeordneten Messpunkte liegen vollständig auf Überbau 2 und 3 des Streckenteilbauwerks 3. Um die Messpunkte bauteiltechnisch einordnen zu können, gibt die Abbildung 5.33 einen Überblick über die Benennung der Bauteile.

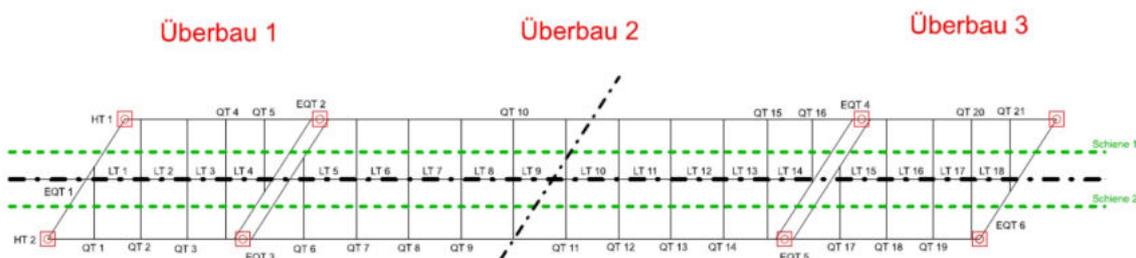


Abbildung 5.33: Benennung der Träger in allen Überbauten für das STB 3

Auf der Grundlage der Benennung der Bauteile, kann nun die Zuordnung zu den jeweiligen Messschnitten (MS) in Abbildung 5.34 erfolgen.

Messschnitt 1: HT 1 und 2, LT 10

Messschnitt 2: QT 15

Messschnitt 3: HT 1 und 2, EQT 4

Messschnitt 4: HT 1 und 2

Messschnitt 5: QT 20, EQT 6

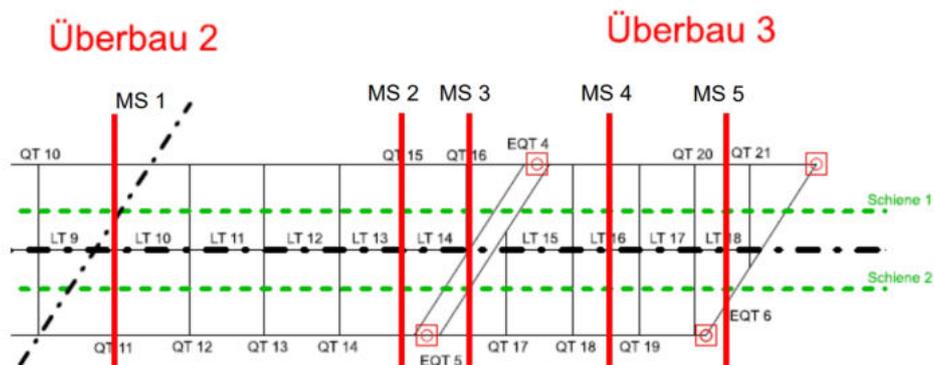


Abbildung 5.34: Lage der Messschnitte

5.3.3 Lage und Bezeichnung der Messpunkte

Die Abbildung 5.35 zeigt die Lage der Messpunkte in den zuvor beschriebenen Messschnitten.

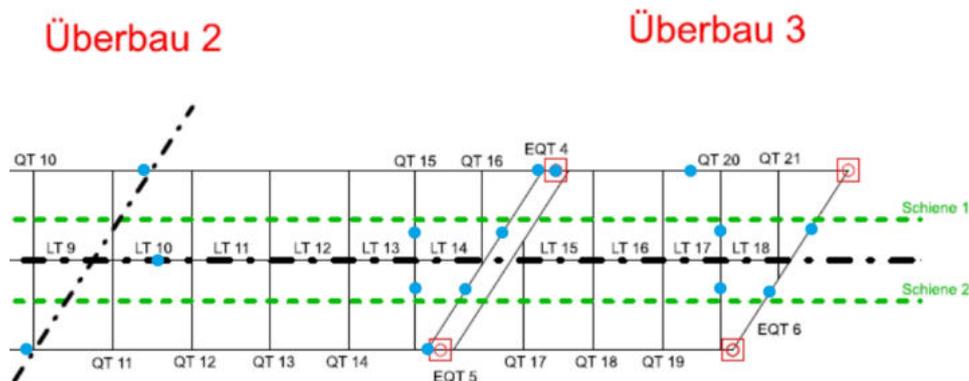


Abbildung 5.35: Lage der Messpunkte

Nachfolgend werden die Messpunkte an den Haupt-, Längs-, Quer- und Endquerträgern benannt. Die Anzahl der Kanäle ergibt sich aus der Multiplikation der applizierten Dehnungsmessstreifen mit der jeweiligen Anzahl der Messstellen.

Hauptträger

Es werden die Messpunkte der Hauptträger definiert: in Feldmitte (MS1 und MS4) sowie über den Stützen (MS3). Dabei ist zu beachten, dass die jeweiligen Punkte jeweils um den Winkel der Schiefstellung der Brücke versetzt sind. Die beiden Hauptträger sind mit jeweils drei (HT1) bzw. vier (HT2) Messpunkten versehen. Die Festlegung der Messpunkte erfolgt folgendermaßen:

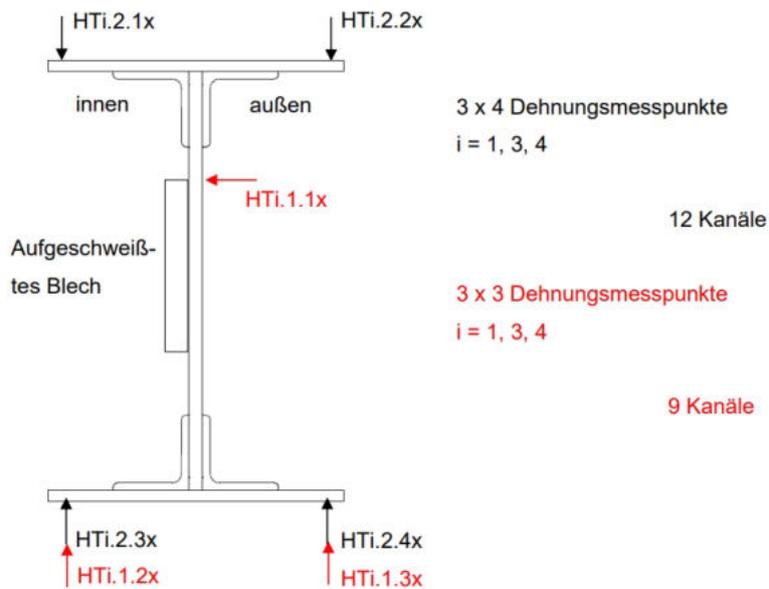


Abbildung 5.36: Messpunkte an den Hauptträgern

Quer-,Längs- und Endquerträger

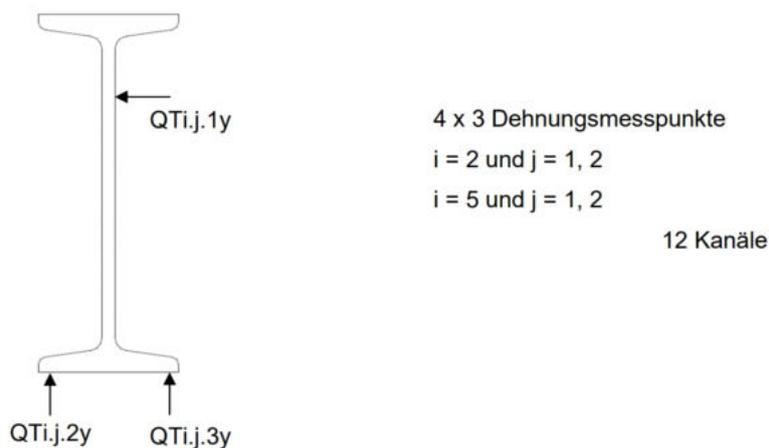


Abbildung 5.37: Messpunkte an den Querträgern

Die Messpunkte der Querträger befinden sich in den Messschnitten 2 und 5. Es werden Dehnungsmessstreifen am Untergurt sowie am Stegblech appliziert. Die Benennung kann der Abbildung 5.37 entnommen werden.

In Abbildung 5.38 sind die Messpunkte an den Endquerträgern dargestellt. Diese befinden sich im Messschnitt 3 über der Stützung sowie im Messschnitt 5. Die Anordnung der Dehnungsmessstreifen folgt denen der Querträger.

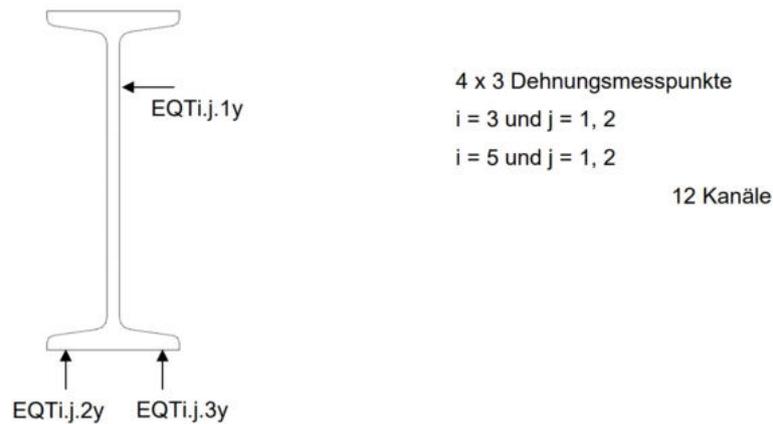


Abbildung 5.38: Messpunkte an den Endquerträgern

Die Anordnung der Messpunkte an den Längsträgern erfolgt ebenfalls am Untergurt sowie am Stegblech. Die Auswertung der Längsträger findet lediglich in Messschnitt 1 statt, da dort die größte Belastung angenommen wird.



Abbildung 5.39: Messpunkte am Längsträger

5.3.4 Verkehrslasten

Die Ermittlung der messwertgestützten Einflusslinie sowie des dynamischen Beiwer-tes erfolgt auf Basis von Fahrten einer 4-achsigen Belastungslok des Typs BR 192 „Siemens Smartron“ mit einer Achslast von jeweils 22,5 t in verschiedenen Ge- schwindigkeiten. Achslasten und Achsabstände können der Abbildung 5.40 entnom- men werden. Die Versuche wurden mit den Geschwindigkeitsstufen $v = 10$ km/h, $v = 80$ km/h, $v = 100$ km/h, $v = 120$ km/h und $v_{\max} = 160$ km/h durchgeführt. Im Rahmen der Evaluierung der Geschwindigkeitsstufen ist eine Mindestanzahl von vier Messfahrten pro Geschwindigkeitsstufe erforderlich, um eine statistische Beurteilung zu ermöglichen.



Abbildung 5.40: Belastungslok BR 192 „Siemens Smartron“ mit ihren Achslasten und Achsabständen – Bildquelle: <https://tinyurl.com/yc262fz7>

5.3.5 Ermittlung und Prüfung der Fahrgeschwindigkeiten

Zu Beginn der Auswertung ist zunächst eine Einordnung der erzeugten Messdaten in Geschwindigkeitsstufen vorzunehmen. Die Klassifizierung erfolgt anhand der in Kapitel 5.3.4 angestrebten Fahrgeschwindigkeiten. Die Bestimmung der Geschwin- digkeiten orientiert sich an der in Kapitel 4.2 beschriebenen Vorgehensweise. Im Anschluss wird eine Plausibilitätskontrolle sowie gegebenenfalls der Ausschluss ein- zelner Messfahrten durchgeführt. Abweichend zu den Vorgaben aus Kapitel 5.3.4 kann für die maximale Geschwindigkeitsstufe $v = 160$ km/h keine Zuordnung erfol- gen, da die berechneten Geschwindigkeiten der Belastungslok diesen Bereich mehr- fach unterschreiten. Zur weiteren Auswertung wird deshalb die Geschwindigkeits- stufe $v = 155$ km/h herangezogen. Im Anhang 3 - A befindet sich eine detaillierte Darstellung der Ermittlung der Fahrgeschwindigkeiten für die vorliegende Eisen- bahnüberführung sowie die Einordnung der Qualität der Ergebnisse.

Aus den Messungen der Lichtschranken ergeben sich folgende Geschwindigkeitsbereiche mit ihren zugehörigen Messfahrten:

$v = 10$ km/h		10 Messfahrten
$v = 80$ km/h		7 Messfahrten
$v = 100$ km/h		5 Messfahrten
$v = 120$ km/h		5 Messfahrten
$v = 155$ km/h		5 Messfahrten

5.3.6 Analyse und Verarbeitung der Messdaten

Im Weiteren folgt eine kurze Beschreibung der Datenverarbeitung und Auswertung. Dabei wird auf Besonderheiten der vorliegenden Brücke eingegangen.

Ermittlung der Spannungen

Zur Bestimmung der Spannungen aus den gemessenen Dehnungen wird bei allen Messreihen in Abhängigkeit der Fahrtrichtung ein Nullabgleich mit den ersten 100 Datenpunkten durchgeführt sowie ein Tiefpassfilter mit der Messfrequenz 300 Hz und Grenzfrequenz 20 Hz angewendet. Das Ergebnis dieser Bearbeitung ist eine Verminderung des Oszillierens und das Annähern der Messkurve an die Null.

Statistische Bewertung der Messdaten

Die statistisch bewerteten Messdaten weisen über alle Geschwindigkeitsstufen relative Fehler bis maximal 6 % auf und können für die Auswertung herangezogen werden. Die Auswertung der Spannungen kann Anhang 3 - B entnommen werden.

Bestimmung des dynamisches Zuwachses und Beiwertes

Für die Ermittlung der dynamischen Zuwächse und Beiwerte wird die Grenzspannung auf 10 N/mm² gesetzt. Alle Spannungen, die kleiner als dieser Grenzwert sind, bleiben in der weiteren Auswertung unberücksichtigt. Die Einführung dieses Grenzwertes dient als Maßnahme zur Reduktion des Einflusses des Messrauschens. Das Ergebnis der ermittelten Beiwerte und Zuwächse kann Anhang 3 - C entnommen werden.

Messwertgestützte Spannungseinflusslinien

Die Spannungseinflusslinien für $v = 10$ km/h werden mit der Fahrt „Fahrt008“ erstellt, da während dieser Loküberfahrt die geringsten Schwankungen in der Ge-

schwindigkeit festgestellt werden konnten. Annähernd konstante Überfahrtgeschwindigkeiten sind die Grundlage für das in Kapitel 4.7.2 vorgestellte Verfahren und ermöglichen eine rekursive Ermittlung der Spannungseinflusslinien. Um die Auswertung der Messdaten zu begrenzen und dennoch statistisch sichere Aussagen treffen zu können, wird die Auswertung der Messdaten für sich am Mittelwert orientierende Spannungen geführt.

Bestimmung des messwertgestützten Schwingfaktors

Zunächst sind die maßgebenden Spannungen des Lastmodells 71 sowie der Idealtypen zu filtern. Hierbei erzeugt immer der Betriebslastenzug 6 die betragsmäßig höchsten Spannungen, bis auf einen Fall, wo der Betriebslastenzug 1 ungünstiger wirkt. Die Daten sind im Anhang 3 - D einsehbar.

Die Schwingfaktoren werden anhand der Gleichungen (4.24), (4.25) und (4.26) für jeden ausgewerteten Messpunkt bestimmt. Anschließend wird der maßgebende Schwingfaktor bauteilbezogen ermittelt. Die Ermittlung der Schwingfaktoren kann dem Anhang 3 - E entnommen werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden im folgenden Abschnitt behandelt.

5.3.7 Ergebnisse der Messdatenauswertung

Hauptträger

Nachfolgend werden die Messergebnisse des für den Schwingfaktor Φ_{obs} maßgebenden Hauptträgers 1 im Messschnitt 3 dargestellt (über der Zwischenstützung oben).

Die Abbildung 5.41 zeigt den gemessenen Spannungsverlauf des Hauptträgers bei Loküberfahrt mit $v = 10$ km/h und $v_{\text{max}} = 155$ km/h an Messschnitt 3. Für den Messpunkt kann lediglich die Spannung am Untergurt betrachtet werden, da am Hauptträger ausschließlich drei DMS zur Spannungsermittlung appliziert wurden. Die Ermittlung der Spannung im Obergurt wäre durch Extrapolation der Spannung im Steg möglich, ist jedoch nicht Teil dieser Arbeit. Bei quasi-statischer Loküberfahrt ($v = 10$ km/h) ergeben sich maximale Spannungen von $\sigma = 13,4$ N/mm², welche bei einer Überfahrt mit $v_{\text{max}} = 155$ km/h auf $\sigma = 14,2$ N/mm² anwachsen. Die Darstellung der Spannungen in der zuvor genannten Abbildung sind aufgrund von Messungen in unterschiedlichen Fahrtrichtungen für die beiden betrachteten Geschwindigkeitsstufen spiegelverkehrt.

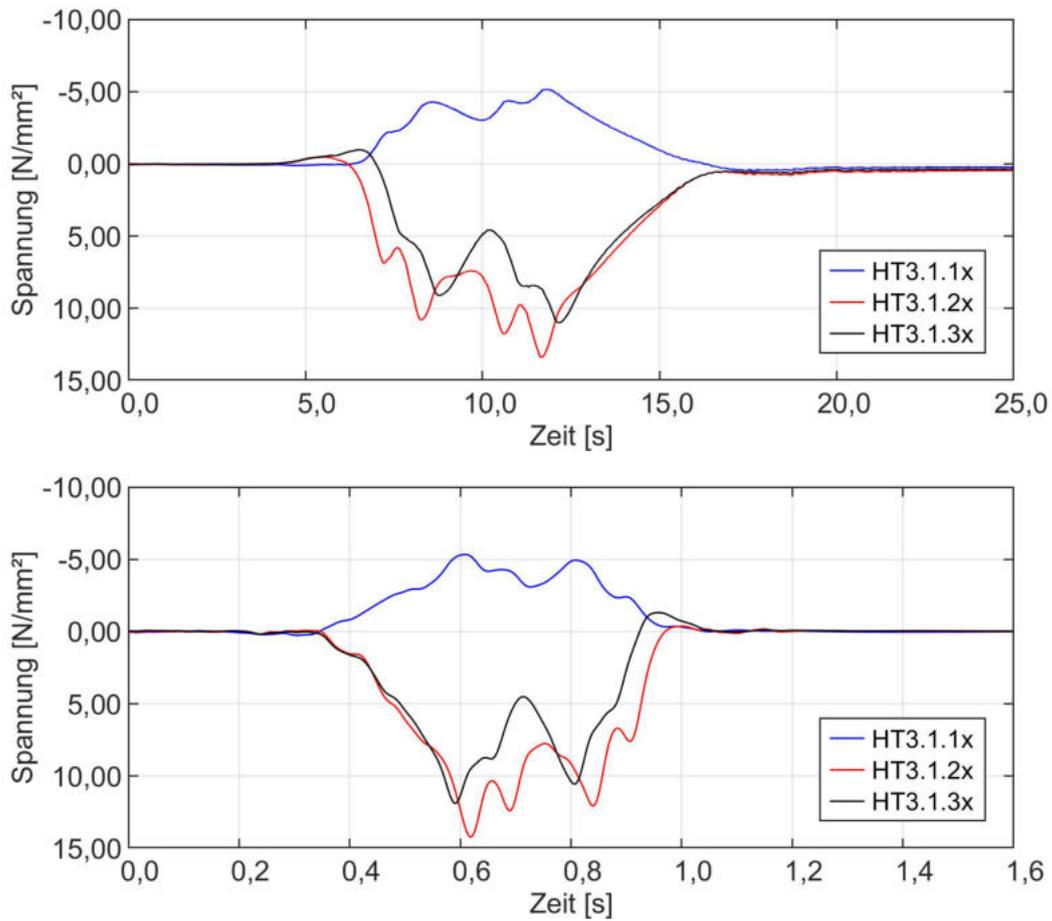


Abbildung 5.41: Spannungsverlauf Hauptträger 1 im Messschnitt 3 für $v = 10 \text{ km/h}$ (oben) und $v_{\max} = 155 \text{ km/h}$ (unten)

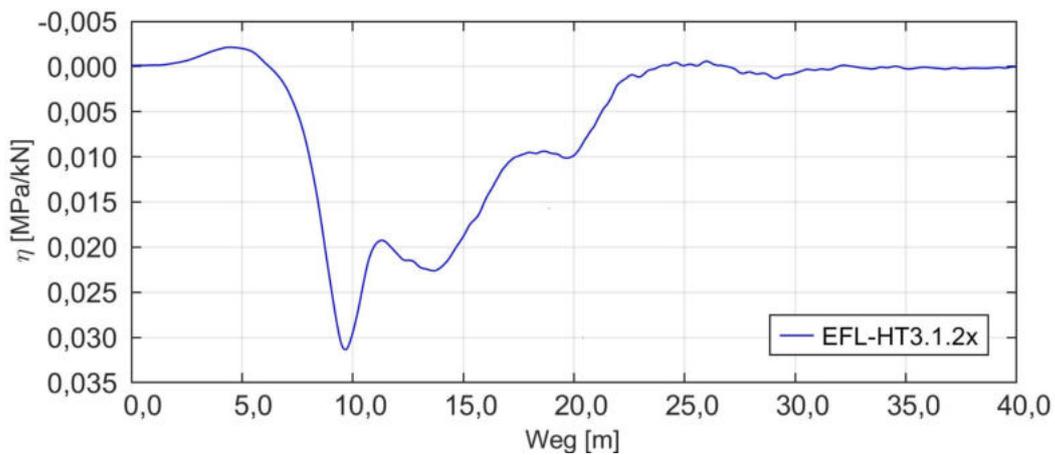


Abbildung 5.42: Einflusslinie Hauptträger Brücke 3 resultierend aus „Fahrt008“

Die Tabelle 5.17 gibt einen Überblick über den Verlauf des dynamischen Zuwachses $\Delta\sigma$ sowie des dynamischen Beiwertes $1 + \varphi$ über die betrachteten Geschwin-

digkeitsstufen. An den dynamischen Zuwächsen ist keine signifikante Spannungszunahme bei steigender Geschwindigkeit erkennbar. Der maximale dynamische Beiwert $1 + \varphi$ tritt bei einer Loküberfahrt mit $v = v_{\max} = 155 \text{ km/h}$ auf und beträgt 1,12.

Tabelle 5.17: Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungsllok am Hauptträger Brücke 3

Hauptträger 1 (Messschnitt 3) Brücke 3				
dynamischer Effekt	Geschwindigkeit	HT3.1.1x	HT3.1.2x	HT3.1.3x
dynamischer Zuwachs in N/mm^2	10 km/h	—	0,51	0,58
	80 km/h	—	0,56	1,14
	100 km/h	—	1,06	1,08
	120 km/h	—	0,83	1,2
	155 km/h	—	1,53	1,2
	maßgeb.	—	1,53	1,2
dynamischer Beiwert in —	10 km/h	—	1,04	1,05
	80 km/h	—	1,04	1,10
	100 km/h	—	1,08	1,10
	120 km/h	—	1,06	1,11
	155 km/h	—	1,12	1,10
	maßgeb.	—	1,12	1,11

Die Abbildung 5.42 zeigt die maßgebende Spannungseinflusslinie des Messpunktes „HT3.1.2x“ am Untergurt des Hauptträgers 1. Die Darstellung der Nulllinie ist aufgrund des Messrauschens nur bedingt möglich. Die resultierenden Spannungen beim Überfahren der Einflusslinie sind in der Tabelle 5.18 aufgeführt. Hier ergibt sich für den Messpunkt „HT3.1.2x“ bei einer Überfahrt mit dem LM 71 eine maximale Spannungen (ohne entlastende Effekte) von $\sigma = 30,82 \text{ N/mm}^2$ und für den maßgebenden Betriebslastenzug 6 maximale Spannungswerte (mit entlastenden Effekten) von $\sigma = 31,52 \text{ N/mm}^2$. Hieraus wird ersichtlich, dass das LM 71 die Spannungen des Betriebslastenzug 6 nicht abdecken kann. Es ergeben sich Schwingfaktoren Φ_{obs} nach den Gleichungen (4.24) bis (4.26) von 1,05 bis 1,14. Diese sind in der Tabelle 5.18 aufgeführt.

Tabelle 5.18: Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Hauptträger Brücke 3

Hauptträger 1 (Messschnitt 3) Brücke 3				
Größe	Einheit	HT3.1.1x	HT3.1.2x	HT3.1.3x
Spannung LM 71	N/mm ²	—	30,82	25,81
Spannung Blz 6		—	31,52	25,30
maßg. Geschw.	km/h	—	155	120
maßg. dyn. Zuwachs	N/mm ²	—	1,53	1,2
maßg. dyn. Beiwert	—	—	1,12	1,11
$\Phi_{\text{obs,I}} = \frac{\sigma_{\text{LM71}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	—	—	1,05	1,05
$\Phi_{\text{obs,II}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	—	—	1,07	1,03
$\Phi_{\text{obs,III}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} \cdot (1 + \varphi(v))}{\sigma_{\text{LM71}}}$	—	—	1,14	1,09

Längsträger

Im Folgenden wird der für den Schwingfaktor Φ_{obs} maßgebende Längsträger betrachtet. Die Abbildung 5.43 zeigt den gemessenen Spannungsverlauf des Längsträgers 1 (LT10) im Messschnitt 1 bei Überfahrt mit $v = 10$ km/h und $v_{\text{max}} = 155$ km/h. Die messtechnische Erfassung des Längsträgers erfolgt ausschließlich in diesem Messschnitt, da dort die größten Spannungen vermutet werden. Gleich der Durchführung beim Hauptträger 1 wurden am Längsträger 10 lediglich drei DMS zur Dehnungsmessung appliziert. Der DMS am Stegblech mit der Bezeichnung „LT1.1.1x“ wird für die Ergebnisdarstellung nicht herangezogen, da dieser lediglich zur Ermittlung der Spannungen im Obergurt durch lineare Extrapolation dient. Aus dem Spannungsverlauf lässt sich zunächst eine gleichmäßige Beanspruchung innerhalb des Untergurtes erkennen. Zusätzlich sind im Spannungsverlauf die Achsen der Lok ersichtlich. Am Untergurt ergeben sich maximale Zugspannungen von $\sigma = 21,8$ N/mm² bei $v = 10$ km/h, die auf einen Wert von $\sigma = 21$ N/mm² bei $v_{\text{max}} = 155$ km/h abfallen.

Erkennbar wird dies zudem an den in Tabelle 5.19 dargestellten dynamischen Zuwächsen und Beiwerten. Zunächst wachsen diese bis zu ihrem Maximum bei $v = 100$ km/h auf $\Delta\sigma = 0,63$ N/mm² und $1 + \varphi = 1,03$ an, bis schließlich bei v_{max} ein negativer Spannungszuwachs vorliegt und somit die Spannungen unter die der quasi-statischen Überfahrt abfallen. Aufgrund des sehr geringen dynamischen

Zuwachses kann der Ursprung der Schwankungen im auftretenden Messrauschen des Signals von ca. $0,5 \text{ N/mm}^2$ begründet sein.

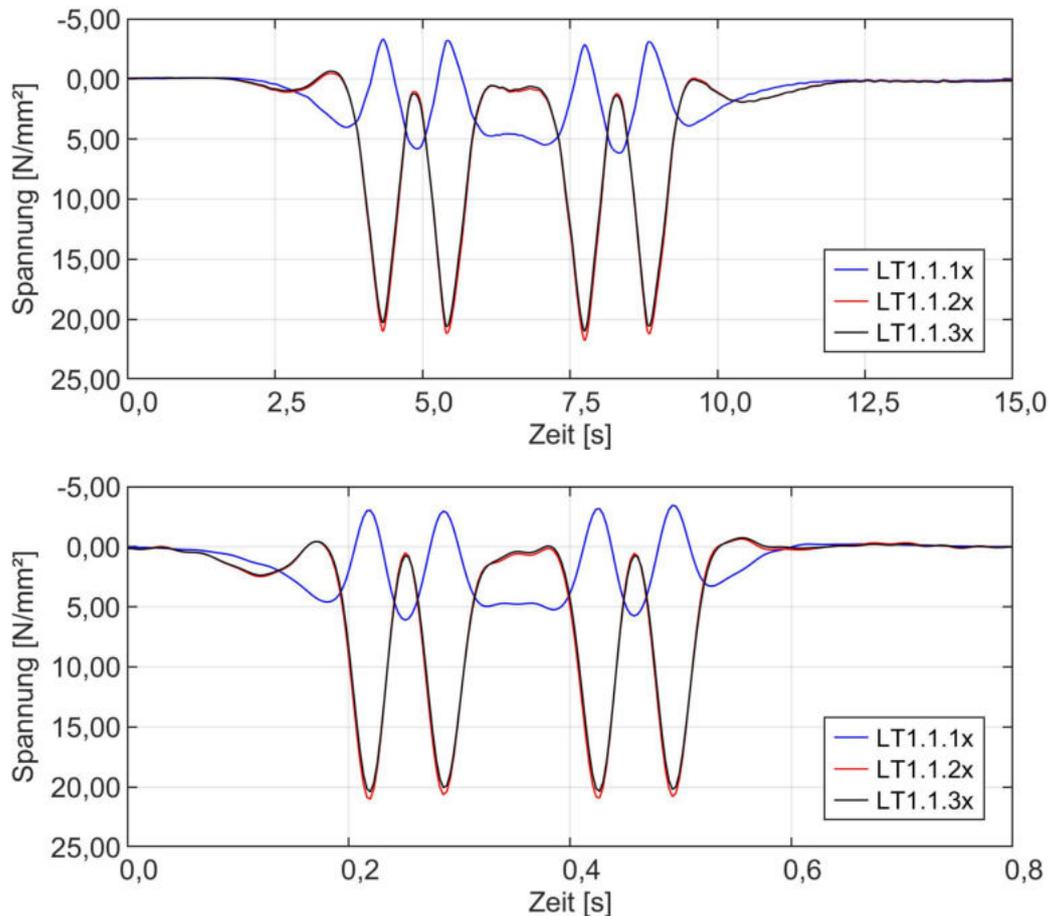


Abbildung 5.43: Spannungsverlauf Längsträger 1 im Messschnitt 1 für $v = 10 \text{ km/h}$ (oben) und $v_{\max} = 155 \text{ km/h}$ (unten)

Die Abbildung 5.44 zeigt die Spannungseinflusslinie des Längsträgers für den Messpunkt „LT1.1.2x“ am Untergurt. Die Ermittlung der Einflusslinie erfolgte unter Anwendung des in Kapitel 4.7.2 beschriebenen Verfahrens. Es wurde die „Fahrt008“ bei $v = 10 \text{ km/h}$ zugrunde gelegt. Die ermittelte Einflusslinie entspricht der eines Einfeldträgers mit leichten Einspanneffekten.

In der Tabelle 5.20 sind die sich ergebenden maximalen Spannungen aus Überfahrt des LM 71 sowie des maßgebenden Betriebslastenzugs 1 dargestellt. Da die Spannungen am Untergurt relativ konstant sind, erfolgt die Auswertung für den Messpunkt „LT.1.1.2x“. Hier ergibt sich die Spannung aus dem LM 71 ohne Berücksichtigung entlastender Effekte zu $\sigma = 31,25 \text{ N/mm}^2$. Die Überfahrt mit dem Blz 1 ruft eine Beanspruchung von $\sigma = 28,11 \text{ N/mm}^2$ hervor. Aus dem Spannungsvergleich ist

erkennbar, dass die Belastung aus dem LM 71 die Beanspruchung aus dem maßgebenden Betriebslastenzug 1 vollumfänglich abdeckt. Dies spiegelt sich auch in den berechneten Schwingfaktoren Φ_{obs} wider, da dieser lediglich für die erste Berechnungsvariante $\Phi_{\text{obs,I}}$ nach Gleichung (4.24) Werte größer 1,0 annimmt.

Tabelle 5.19: Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungsllok am Längsträger 10 Brücke 3

Längsträger 1 (LT10) (Messschnitt 1) Brücke 3				
dynamischer Effekt	Geschwindigkeit	LT1.1.1x	LT1.1.2x	LT1.1.3x
dynamischer Zuwachs in N/mm ²	10 km/h	—	0,25	0,34
	80 km/h	—	0,25	0,41
	100 km/h	—	0,60	0,63
	120 km/h	—	0,06	0,06
	155 km/h	—	-0,38	-0,29
	maßgeb.	—	0,6	0,63
dynamischer Beiwert in –	10 km/h	—	1,01	1,02
	80 km/h	—	1,01	1,02
	100 km/h	—	1,03	1,03
	120 km/h	—	1,00	1,00
	155 km/h	—	1,00	1,00
	maßgeb.	—	1,03	1,03

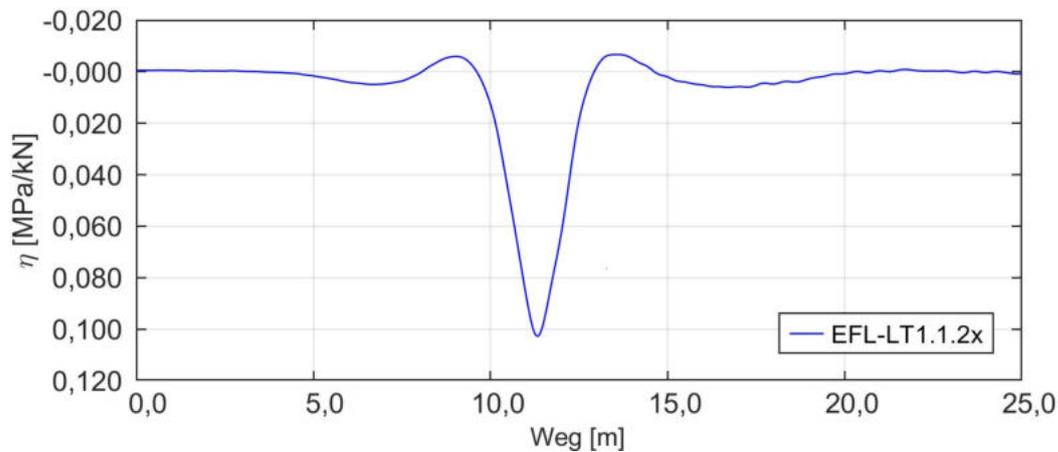


Abbildung 5.44: Einflusslinie Längsträger Brücke 3 resultierend aus „Fahrt008“

Tabelle 5.20: Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Längsträger 10 Brücke 3

Längsträger 1 (LT10) (Messschnitt 1) Brücke 3				
Größe	Einheit	LT1.1.1x	LT1.1.2x	LT1.1.3x
Spannung LM 71	N/mm ²	—	31,25	30,24
Spannung Blz 1		—	28,11	27,04
maßg. Geschw.	km/h	—	100	100
maßg. dyn. Zuwachs	N/mm ²	—	0,60	0,63
maßg. dyn. Beiwert	—	—	1,03	1,03
$\Phi_{\text{obs,I}} = \frac{\sigma_{\text{LM71}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	—	—	1,02	1,02
$\Phi_{\text{obs,II}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	—	—	1,00	1,00
$\Phi_{\text{obs,III}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} \cdot (1 + \varphi(v))}{\sigma_{\text{LM71}}}$	—	—	1,00	1,00

Querträger

Es folgt die Auswertung des für den Schwingfaktor Φ_{obs} maßgebenden Querträgers. Die Abbildung 5.45 zeigt den Spannungsverlauf des Querträgers 2 (QT 15) im Messschnitt 2 im Feld nahe der Zwischenstützung für $v = 10$ km/h und $v_{\text{max}} = 155$ km/h. Am Querträger wurden drei DMS appliziert: Zwei davon am Untergurt und einer am Steg, um die Spannungen im Obergurt extrapolieren zu können. Im Messschnitt 2 weist der Querträger für beide Gleise gleichmäßige Spannungen am Untergurt von $\sigma = 21$ N/mm² bis $\sigma = 24$ N/mm² auf. Die Spannungsunterschiede ergeben sich aus unterschiedlichen Anteilen der Biegung um die schwache Achse sowie der Wölbkrafttorsion.

Für den Querträger 2 werden die dynamischen Zuwächse und Beiwerte in der Tabelle 5.21 dargestellt. Hier ist besonders für den Messpunkt „QT2.2.3y“ ein Spannungszuwachs bis $v = 100$ km/h beobachtbar, welcher bei höheren Geschwindigkeiten wieder abnimmt. Das ganze äußert sich in einem maximalen dynamischen Beiwert $1 + \varphi$ von 1,10. Es ist demzufolge eine leichte dynamische Abhängigkeit zu erkennen. Bei dem Querträger 1 des Messschnittes 2 tritt wie zuvor beschrieben eine ähnliche Beanspruchung ein. Dies führt zu einem dynamischen Beiwert von $1 + \varphi = 1,10$.

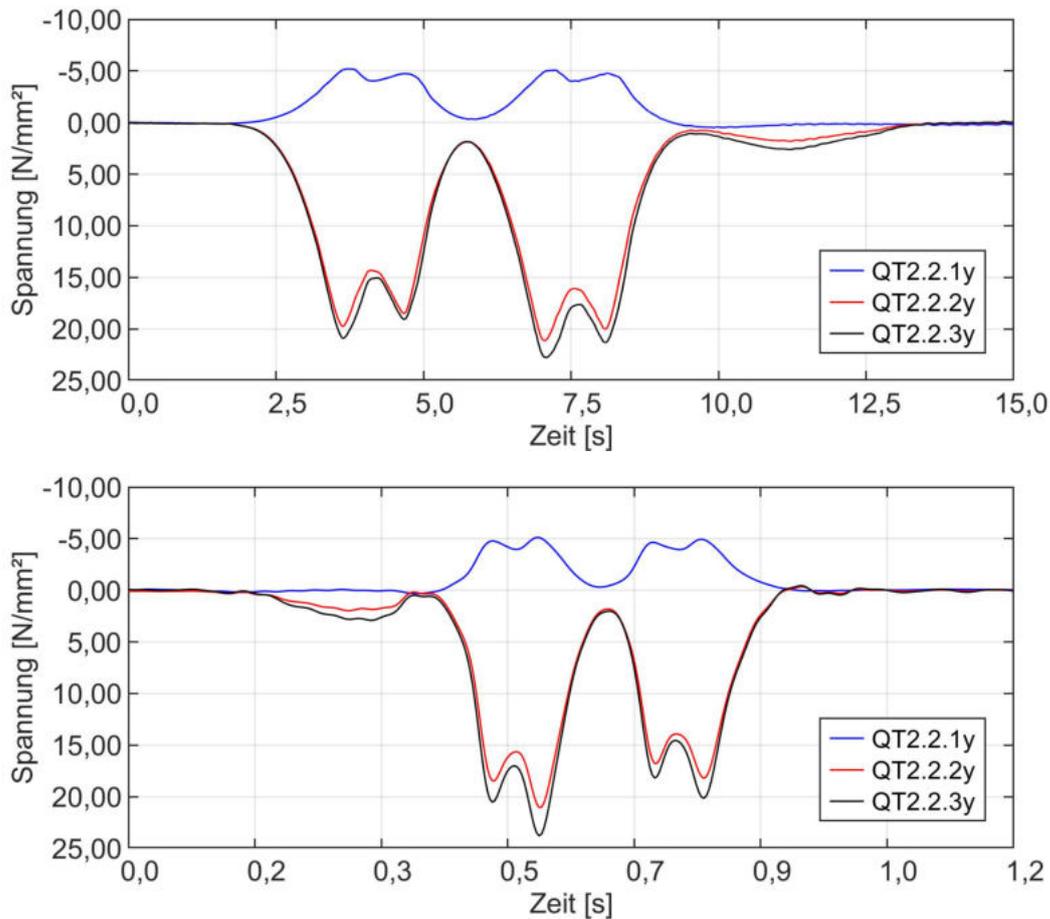


Abbildung 5.45: Spannungsverlauf Querträger 1 im Messschnitt 2 für $v = 10 \text{ km/h}$ (oben) und $v_{\max} = 155 \text{ km/h}$ (unten)

Die Messung des Querträgers wurde zusätzlich am Querträger 20 in Messschnitt 5 in der Nähe des Endauflagers durchgeführt. Im Messpunkt „QT5.2.3y“ des Untergurtes werden Spannungen in Höhe von $\sigma = 10,5 \text{ N/mm}^2$ ermittelt, während im zweiten Messpunkt des Untergurtes „QT5.2.2y“ Spannungen von $\sigma = 27 \text{ N/mm}^2$ auftreten. Hieraus ergibt sich nach Tabelle 5.22 ein deutlich höherer dynamischer Beiwert von $1 + \varphi = 1,27$, der genauer untersucht werden muss.

Am Spannungsverlauf des Messpunktes „QT5.2.3y“ in der Abbildung 5.46 ist erkennbar, dass der Querschnitt infolge einer Loküberfahrt unter Zwang steht. Ersichtlich wird dies dadurch, dass der gemessene Spannungsverlauf im rechten Bereich nicht wieder auf einen Wert von näherungsweise Null ausläuft. Die auftretende Zwangsspannung verfälscht die Messergebnisse, sodass diese nicht für die Auswertung herangezogen werden. Der höhere dynamische Beiwert von $1 + \varphi = 1,27$ wird demzufolge verworfen.

Tabelle 5.21: Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungsllok am Querträger Brücke 3

Querträger 2 (Messschnitt 2) Brücke 3				
dynamischer Effekt	Geschwindigkeit	QT2.2.1y	QT2.2.2y	QT2.2.3y
dynamischer Zuwachs in N/mm ²	10 km/h	—	0,19	0,55
	80 km/h	—	0,61	1,42
	100 km/h	—	1,05	2,29
	120 km/h	—	0,45	1,30
	155 km/h	—	0,29	1,56
	maßgeb.	—	1,05	2,29
dynamischer Beiwert in –	10 km/h	—	1,01	1,02
	80 km/h	—	1,03	1,06
	100 km/h	—	1,05	1,10
	120 km/h	—	1,02	1,06
	155 km/h	—	1,01	1,07
	maßgeb.	—	1,05	1,10

Tabelle 5.22: Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungsllok am Querträger Brücke 3

Querträger 2 (Messschnitt 5) Brücke 3				
dynamischer Effekt	Geschwindigkeit	QT5.2.1y	QT5.2.2y	QT5.2.3y
dynamischer Zuwachs in N/mm ²	10 km/h	—	1,21	0,75
	80 km/h	—	1,18	1,58
	100 km/h	—	1,66	1,75
	120 km/h	—	1,81	1,96
	155 km/h	—	1,04	2,75
	maßgeb.	—	1,07	2,75
dynamischer Beiwert in –	10 km/h	—	1,05	1,07
	80 km/h	—	1,04	1,15
	100 km/h	—	1,06	1,17
	120 km/h	—	1,07	1,19
	155 km/h	—	1,04	1,27
	maßgeb.	—	1,07	1,27

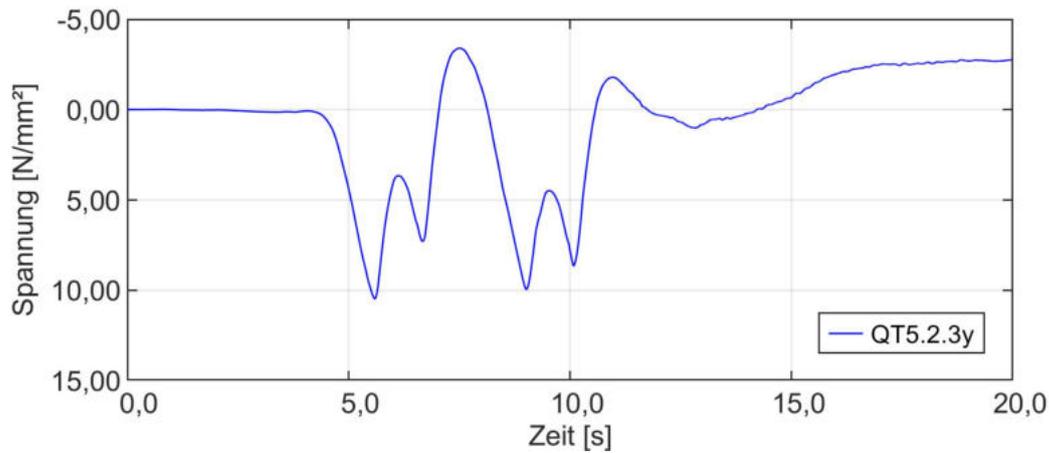


Abbildung 5.46: Spannungsverlauf Querträger 2 (QT20) im Messschnitt 5 Brücke 3

Tabelle 5.23: Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Querträger Brücke 3

Querträger 2 (Messschnitt 2) Brücke 3				
Größe	Einheit	QT2.2.1y	QT2.2.2y	QT2.2.3y
Spannung LM 71	N/mm ²	—	42,60	45,93
Spannung Blz 6		—	37,09	40,69
maßg. Geschw.	km/h	—	100	100
maßg. dyn. Zuwachs	N/mm ²	—	1,05	2,29
maßg. dyn. Beiwert	—	—	1,05	1,10
$\Phi_{\text{obs,I}} = \frac{\sigma_{\text{LM71}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	—	—	1,02	1,05
$\Phi_{\text{obs,II}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	—	—	1,00	1,00
$\Phi_{\text{obs,III}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} \cdot (1 + \varphi(v))}{\sigma_{\text{LM71}}}$	—	—	1,00	1,00

In der Tabelle 5.23 sind die aus dem LM 71 sowie dem maßgebenden Betriebslastenzug 6 ermittelten Spannungen dargestellt. Die Grundlage für die Spannungsermittlung bildet die Überfahrt über die in Abbildung 5.47 dargestellte Spannungseinflusslinie. In dieser ist erkennbar, dass der Querträger statisch als Einfeldträger mit einem leichten Einspanneffekt fungiert. Für den maßgebenden Messpunkt „QT2.2.3y“ ergibt sich eine Spannung aus dem LM 71 in Höhe von $\sigma = 45,93 \text{ N/mm}^2$. Der Betriebslastenzug 6 ruft Spannungen von $\sigma = 40,69 \text{ N/mm}^2$ hervor. Erkennbar ist,

dass das LM 71 größere Beanspruchungen hervorruft als der maßgebende Betriebslastenzug. Dies äußert sich darin, dass lediglich der Schwingfaktor $\Phi_{\text{obs,I}}$ einen Wert größer 1,0 annimmt.

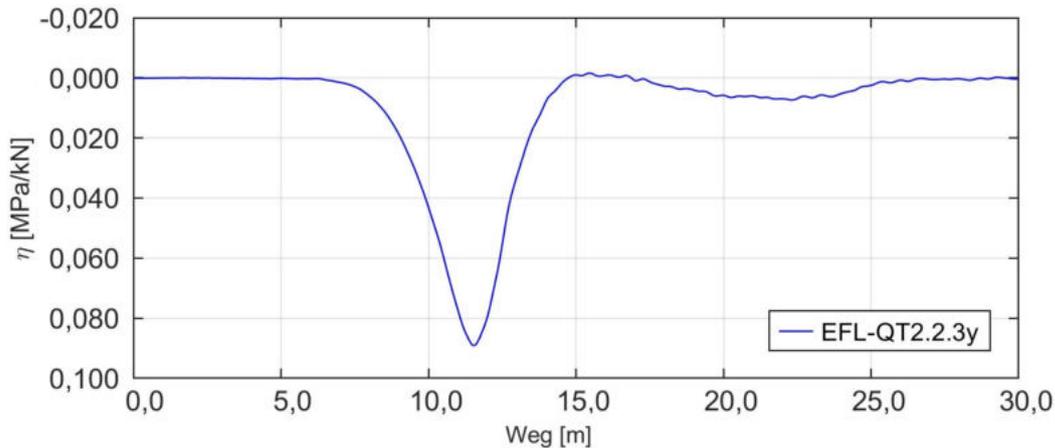


Abbildung 5.47: Einflusslinie Querträger Brücke 3 resultierend aus „Fahrt008“

Endquerträger

Abschließend erfolgt die Auswertung des für den Schwingfaktor Φ_{obs} maßgebenden Endquerträgers. Der betrachtete Endquerträger 5 im Messschnitt 3 befindet sich im Bereich der Zwischenstützung und grenzt Überbau 2 und Überbau 3 ab.

Die Abbildung 5.48 zeigt den ermittelten Spannungsverlauf bei quasi-statischer Überfahrt sowie der Überfahrt mit v_{max} . Aufgrund unterschiedlicher Fahrtrichtungen sind die Spannungen bei den unterschiedlichen Geschwindigkeitsstufen gespiegelt. Im Spannungsverlauf finden sich die Achsen der Belastungslok wieder, was auf eine geringe Aufbauhöhe des Schotterbetts hindeutet. Es werden maximale Zugspannungen von $\sigma = 19,44 \text{ N/mm}^2$ erreicht.

Die Tabelle 5.24 stellt den Verlauf des dynamischen Zuwachses und Beiwertes über die Geschwindigkeitsstufen dar. Erkennbar ist, dass der maßgebende Messpunkt des Endquerträgers „EQT3.1.2y“ den größten dynamischen Zuwachs bei quasi-statischer Überfahrt hervorruft. Hier ergibt sich ein Wert von $\Delta\sigma = 1,28 \text{ N/mm}^2$. Der zugehörige dynamische Beiwert beträgt $1 + \varphi = 1,06$.

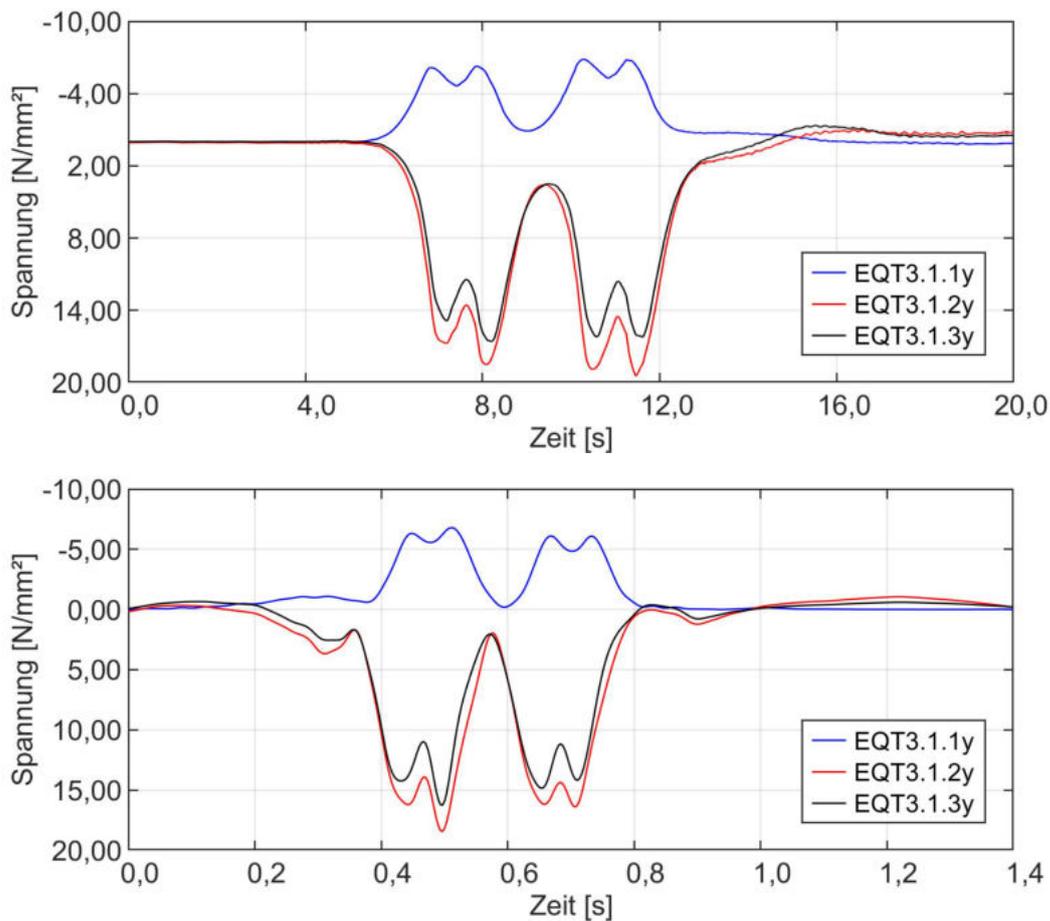


Abbildung 5.48: Spannungsverlauf Endquerträger 1 im Messschnitt 3 für $v = 10$ km/h (oben) und $v_{\max} = 155$ km/h (unten)

In der Abbildung 5.49 ist die aus der Messfahrt „Fahrt008“ ermittelte Spannungseinflusslinie dargestellt. Diese Einflusslinie bildet einen typischen Einfeldträger ab. Von ca. 13 m bis 20 m ist eine leichte Durchlaufwirkung erkennbar.

Die ermittelten Spannungen aus dem LM 71 sowie dem maßgebenden Betriebslastenzug 6 können Tabelle 5.25 entnommen werden. Das LM 71 ruft am maßgebenden Messpunkt „EQT3.1.2y“ maximale Zugspannungen in Höhe von $\sigma = 44,01$ N/mm² hervor, der Betriebslastenzug 6 lediglich $\sigma = 40,01$ N/mm². Dies wirkt sich auf die ermittelten Schwingfaktoren aus, sodass lediglich $\Phi_{\text{obs,I}}$ Werte größer 1,0 annimmt.

Tabelle 5.24: Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungslök am Endquerträger Brücke 3

Endquerträger 1 (EQT 5) (Messschnitt 3) Brücke 3				
dynamischer Effekt	Geschwindigkeit	EQT3.1.1y	EQT3.1.2y	EQT3.1.3y
dynamischer Zuwachs in N/mm ²	10 km/h	—	1,28	0,72
	80 km/h	—	0,60	0,66
	100 km/h	—	0,75	1,07
	120 km/h	—	-1,07	0,53
	155 km/h	—	-0,34	-0,11
	maßgeb.	—	1,28	1,07
dynamischer Beiwert in –	10 km/h	—	1,06	1,04
	80 km/h	—	1,03	1,04
	100 km/h	—	1,04	1,06
	120 km/h	—	1,00	1,03
	155 km/h	—	1,00	1,00
	maßgeb.	—	1,06	1,06

Tabelle 5.25: Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Endquerträger Brücke 3

Endquerträger 1 (Messschnitt 3) Brücke 3				
Größe	Einheit	EQT3.1.1y	EQT3.1.2y	EQT3.1.3y
Spannung LM71	N/mm ²	—	44,01	36,99
Spannung Blz 6		—	40,01	33,31
maßg. Geschw.	km/h	—	10	100
maßg. dyn. Zuwachs	N/mm ²	—	1,28	1,07
maßg. dyn. Beiwert	–	—	1,06	1,06
$\Phi_{obs,I} = \frac{\sigma_{LM71} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{LM71}}$	–	—	1,03	1,03
$\Phi_{obs,II} = \frac{\sigma_{Blz} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{LM71}}$	–	—	1,00	1,00
$\Phi_{obs,III} = \frac{\sigma_{Blz} \cdot (1 + \varphi(v))}{\sigma_{LM71}}$	–	—	1,00	1,00

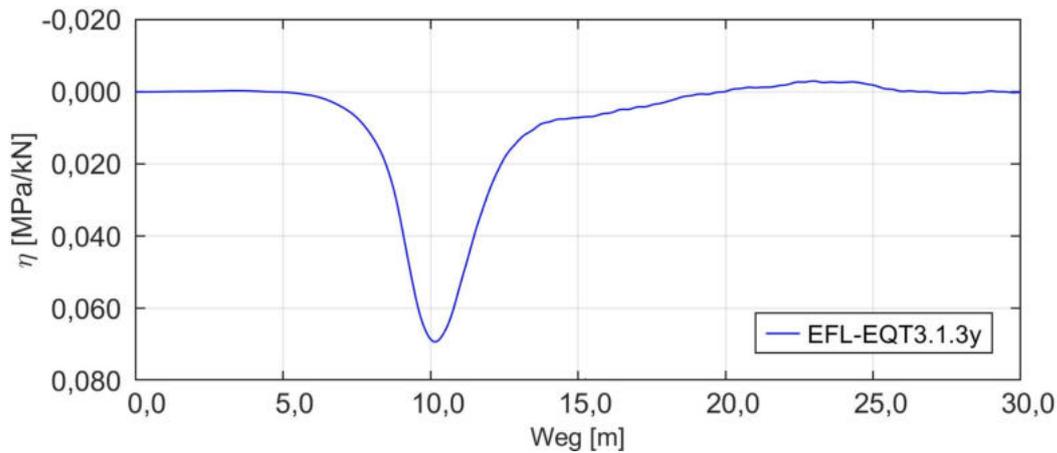


Abbildung 5.49: Einflusslinie Endquerträger Brücke 3 resultierend aus „Fahrt008“

Zusammenfassung

Abschließend werden die ermittelten Schwingfaktoren dargestellt. Zur Gegenüberstellung wird zusätzlich der nach DIN EN 1991-2 bzw. DIN EN 1991-2/NA ermittelte Schwingfaktor Φ_{cal} unter Annahme sorgfältig instand gehaltener Gleise aufgeführt. Die Ermittlung des Schwingfaktors aus der Norm kann Anhang 3 - F entnommen werden.

Tabelle 5.26: Maßgebende bauteilbezogene Schwingfaktoren der Brücke 3

maßgebender bauteilbezogener Schwingfaktor Brücke 3					
Schwingfaktor	Einheit	HT	LT	QT	EQT
$\Phi_{\text{obs,I}} = \frac{\sigma_{\text{LM71}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	–	1,05	1,02	1,05	1,03
$\Phi_{\text{obs,II}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	–	1,07	1,00	1,00	1,00
$\Phi_{\text{obs,III}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} \cdot (1 + \varphi(v))}{\sigma_{\text{LM71}}}$	–	1,14	1,00	1,00	1,00
$\Phi_{\text{cal}} = \frac{1,44}{\sqrt{L_{\Phi} - 0,2}} + 0,82$	–	1,35	1,59	1,47	1,47

5.4 Brücke 4

5.4.1 Bauwerksbeschreibung

Bei der betrachteten Brücke 4 (Abbildung 5.50) handelt es sich um eine von 1960 bis 1962 erbaute Vollwandträgerbrücke. Aus dem Schnitt der Brücke (Abbildung 5.51) ist erkennbar, dass die Brücke zwei Gleise überführt. Für die Überführung dienen jeweils vier eingleisige Blechträgerüberbauten und ein zweifeldriger, zweigleisiger geschweißter Fachwerküberbau. Die Gleise liegen in den ersten drei Öffnungen gerade mit direkter Schienenbefestigung auf den Fahrbahnblechen der Überbauten. In der Öffnung 4 wurde die Fahrbahn mit einem Schotterbett ausgebildet. Die messtechnische Untersuchung erfolgt an den zwei Fachwerkträgerüberbauten. Die Abbildung 5.52 zeigt eine Draufsicht der Brücke 4.



Abbildung 5.50: Ansicht der betrachteten Eisenbahnüberführung

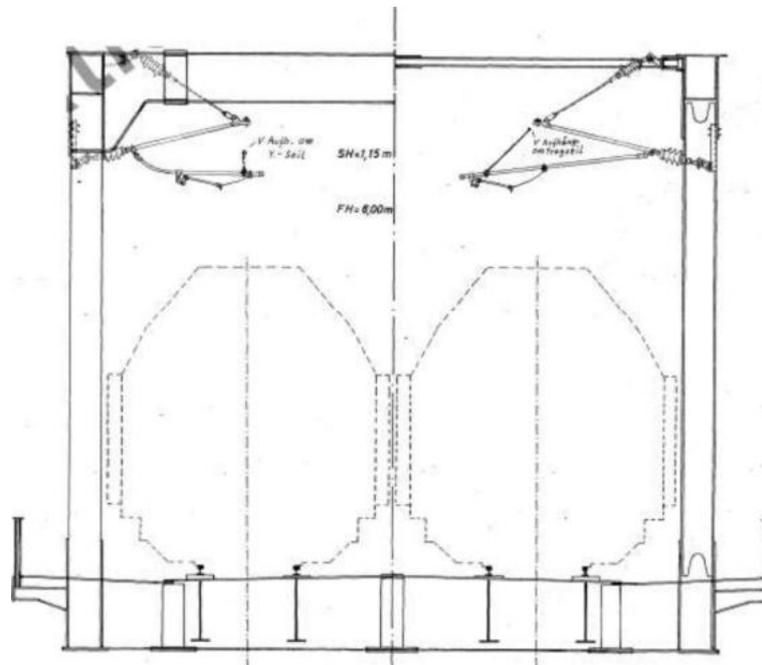


Abbildung 5.51: Schnitt der Eisenbahnüberführung

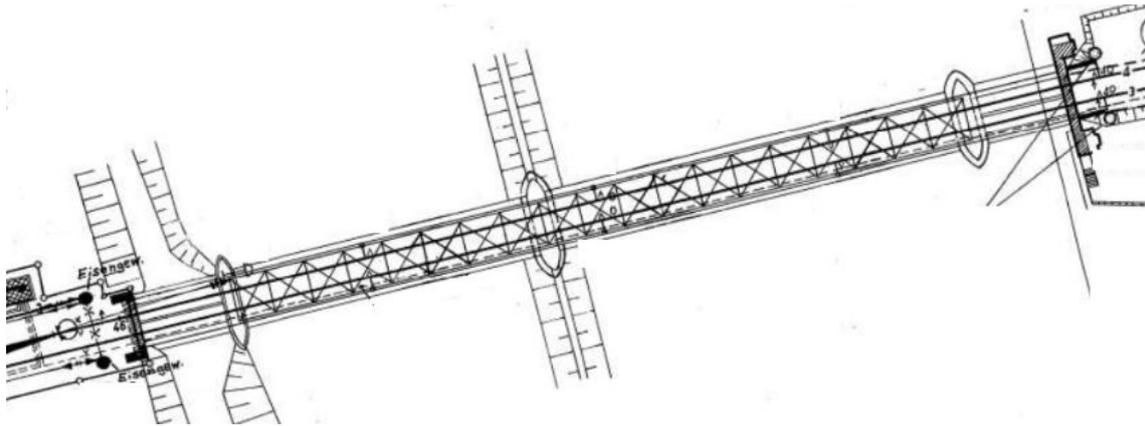


Abbildung 5.52: Draufsicht der Eisenbahnüberführung

5.4.2 Lage und Bezeichnung der Messschnitte

Die durchgeführte Messung findet auf der Grundlage von fünf festgelegten Messschnitten statt. Die angeordneten Messschnitte liegen vollständig im Überbau 3. Um die messtechnische Untersuchung einordnen zu können, gibt die Abbildung 5.53 einen Überblick über die Lage der Messschnitte.

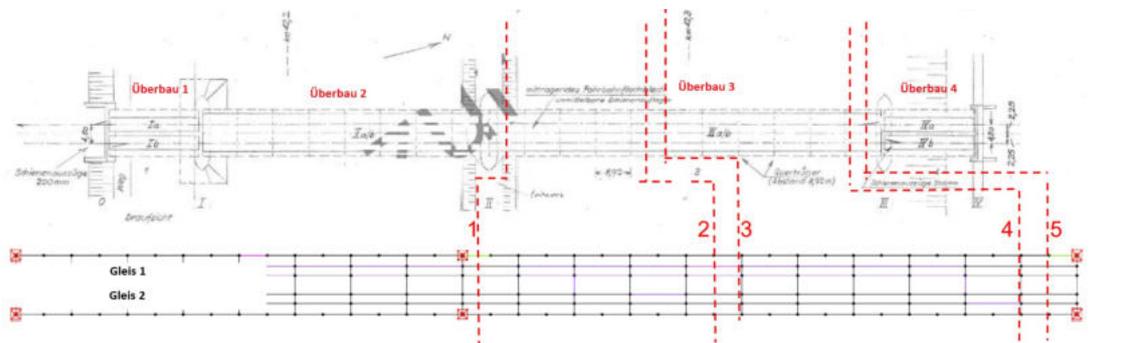


Abbildung 5.53: Darstellung der Messschnitte für Brücke 4

Auf der Grundlage der Darstellung der Messschnitte, kann nun die Benennung der untersuchten Bauteile erfolgen.

- Messschnitt 1: Diagonale 17 und Hauptträger U9
- Messschnitt 2: Hauptträger U13 und Längsträger
- Messschnitt 3: Querträger 14
- Messschnitt 4: Querträger 19
- Messschnitt 5: Diagonale 28 und Längsträger

Die Abbildung 5.56 stellt die Lage der DMS am Untergurt des Fachwerkträgers (Hauptträger) in Messschnitt 1 dar. Die Benennung der Messpunkte folgt der der Diagonalen. Aus dem Messkonzept ergeben sich 16 Messpunkte für den Messschnitt 1.

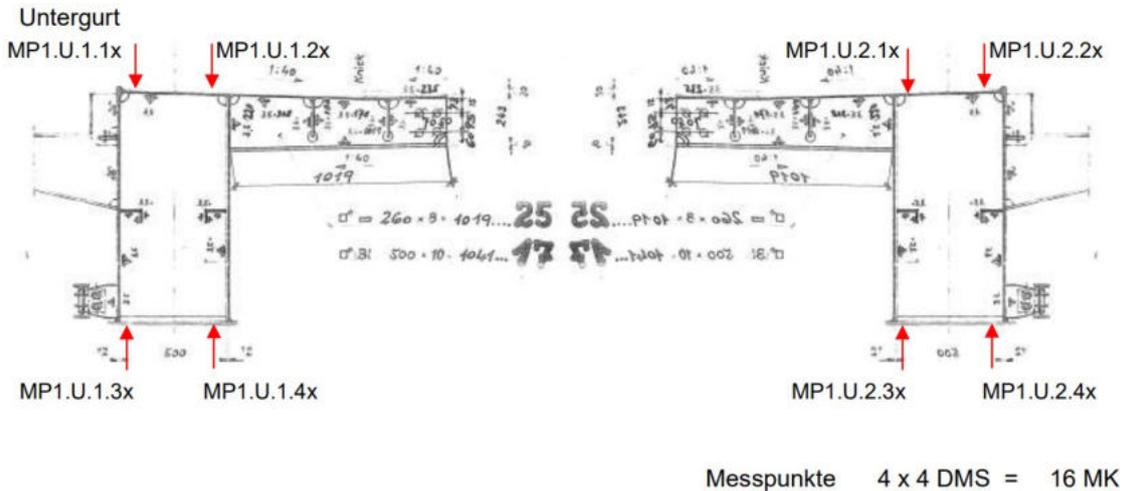


Abbildung 5.56: Messkonzept Untergurt (Hauptträger) Messschnitt 1

Messschnitt 2

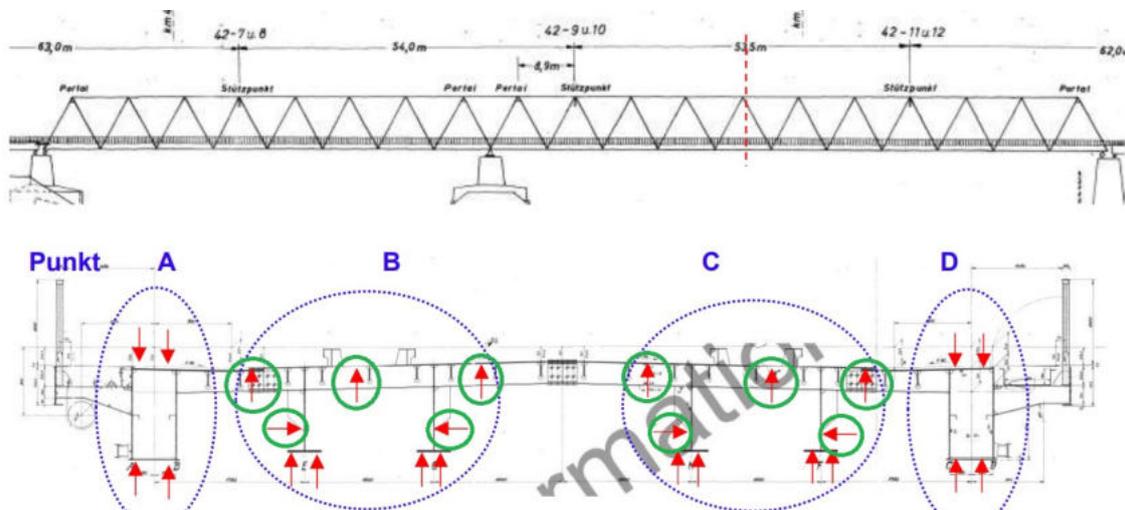


Abbildung 5.57: Lage des Messschnittes 2

Der Abbildung 5.57 kann die Lage des Messschnittes 2 entnommen werden. Messschnitt 2 gliedert sich in die Punkte A bis D. In den Punkten A und D erfolgt die Untersuchung des Untergurtes (Hauptträger), in den Punkten B und C die der Längsträger der Gleise 1 und 2. Die in den Punkten B und C grün umkreisten Messpunkte bieten die Möglichkeit zur Überprüfung des Fahrbahnblechs und des Steges des Längsträgers. Die Rosetten werden in dieser Arbeit nicht untersucht.



Abbildung 5.58: Messkonzept Punkt A und D (Messschnitt 2)

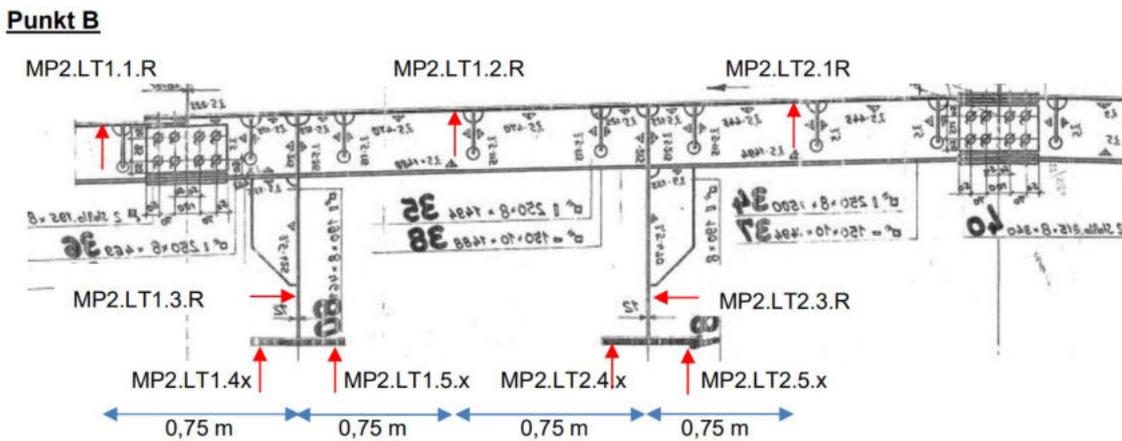


Abbildung 5.59: Messkonzept Punkt B (Messschnitt 2)

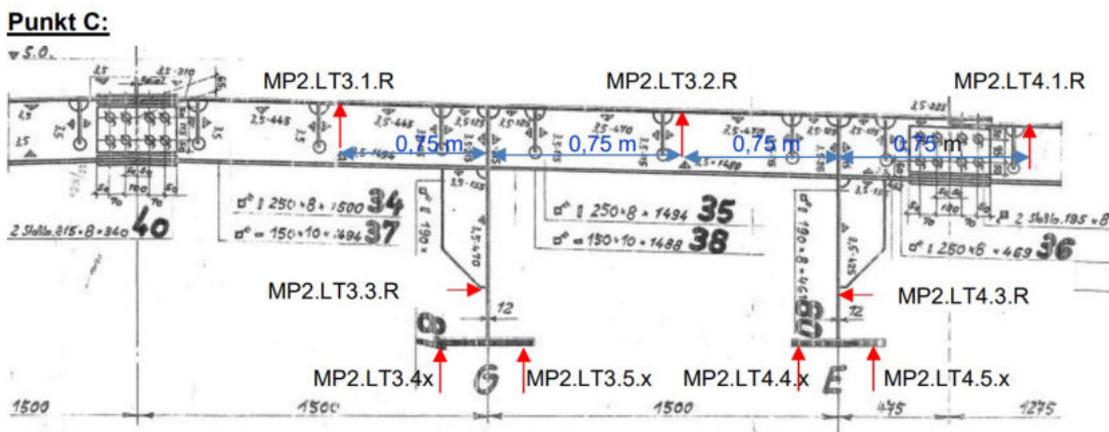


Abbildung 5.60: Messkonzept Punkt C (Messschnitt 2)

Die Bezeichnung der Messpunkte folgt der im Messpunkt 1 vorgestellten Methodik. Aus dem Messschnitt 2 ergeben sich bei der Auswertung der DMS 16 Messkanäle.

Messschnitt 3

In der Abbildung 5.61 ist die Lage des Messchnittes 3 dargestellt. In diesem Messschnitt wird der Querträger 14 an den gezeigten Punkten 1 bis 6 analysiert.

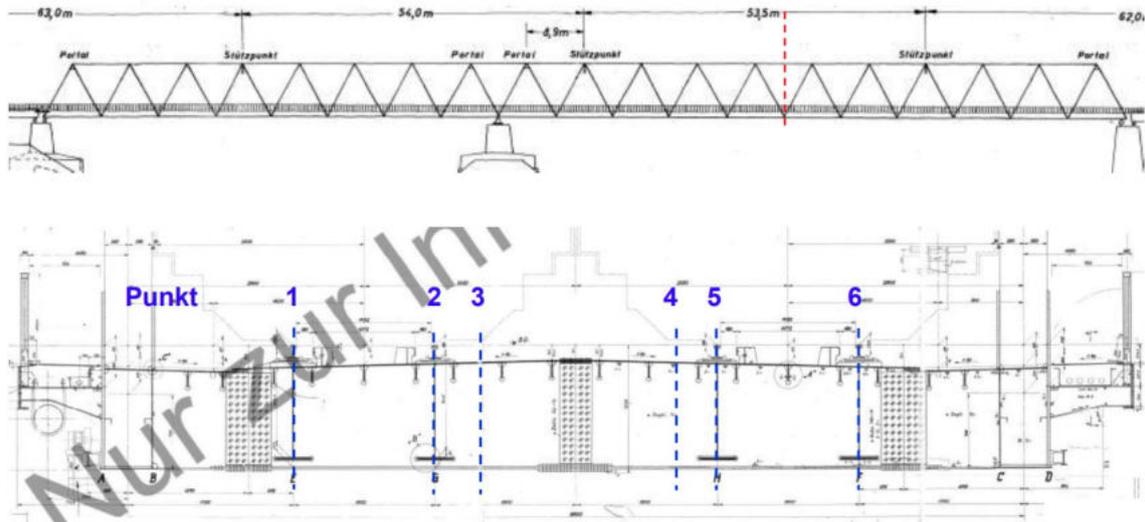


Abbildung 5.61: Lage des Messchnittes 3

Die Abbildung 5.62 veranschaulicht die Benennung der Messpunkte des Querträgers in Punkt 1. Die Applikation der DMS geschieht am Untergurt des Querträgers. Die Blickrichtung der Abbildung 5.62 ist quer zum Gleis. Die Benennung der Messpunkte in den Punkten 2, 5, 6 findet hinsichtlich der Bezeichnung analog zu Punkt 1 statt.

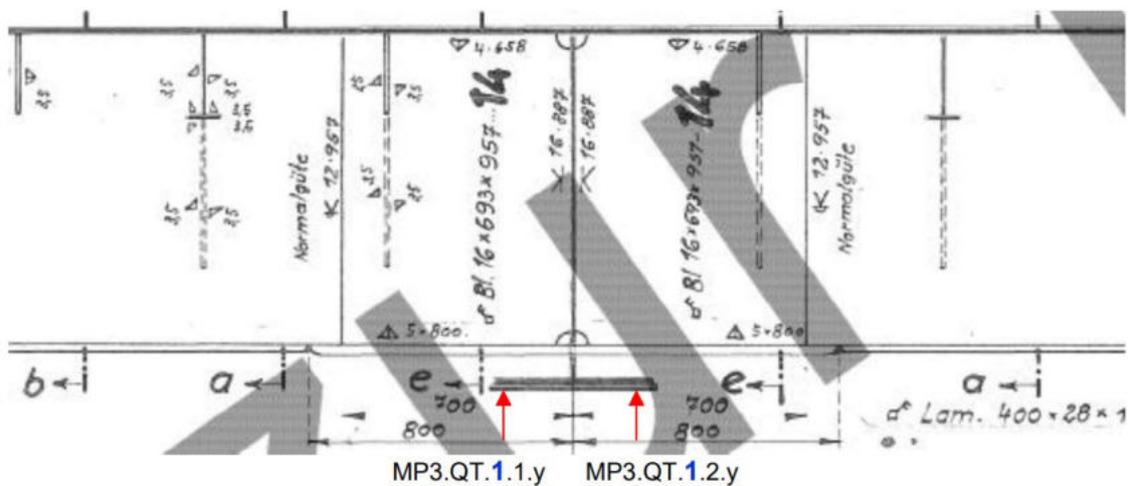


Abbildung 5.62: Messkonzept Punkt 1 Messschnitt 3

Die Abbildung 5.64 bildet die Lage des Messschnittes 4 ab. In diesem Messschnitt wird der Querträger 19 an den Punkten 1 bis 6 untersucht. Die Abbildung 5.65 beschreibt die Benennung der Messpunkte des Querträgers in Punkt 1. Die DMS werden am Untergurt des Querträgers appliziert. Die Blickrichtung der Abbildung ist quer zum Gleis. Die Benennung der Messpunkte in den Punkten 2, 5, 6 wird analog zu Punkt 1 vorgenommen.

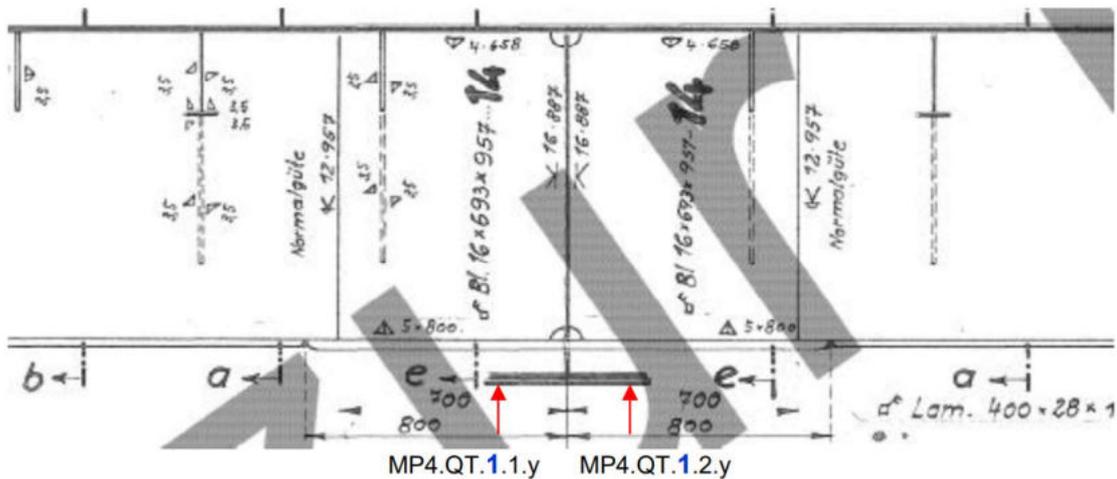


Abbildung 5.65: Messkonzept Punkt 1 Messschnitt 4

In der Abbildung 5.66 ist die Benennung der Messpunkte des Querträgers in Punkt 3 erkennbar. Die Applikation der DMS geschieht am Untergurt des Querträgers. Die Benennung der Messpunkte im Punkt 4 erfolgt analog zu Punkt 3. Die Rosetten werden nicht analysiert.

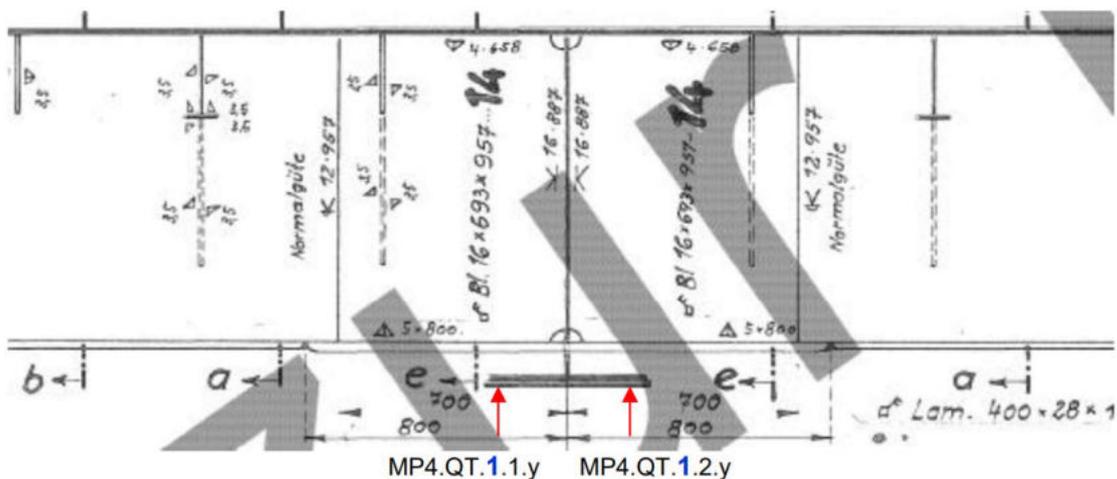


Abbildung 5.66: Messkonzept Punkt 3 Messschnitt 4

Aus dem Messkonzept ergeben sich für den Messschnitt 4 insgesamt 12 zu untersuchende Messkanäle.

Messschnitt 5

Die Abbildung 5.67 stellt die Lage des Messschnittes 5 dar. Es werden die Enddiagonalen sowie die Längsträger im Endfeld betrachtet. Die Abbildung 5.68 bildet die Messpunkte an den Enddiagonalen ab.

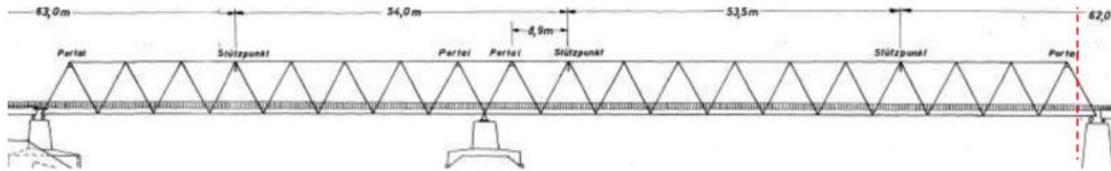


Abbildung 5.67: Lage des Messschnittes 5

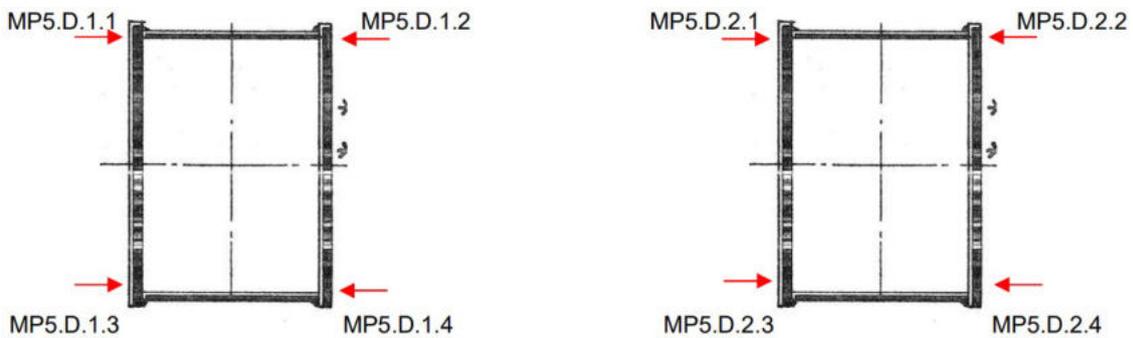


Abbildung 5.68: Messkonzept Enddiagonalen Messschnitt 5

In Abbildung 5.69 sind die messtechnisch untersuchten Längsträger aufgezeigt. Es werden lediglich die applizierten DMS ausgewertet. Die Rosetten am Fahrbahnblech und am Längsträger sind nicht Inhalt dieser Arbeit.

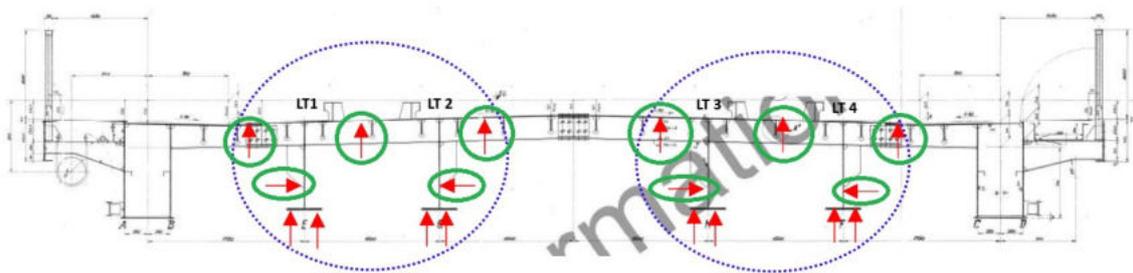


Abbildung 5.69: Lage der Messpunkte des Längsträgers Messschnitt 5

Für den Messschnitt 5 ergeben sich 16 zu untersuchende Messpunkte. Insgesamt sind 72 Messpunkte für Brücke 4 auszuwerten.

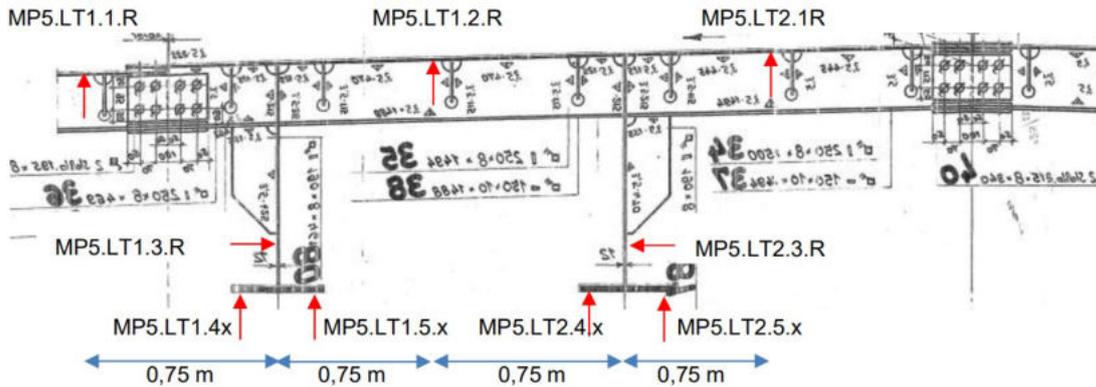


Abbildung 5.70: Messkonzept Längsträger 1 und 2 Messschnitt 5

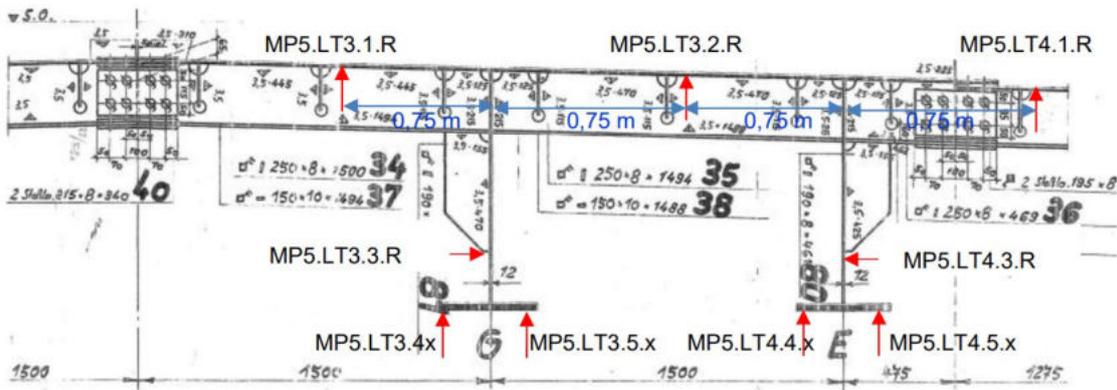


Abbildung 5.71: Messkonzept Längsträger 3 und 4 Messschnitt 5

5.4.4 Verkehrslasten



Abbildung 5.72: Belastungslok BR 182 mit ihren Achslasten und Achsabständen – Bildquelle: <https://tinyurl.com/2emdw2v6>

Die Ermittlung der messwertgestützten Spannungseinflusslinie sowie des dynamischen Beiwertes erfolgt auf Basis von Fahrten einer 4-achsigen Belastungsllok des Typs BR 182 mit einer Achslast von jeweils 22,5 t in verschiedenen Geschwindigkeitsstufen. Achslasten und Achsabstände können der Abbildung 5.72 entnommen werden. Die Versuche wurden mit den Geschwindigkeitsstufen $v = 10$ km/h, $v = 30$ km/h sowie $v_{\max} = 60$ km/h durchgeführt. Um eine statistisch sichere Aussage zu den Ergebnissen der Untersuchung tätigen zu können, sind je Geschwindigkeitsstufe jeweils vier Messfahrten nötig.

5.4.5 Ermittlung und Prüfung der Fahrgeschwindigkeiten

Im Rahmen der Auswertung ist zunächst eine Einordnung der erzeugten Messdaten in Geschwindigkeitsstufen vorzunehmen. Bei der Brücke 4 ist eine Unterteilung der Messdaten erforderlich, da die Brücke auf zwei Gleisen befahren wird. Es erfolgt dementsprechend eine Auswertung je Gleis. Die Bestimmung der Geschwindigkeiten orientiert sich an der in Kapitel 4.2 näher beschriebenen Vorgehensweise. Im Anschluss wird eine Plausibilitätskontrolle sowie ggf. der Ausschluss einzelner Messfahrten durchgeführt. Im Anhang 4 - A befindet sich eine detaillierte Darstellung der Ermittlung der Fahrgeschwindigkeiten für die vorliegende Eisenbahnüberführung sowie die Einordnung der Qualität der Ergebnisse.

Aus den Messungen der Lichtschranken ergeben sich für Gleis 1 folgende Geschwindigkeitsbereiche mit ihren zugehörigen Messfahrten:

$v = 10$ km/h		8 Messfahrten
$v = 30$ km/h		6 Messfahrten
$v = 60$ km/h		10 Messfahrten

Die messtechnische Untersuchung von Gleis 2 wurde mit folgender Anzahl an Messfahrten durchgeführt:

$v = 10$ km/h		8 Messfahrten
$v = 30$ km/h		6 Messfahrten
$v = 60$ km/h		9 Messfahrten

5.4.6 Analyse und Verarbeitung der Messdaten

Im Weiteren erfolgt eine kurze Beschreibung der Datenverarbeitung und Auswertung. Dabei wird auf Besonderheiten der vorliegenden Brücke eingegangen.

Ermittlung der Spannungen

Zur Bestimmung der Spannungen aus den gemessenen Dehnungen wird bei allen Messreihen ein Nullabgleich mit den ersten 100 Datenpunkten durchgeführt sowie ein Tiefpassfilter mit der Messfrequenz 300 Hz und Grenzfrequenz 20 Hz angewendet. Das Ergebnis dieses Bearbeitungsschrittes ist eine Verminderung des Oszillierens sowie eine Annäherung der Messkurve an die Null.

Statistische Bewertung der Messdaten

Die Messdaten weisen für beide Gleise über alle Geschwindigkeitsstufen durchgehend geringe relative Fehler $< 5 \%$ innerhalb der Messfahrten auf. Die Messdaten können demzufolge vollständig zur Auswertung herangezogen werden. Die Auswertung der Spannungen kann dem Anhang 4 - B entnommen werden.

Bestimmung des dynamisches Zuwachses und Beiwertes

Für die Ermittlung der dynamischen Zuwächse und Beiwerte wird die Grenzspannung auf 8 N/mm^2 gesetzt. Die Herabsetzung des Grenzwertes im Vergleich zu den vorangegangenen Brücken wurde festgelegt, da das Beanspruchungsniveau der einzelnen Messpunkte bei dieser Brücke weitestgehend geringer, aber dennoch mit geringen Schwankungen verbunden war. Dieses Vorgehen führt demzufolge dazu, dass mehr Messpunkte für die Berechnung des messwertgestützten Schwingfaktors berücksichtigt werden können. Alle Spannungen, die kleiner als dieser Grenzwert sind, bleiben in der weiteren Auswertung unberücksichtigt. Die Einführung dieses Grenzwertes dient als Maßnahme zur Reduktion des Einflusses des Messrauschens. Das Ergebnis der ermittelten Beiwerte und Zuwächse kann dem Anhang 4 - C entnommen werden.

Messwertgestützte Spannungseinflusslinien

Die Erstellung der Spannungseinflusslinien für Gleis 1 der Brücke 4 bei $v = 10 \text{ km/h}$ erfolgt mit der Loküberfahrt „Fahrt046“, da während dieser Fahrt die geringsten Schwankungen in der Geschwindigkeit festgestellt werden konnten und die ermittelten Spannungen sich dem statistischen Mittelwert nähern. Für die Erstellung der Spannungseinflusslinien aus einer Überfahrt auf Gleis 2 für $v = 10 \text{ km/h}$ wird die Fahrt „Fahrt062“ verwendet.

Bestimmung des messwertgestützten Schwingfaktors

Zunächst sind die maßgebenden Spannungen des Lastmodells 71 sowie der Idealtypen zu filtern. Die Ermittlung erfolgt je Gleis. Die Daten sind im Anhang 4 - D einsehbar. Die Schwingfaktoren werden anhand der Gleichungen (4.24), (4.25) und (4.26) für jeden ausgewerteten Messpunkt bestimmt. Anschließend wird der maßgebende Schwingfaktor bauteilbezogen ermittelt, der letztlich unabhängig vom Gleis angesetzt wird. Die Ermittlung der Schwingfaktoren kann dem Anhang 4 - E entnommen werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden im folgenden Abschnitt behandelt.

5.4.7 Ergebnisse der Messdatenauswertung

Untergurt (Hauptträger)

Die Auswertung des für den Schwingfaktor Φ_{obs} maßgebenden Untergurtes 9 erfolgt im Messschnitt 1 der Brücke 4 (über der Zwischenstützung). Der Untergurt 9 erfährt in diesem Messschnitt bei Überfahrt über das Gleis 2 die größte Beanspruchung. Da die Schwingfaktoren in allen untersuchten Messschnitten identisch sind, ist diese Auswertung repräsentativ für alle Auswertungspunkte der Untergurte.

In der Abbildung 5.73 ist der Spannungsverlauf des Untergurtes sichtbar. Hier wird deutlich, dass lediglich die Messpunkte an der Unterseite des Trägers („MP1.U.2.3x“ bzw. „MP1.U.2.4x“) auswertungstechnisch relevante Spannungen hervorrufen. Da die Untersuchung über der Zwischenstützung erfolgt, treten im Untergurt Druckspannungen auf. Der Maximalwert der Druckspannung aus quasi-statischer Überfahrt mit $v = 10$ km/h beträgt $\sigma = 16,57$ N/mm². Der geringer belastete Messpunkt „MP1.U.2.4x“ weist Spannungen in Höhe von $\sigma = 13,34$ N/mm² auf. Die Spannungsdifferenzen rühren aus unterschiedlich stark ausgeprägter Biegung um die schwache Achse sowie Wölbkrafttorsion her. Bei einer Loküberfahrt mit $v_{\text{max}} = 60$ km/h ist im maßgebenden Messpunkt „MP1.U.2.3x“ eine Spannungszunahme feststellbar. Die Spannung beträgt $\sigma = 17,22$ N/mm². Die Tabelle 5.27 gibt einen Überblick über die dynamischen Zuwächse und Beiwerte im betrachteten Messschnitt des Untergurtes 9. Die dort aufgelisteten Werte sind zuvor unter Berücksichtigung einer statistischen Bewertung aller Messfahrten der jeweiligen Geschwindigkeitsstufe ermittelt worden. Für den Punkt „MP1.U.2.3x“ ist demzufolge eine leichte Spannungszunahme bei Erhöhung der Überfahrtgeschwindigkeit feststellbar. Diese ist jedoch in einem solch geringen Maß, dass eine dynamische Anregbarkeit der Brücke innerhalb der gefahrenen Geschwindigkeiten ausgeschlossen werden kann.

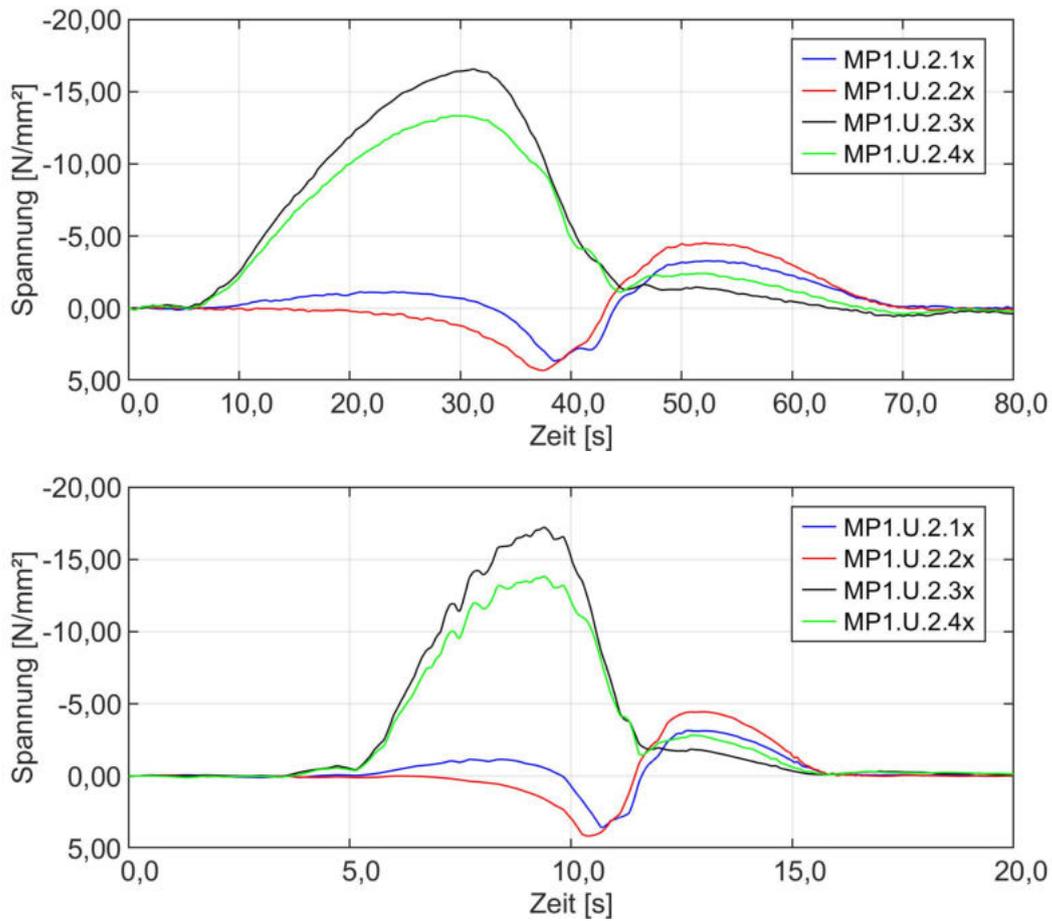


Abbildung 5.73: Spannungsverlauf Untergurt 9 (Hauptträger) im Messschnitt 1 für $v = 10$ km/h (oben) und $v_{\max} = 60$ km/h (unten)

Tabelle 5.27: Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungslök am Untergurt (Hauptträger) Brücke 4

Untergurt 9 (Messschnitt 1) Brücke 4					
dynamischer Effekt	Geschwindigkeit	U.2.1x	U.2.2x	U.2.3x	U.2.4x
dynamischer Zuwachs in N/mm^2	10 km/h	—	—	-0,52	-0,35
	30 km/h	—	—	-0,83	-0,57
	60 km/h	—	—	-0,80	-0,52
	maßgeb.	—	—	-0,80	-0,57
dynamischer Beiwert in —	10 km/h	—	—	1,05	1,04
	30 km/h	—	—	1,05	1,04
	60 km/h	—	—	1,05	1,04
	maßgeb.	—	—	1,05	1,04

Für den zuvor beschriebenen Messpunkt „MP1.U.2.3x“ resultiert ein dynamischer Zuwachs in Höhe von $\Delta\sigma = -0,80 \text{ N/mm}^2$ mit einem zugehörigen dynamischen Beiwert von $1 + \varphi = 1,05$.

Tabelle 5.28: Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Untergurt (Hauptträger) Brücke 4

Untergurt 9 (Messschnitt 1) Brücke 4					
Größe	Einheit	U.2.1x	U.2.2x	U.2.3x	U.2.4x
Spannung LM 71	N/mm ²	—	—	-112,99	-96,82
Spannung Blz 1		—	—	-104,98	-92,31
maßg. Geschw.	km/h	—	—	30	30
maßg. dyn. Zuwachs	N/mm ²	—	—	-0,83	-0,57
maßg. dyn. Beiwert	—	—	—	1,05	1,04
$\Phi_{\text{obs,I}} = \frac{\sigma_{\text{LM71}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	—	—	—	1,01	1,01
$\Phi_{\text{obs,II}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	—	—	—	1,00	1,00
$\Phi_{\text{obs,III}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} \cdot (1 + \varphi(v))}{\sigma_{\text{LM71}}}$	—	—	—	1,00	1,00

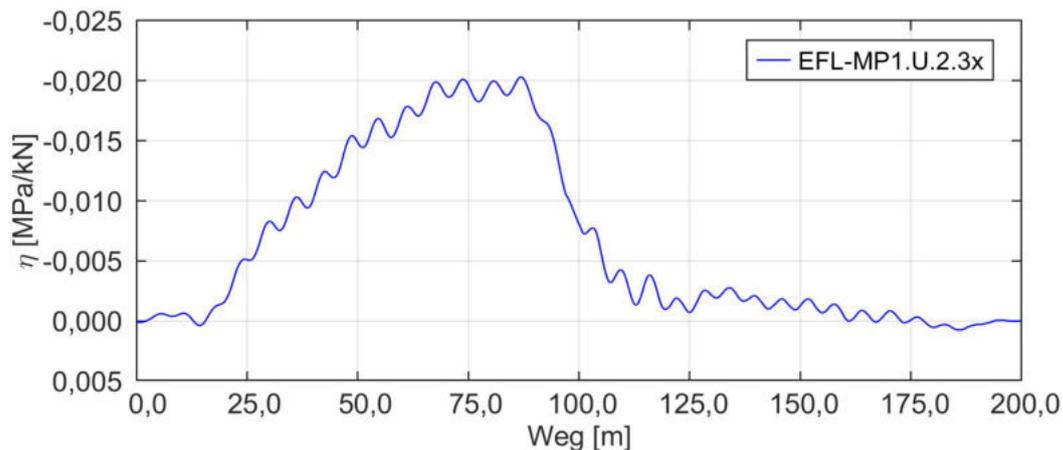


Abbildung 5.74: Einflusslinie Untergurt Brücke 4 resultierend aus „Fahrt062“ auf Gleis 2

In der Tabelle 5.28 wird die Auswertung der aus der Überfahrt des LM 71 sowie des maßgebenden Betriebslastenzuges 1 ermittelten Spannungen durchgeführt. Erkennbar ist, dass das LM 71 mit $\sigma = -112,99 \text{ N/mm}^2$ größere Druckspannungen hervorruft als der Betriebslastenzug 1 mit $\sigma = -104,98 \text{ N/mm}^2$. Dies führt dazu,

dass lediglich der Schwingfaktor $\Phi_{\text{obs,I}}$ einen Wert größer 1,0 annimmt.

Die Abbildung 5.74 stellt die aus der „Fahrt062“ mit $v = 10 \text{ km/h}$ auf Gleis 2 ermittelte Einflusslinie des Untergurtes 9 dar. Erkennbar ist das stärkere Oszillieren, welches seinen Ursprung jedoch im Verfahren zur Ermittlung der Einflusslinie findet.

Längsträger

Es folgt die Auswertung des für den Schwingfaktor Φ_{obs} maßgebenden Längsträgers 3 im Messschnitt 5 (am Endauflager). Der Längsträger 3 weist in diesem Messschnitt den größten Schwingfaktor auf, sodass diese Auswertung repräsentativ für alle anderen Messpunkte auf den Längsträgern ist.

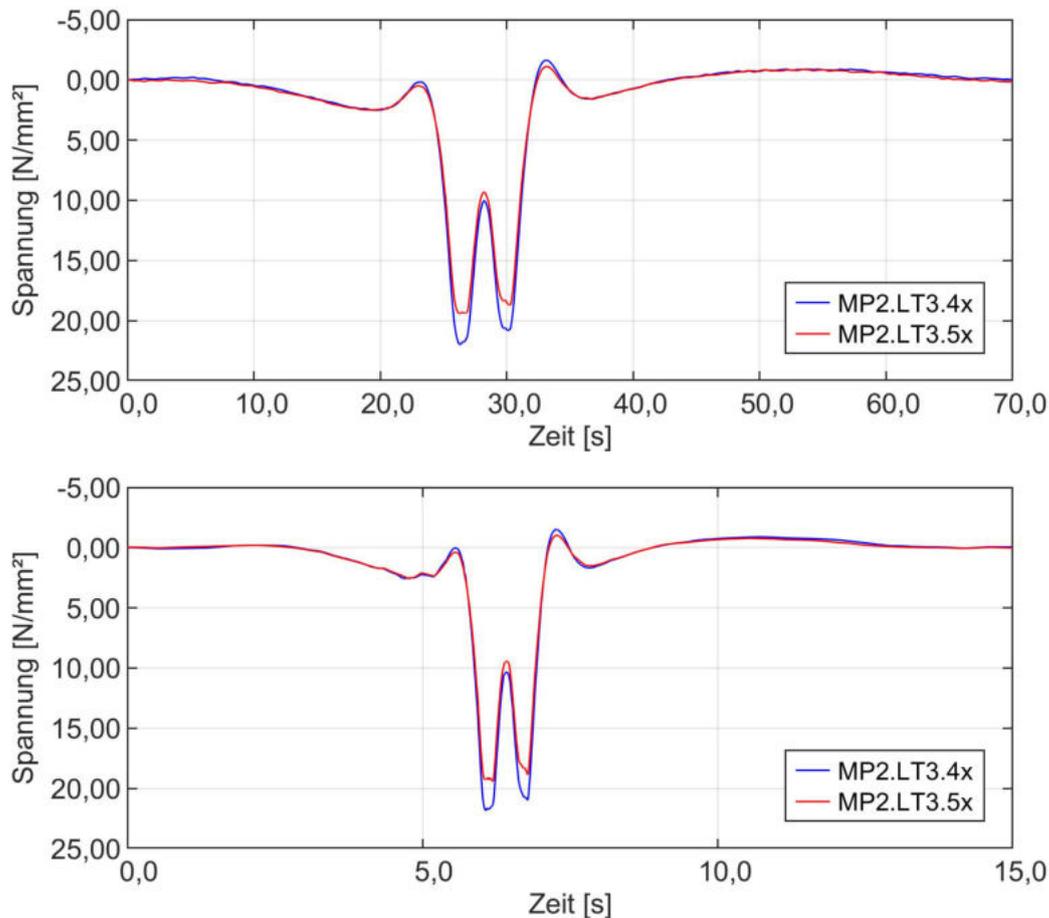


Abbildung 5.75: Spannungsverlauf Längsträger 3 im Messschnitt 5 für $v = 10 \text{ km/h}$ (oben) und $v_{\text{max}} = 60 \text{ km/h}$ (unten)

Die Abbildung 5.75 zeigt den gemessenen Spannungsverlauf des Längsträgers 3 im Messschnitt 5 bei einer Überfahrt mit $v = 10 \text{ km/h}$ und $v_{\text{max}} = 60 \text{ km/h}$ auf

Gleis 2. Am Längsträger 3 erfolgt die messtechnische Untersuchung lediglich am Untergurt des Trägers. Aus dem Spannungsverlauf lässt sich zunächst eine annähernd gleichmäßige Beanspruchung innerhalb des Untergurtes erkennen. Zudem sind die Drehgestelle der Messlok erkennbar. Es ergeben sich maximale Zugspannungen bei quasi-statischer Überfahrt im Messpunkt „MP5.LT3.4x“ von $\sigma = 26,3 \text{ N/mm}^2$. Bei einer Loküberfahrt mit $v_{\max} = 60 \text{ km/h}$ steigt die maximale Spannung auf $\sigma = 26,8 \text{ N/mm}^2$ an. Im Spannungsverlauf des Längsträgers ist eine leichte Durchlaufwirkung erkennbar.

In der Tabelle 5.29 sind die statistisch bewerteten dynamischen Zuwächse und Beiwerte dargestellt. Diese wachsen bis zur ihrem Maximum bei $v_{\max} = 60 \text{ km/h}$ an. Hieraus folgt ein dynamischer Zuwachs in Höhe von $\Delta\sigma = 0,93 \text{ /mm}^2$. Es ergibt sich ein dynamischer Beiwert von $1 + \varphi = 1,04$. Aufgrund der sehr geringen Spannungszunahme kann kein dynamischer Einfluss festgestellt werden.

Tabelle 5.29: Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungslok am Längsträger 3 Brücke 4

Längsträger 3 (Messschnitt 5) Brücke 4			
dynamischer Effekt	Geschwindigkeit	LT3.4x	LT3.5x
dynamischer Zuwachs in N/mm^2	10 km/h	0,43	0,37
	30 km/h	0,54	0,43
	60 km/h	0,93	0,81
	maßgeb.	0,93	0,81
dynamischer Beiwert in –	10 km/h	1,02	1,02
	30 km/h	1,02	1,02
	60 km/h	1,04	1,03
	maßgeb.	1,04	1,03

In der Tabelle 5.30 ist die Auswertung des Schwingfaktors für den Längsträger dargestellt. Aus dem LM 71 ergeben sich maximale Zugspannungen am Untergurt in Höhe von $\sigma = 64,69 \text{ N/mm}^2$. Der maßgebende Betriebslastenzug 6 ruft lediglich Spannungen von $\sigma = 53,15 \text{ N/mm}^2$ hervor. Daraus ist erkennbar, dass das LM 71 im Fall des Längsträgers die Belastung aus dem Betriebslastenzug vollumfänglich abdeckt. Dies spiegelt sich in den ermittelten Schwingfaktoren wider. Lediglich bei der Berechnung des Schwingfaktors auf Grundlage von $\Phi_{\text{obs,I}}$ ist das LM 71 zur Berücksichtigung dynamischer Beanspruchungen faktoriell zu erhöhen.

Die Abbildung 5.76 stellt die maßgebende Einflusslinie dar. Diese folgt der Einflusslinie eines Einfeldträgers mit beidseitig vorhandenen, leichten Einspanneffekten.

Tabelle 5.30: Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Längsträger 3 Brücke 4

Längsträger 3 (Messschnitt 5) Brücke 4			
Größe	Einheit	LT3.4x	LT3.5x
Spannung LM 71	N/mm ²	64,69	63,29
Spannung Blz 6		53,15	50,41
maßg. Geschw.	km/h	60	60
maßg. dyn. Zuwachs	N/mm ²	0,93	0,81
maßg. dyn. Beiwert	–	1,04	1,03
$\Phi_{\text{obs,I}} = \frac{\sigma_{\text{LM71}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	–	1,01	1,01
$\Phi_{\text{obs,II}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	–	1,00	1,00
$\Phi_{\text{obs,III}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} \cdot (1 + \varphi(v))}{\sigma_{\text{LM71}}}$	–	1,00	1,00

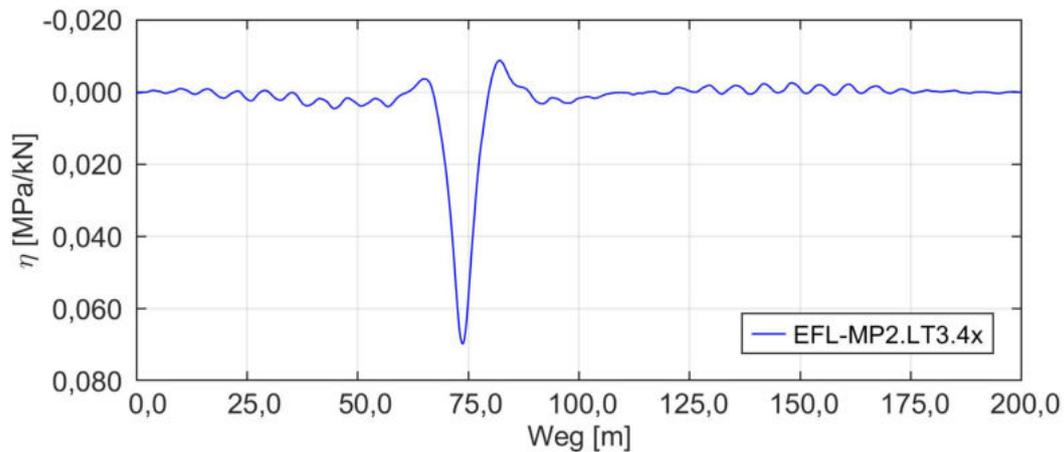


Abbildung 5.76: Einflusslinie Längsträger Brücke 4 resultierend aus „Fahrt062“ auf Gleis 2

Querträger

Es soll der für den Schwingfaktor Φ_{obs} repräsentative Querträger 19 im Punkt 5 des Messschnittes 4 untersucht werden (im Feld in der Nähe des Endauflagers). Die Ergebnisse der messtechnischen Untersuchung werden nachfolgend aufgelistet.

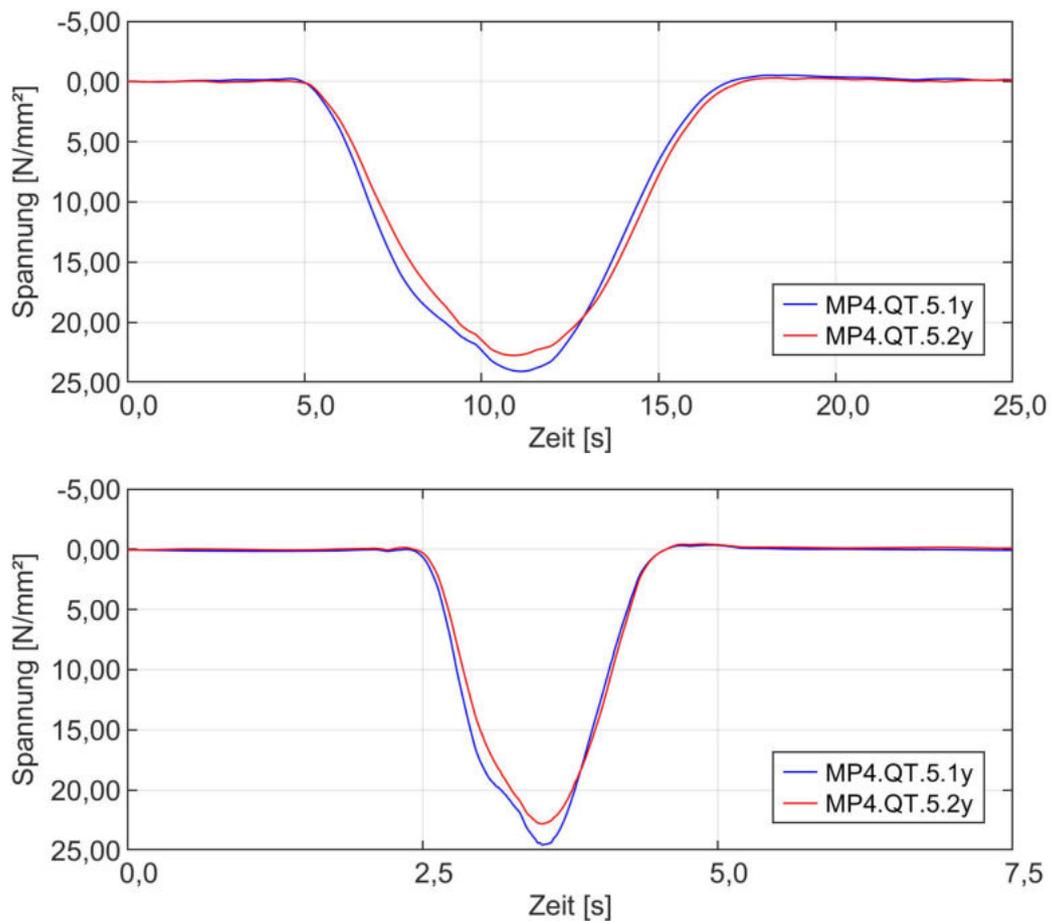


Abbildung 5.77: Spannungsverlauf Querträger 19 im Punkt 5 Messschnitt 4 für $v = 10 \text{ km/h}$ (oben) und $v_{\max} = 60 \text{ km/h}$ (unten)

Tabelle 5.31: Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungsllok am Querträger 19 Brücke 4

Querträger 19 im Punkt 5 (Messschnitt 4) Brücke 4			
dynamischer Effekt	Geschwindigkeit	QT.5.1y	QT.5.2y
dynamischer Zuwachs in N/mm^2	10 km/h	0,29	0,18
	30 km/h	0,27	0,20
	60 km/h	0,47	0,23
	maßgeb.	0,47	0,23
dynamischer Beiwert in –	10 km/h	1,01	1,01
	30 km/h	1,01	1,01
	60 km/h	1,02	1,01
	maßgeb.	1,02	1,01

In Abbildung 5.77 sind die Spannungen aus Loküberfahrt bei $v = 10$ km/h und $v_{\max} = 60$ km/h dargestellt. Es ist erkennbar, dass beide Messpunkte am Untergurt des Querträgers nahezu gleich belastet werden. Es ist keine Durchlaufwirkung zu sehen, was auf einen gelenkigen Anschluss der Querträger hindeutet. Die maximale Zugspannung bei quasi-statischer Überfahrt beträgt im Messpunkt „MP4.QT.5.1y“ $\sigma = 24,07$ N/mm². Dieser Wert wächst bei höheren Fahrgeschwindigkeiten der Messlok auf $\sigma = 24,6$ N/mm² an. Bei der Betrachtung der Spannungen über alle Messfahrten lässt sich ein ähnliches Ergebnis feststellen. Wie in Tabelle 5.31 dargestellt, ergibt sich für den maßgebenden Querträger 19 nur ein geringer Spannungszuwachs bei v_{\max} von $\Delta\sigma = 0,47$ N/mm². Dieser äußert sich in einem dynamischen Beiwert von $1 + \varphi = 1,02$. Somit ist kein Aufschwingen der Brücke zu beobachten.

Tabelle 5.32: Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen am Querträger 19 Brücke 4

Querträger 19 im Punkt 5 (Messschnitt 4) Brücke 4			
Größe	Einheit	QT.5.1y	QT.5.2y
Spannung LM 71	N/mm ²	65,14	62,24
Spannung Blz 6		67,08	63,59
maßg. Geschw.	km/h	60	60
maßg. dyn. Zuwachs	N/mm ²	0,47	0,23
maßg. dyn. Beiwert	–	1,02	1,01
$\Phi_{\text{obs,I}} = \frac{\sigma_{\text{LM71}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	–	1,01	1,00
$\Phi_{\text{obs,II}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	–	1,04	1,03
$\Phi_{\text{obs,III}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} \cdot (1 + \varphi(v))}{\sigma_{\text{LM71}}}$	–	1,05	1,03

In der Tabelle 5.32 sind die aus der Überfahrt des LM 71 sowie des maßgebenden Betriebslastenzuges 6 ermittelten Spannungen dargestellt. Der maßgebende Messpunkt ist der zuvor genannte Messpunkt „MP4.QT.5.1y“. Dieser weist eine maximale Zugspannung aus dem LM 71 in Höhe von $\sigma = 65,14$ N/mm² auf. Aus dem Betriebslastenzug 6 werden Spannungen in Höhe von $\sigma = 67,08$ N/mm² hervorgerufen. Die Spannungen aus dem Betriebslastenzug sind demzufolge größer als die des LM 71. Hieraus ergeben sich die dargestellten Schwingfaktoren, wobei $\Phi_{\text{obs,III}}$ die größte Erhöhung hervorruft.

In der Abbildung 5.78 ist die maßgebende Einflusslinie des Querträgers dargestellt. Es ist erkennbar, dass der Querträger sich wie ein Einfeldträger verhält. Die Nulllinie ist aufgrund des Oszillierens nur eingeschränkt darstellbar.

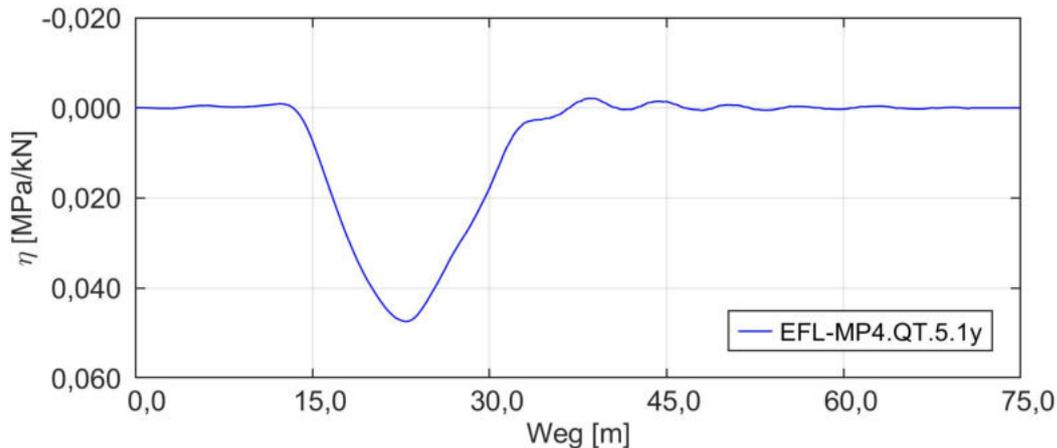


Abbildung 5.78: Einflusslinie Querträger Brücke 4 resultierend aus „Fahrt062“ auf Gleis 2

Diagonale

Abschließend wird die für den Schwingfaktor Φ_{obs} repräsentative Enddiagonale 38 im Messschnitt 5 (am Endauflager) untersucht. Die Ergebnisse der messtechnischen Untersuchung stellen sich wie folgt dar.

Die Abbildung 5.79 bildet die ermittelten Spannungen in der Diagonale 38 bei quasi-statischer Überfahrt und bei Überfahrt mit v_{max} ab. Aus dem Verlauf ist erkennbar, dass die Enddiagonale lediglich Druckspannungen in allen vier Messpunkten aufweist. Im Messpunkt „MP5.D.2.4“ stellen sich an der unteren Hälfte des Trägers maximale Druckspannungen von $\sigma = -15,34 \text{ N/mm}^2$ ein. Aufgrund des vorhandenen Messrauschens lässt sich die Nulllinie nur bedingt annähern.

In der Tabelle 5.33 sind die zugehörigen dynamischen Zuwächse und Beiwerte aus allen Messfahrten dargestellt. Diese wurden zuvor statistisch bewertet. Im Allgemeinen ist kein Aufschwingen innerhalb der Messwerte erkennbar, da diese mit einer maximalen Zunahme von $\Delta\sigma = -0,84 \text{ N/mm}^2$ im Messpunkt „MP5.D.2.4“ sehr gering ausfallen. Der maximale dynamische Beiwert ergibt sich im Messpunkt „MP5.D.2.3“. Er beträgt $1 + \varphi = 1,07$.

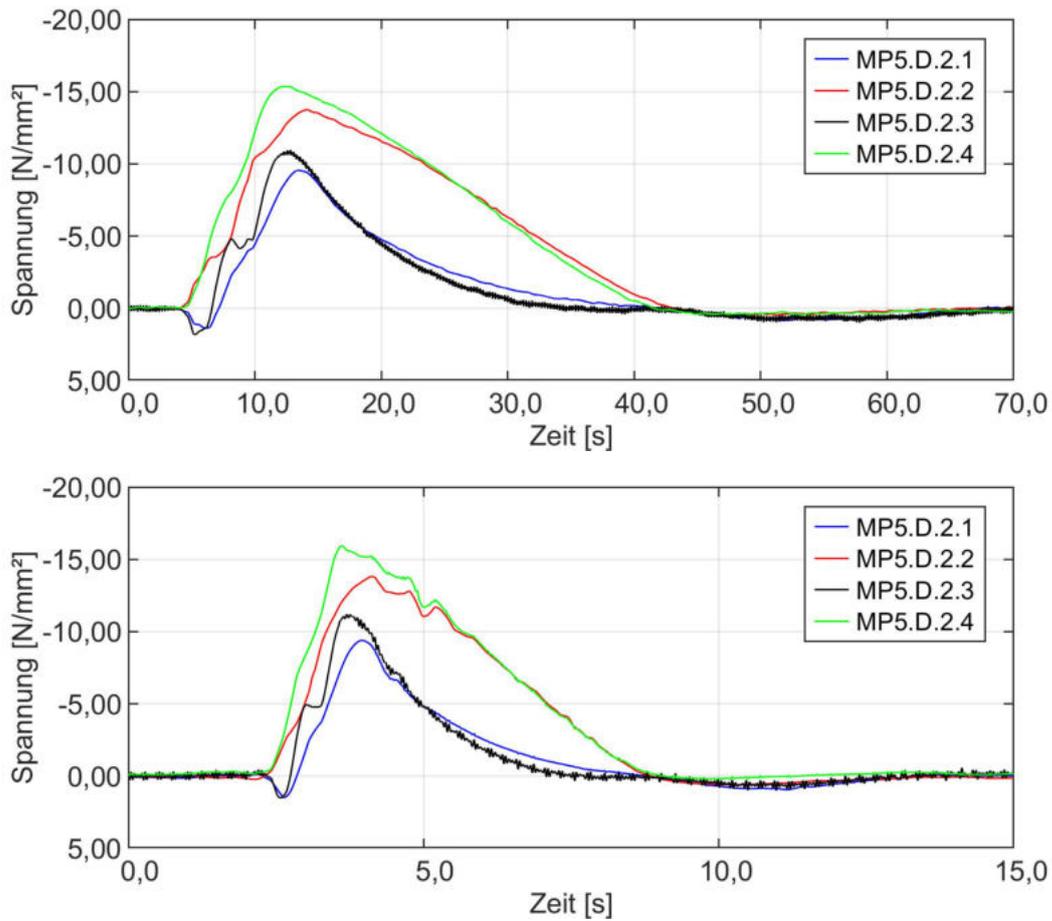


Abbildung 5.79: Spannungsverlauf Diagonale 38 im Messschnitt 5 für $v = 10 \text{ km/h}$ (oben) und $v_{\max} = 60 \text{ km/h}$ (unten)

Tabelle 5.33: Dynamische Zuwächse und Beiwerte infolge der Belastungslök an der Diagonale 38 Brücke 4

Diagonale 38 (Messschnitt 5) Brücke 4					
dynamischer Effekt	Geschwindigkeit	D.2.1	D.2.2	D.2.3	D.2.4
dynamischer Zuwachs in N/mm^2	10 km/h	-0,21	-0,18	-0,41	-0,25
	30 km/h	-0,27	-0,42	-0,68	-0,52
	60 km/h	-0,38	-0,28	-0,73	-0,84
	maßgeb.	-0,38	-0,42	-0,73	-0,84
dynamischer Beiwert in –	10 km/h	1,03	1,03	1,06	1,03
	30 km/h	1,03	1,03	1,06	1,03
	60 km/h	1,04	1,02	1,07	1,05
	maßgeb.	1,04	1,03	1,07	1,05

Tabelle 5.34: Schwingfaktoren mit den jeweiligen Eingangsgrößen an der Diagonale 38 Brücke 4

Diagonale 38 (Messschnitt 5) Brücke 4					
Größe	Einheit	D.2.1	D.2.2	D.2.3	D.2.4
Spannung LM 71	N/mm ²	-39,50	-82,35	-40,66	-89,92
Spannung Blz 1		-35,42	-76,51	-39,99	-82,21
maßg. Geschw.	km/h	60	30	60	60
maßg. dyn. Zuwachs	N/mm ²	-0,38	-0,42	-0,73	-0,84
maßg. dyn. Beiwert	–	1,04	1,03	1,07	1,05
$\Phi_{\text{obs,I}} = \frac{\sigma_{\text{LM71}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	–	1,01	1,01	1,02	1,01
$\Phi_{\text{obs,II}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	–	1,00	1,00	1,00	1,00
$\Phi_{\text{obs,III}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} \cdot (1 + \varphi(v))}{\sigma_{\text{LM71}}}$	–	1,00	1,00	1,05	1,00

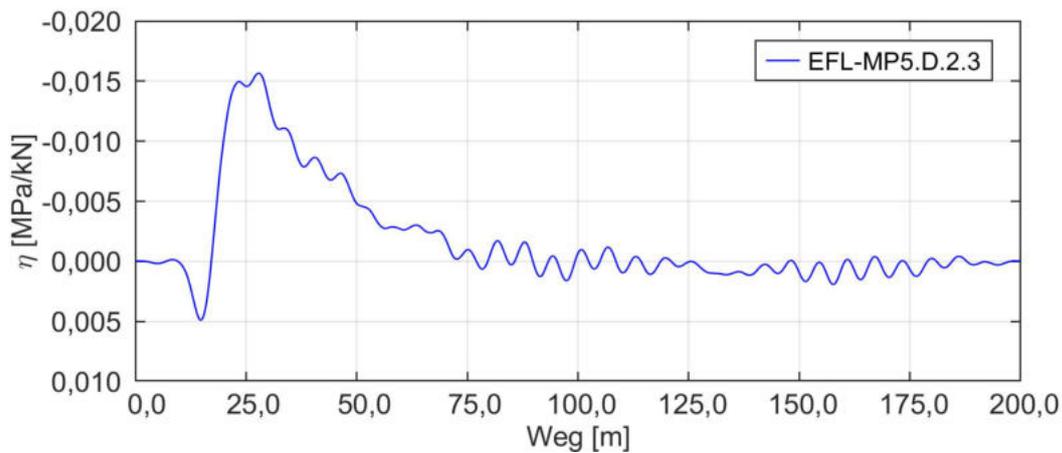


Abbildung 5.80: Einflusslinie Diagonale Brücke 4 resultierend aus „Fahrt062“ auf Gleis 2

Die Tabelle 5.34 führt die ermittelten Spannungen und Schwingfaktoren auf. Aus den Spannungen lässt sich ableiten, dass die Beanspruchung aus dem LM 71 die des maßgebenden Betriebslastenzuges 1 teilweise deutlich übersteigt. Dies führt dazu, dass in drei von vier Messpunkten, trotz höherer dynamischer Beiwerte, lediglich der Schwingfaktor $\Phi_{\text{obs,I}}$ zu einer Erhöhung des LM 71 führt. Im Messpunkt „MP5.D.2.3“ treten geringe minimale Spannungen aus dem LM 71 mit $\sigma = -40,66 \text{ N/mm}^2$ auf. Die Überfahrt des Betriebslastenzuges 1 über die in Abbildung 5.80 dargestellte

Einflusslinie, ruft minimale Spannungen von $\sigma = -39,99 \text{ N/mm}^2$ hervor. Aufgrund des dynamischen Beiwertes von $1 + \varphi = 1,07$ ergibt sich für diesen Messpunkt ein maßgebender Schwingfaktor von $\Phi_{\text{obs,III}} = 1,05$.

Zusammenfassung

Abschließend werden die ermittelten Schwingfaktoren für die Brücke 4 dargestellt. Zur Gegenüberstellung wird zusätzlich der nach DIN EN 1991-2 bzw. DIN EN 1991-2/NA ermittelte Schwingfaktor Φ_{cal} unter der Vorgabe, dass es sich bei offener Bauweise ohne Schotterbett um Gleise mit sorgfältiger Instandhaltung handelt. Die Ermittlung des Schwingfaktors aus der Norm kann dem Anhang 4 - F entnommen werden.

Tabelle 5.35: Maßgebende bauteilbezogene Schwingfaktoren der Brücke 4

maßgebender bauteilbezogener Schwingfaktor Brücke 3					
Schwingfaktor	Einheit	HT	LT	QT	D
$\Phi_{\text{obs,I}} = \frac{\sigma_{\text{LM71}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	–	1,01	1,01	1,01	1,02
$\Phi_{\text{obs,II}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}}$	–	1,00	1,00	1,04	1,00
$\Phi_{\text{obs,III}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} \cdot (1 + \varphi(v))}{\sigma_{\text{LM71}}}$	–	1,00	1,00	1,05	1,05
$\Phi_{\text{cal}} = \frac{1,44}{\sqrt{L_{\Phi} - 0,2}} + 0,82$	–	1,00	1,26	1,17	1,00

6 Einordnung und Diskussion der Ergebnisse

6.1 Vorschlag einer Definition zur Ermittlung des messwertgestützten Schwingfaktors

Die Berechnung der Schwingfaktoren im Rahmen der Auswertung der vier Vollwandträgerbrücken im Kapitel 5 erfolgte für die drei nachstehenden Varianten. Im Weiteren sollen die Hintergründe, Vor- und Nachteile diskutiert sowie die Vorzugsvariante festgelegt werden.

$$\Phi_{\text{obs,I}} = \frac{\sigma_{\text{LM71}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}} \geq 1, 0 \quad (6.1)$$

$$\Phi_{\text{obs,II}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} + \Delta\sigma(v)}{\sigma_{\text{LM71}}} \geq 1, 0 \quad (6.2)$$

$$\Phi_{\text{obs,III}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} \cdot (1 + \varphi(v))}{\sigma_{\text{LM71}}} \geq 1, 0 \quad (6.3)$$

Im Wesentlichen ist gegen die Anwendung der ersten Berechnungsvariante der Widerspruch zum generellen Vorgehen zur Ermittlung des Schwingfaktors auf Basis der derzeitigen Normung in Form der DIN EN 1991-2 anzuführen, welche auf die im Kapitel 2.2.2 und [15] durch PROMMERSBERGER beschriebene Forschung des ORE zurückgeht. Die Aufgabe des Schwingfaktors ist, die Lasten resultierend aus dem LM 71 so zu skalieren, dass die statischen sowie dynamischen Beanspruchungen aus den sechs idealen Betriebslastenzügen abgedeckt werden können. Bei dieser Berechnungsvariante fehlt jedoch jeglicher Bezug zu den idealen Betriebslastenzügen. Zusätzlich setzt der erste Ausdruck voraus, dass das Lastmodell 71 stets in vollem Umfang die Beanspruchungen aller sechs idealen Betriebslastenzüge abdeckt bzw. dieselbe Beanspruchung hervorruft wie der maßgebende Betriebslastenzug. Dass dies nicht in jedem Fall gegeben ist, konnte durch die Auswertung der Brücken innerhalb des Kapitels 5 dieser Arbeit bestätigt werden. Grundsätzlich übersteigt die Spannung infolge des LM 71 in den vielen Fällen die Spannung des maßgebenden Betriebslastenzuges, sodass die Gleichung (6.1) in der Regel den realen Schwingfak-

tor überschätzt. Hieraus folgt, dass der erste Berechnungsansatz seitens der Verfasser dieser Arbeit nicht als Hauptansatz empfohlen werden kann.

Dieser Berechnungsansatz bringt dennoch einen Vorteil mit sich. Die in der Gleichung (6.1) gestellten Forderung ist nur dann nicht erfüllt, wenn bei hohen Beanspruchungen kaum dynamische Zuwächse zu verzeichnen sind. Dies führt dazu, dass sich für das Bauteil nur in seltenen Fällen Schwingfaktoren Φ_{obs} ergeben, die einen Wert von 1,0 annehmen. Dies hat eine indirekte Sicherheit zur Folge, den ermittelten messwertgestützten Schwingfaktor nicht zu unterschätzen. Die von der Fachstelle Brückenmessung I.IAI 32 durchgeführten messtechnischen Untersuchungen sowie die anschließenden Auswertungen der Messdaten sind mit einer gewissen Fehleranfälligkeit behaftet. Im Bereich der Messung wird diese beispielsweise durch äußere Umwelteinflüsse begründet. Um diesen Ungenauigkeiten und Abweichungen in der Messung Rechnung zu tragen, sehen die Verfasser dieser Arbeit trotz fehlerhafter Definition des messwertgestützten Schwingfaktors Φ_{obs} die Möglichkeit, die Berechnung nach Gleichung (6.1) als Nebenbedingung einzusetzen, da diese, wie zuvor beschrieben, häufig den Wert 1,0 übersteigt. Die genaue Definition der Nebenbedingung erfolgt im Anschluss an die Diskussion der anderen beiden Berechnungsvarianten.

Der zweite Ausdruck bedient sich der Addition des dynamischen Spannungszuwachses $\Delta\sigma$ zu der Spannung des maßgebenden ideellen Betriebslastenzuges. Diese Summe wird auf die Spannung, die sich aus dem LM 71 ergibt, bezogen. Die Definition geht auf die Veröffentlichung [33] von WEBER zurück. Der aus den Messungen ermittelte dynamische Spannungszuwachs $\Delta\sigma$ stammt aus der Überfahrt der Belastungslök. Damit besteht keine direkte Abhängigkeit zu sämtlichen anderen Betriebslastenzügen. Nach [33] ist $\Delta\sigma$ jedoch unabhängig vom Fahrzeuggewicht sowie dessen Achslasten und hängt nur vom statischen System des Bauteils ab. Über die nachfolgenden Gleichungen kann gezeigt werden, was die Annahme von WEBER über die Gleichheit der dynamischen Spannungszuwächse $\Delta\sigma$ verschiedener Betriebslastenzüge bedeutet.

Der dynamische Beiwert $(1+\varphi)$, ermittelt auf der Grundlage der Messfahrten mit der Belastungslök, ist der Gleichung (6.4) zu entnehmen. Zur besseren Lesbarkeit wird auf die Kennzeichnung der Abhängigkeit der dynamischen Zuwächse und Beiwerte von der Geschwindigkeit in den Gleichungen (6.4) und (6.5) verzichtet.

$$(1 + \varphi) = \frac{\sigma_{\text{Lok}} + \Delta\sigma_{\text{Lok}}}{\sigma_{\text{Lok}}} \quad (6.4)$$

Durch Einsetzen der Gleichung (6.4) in Gleichung (6.3) und Ersetzen der Lok durch einen beliebigen Betriebslastenzug folgt:

$$\begin{aligned}\Phi_{\text{obs,III}} &= \frac{\sigma_{\text{Blz}} \cdot (1 + \varphi)}{\sigma_{\text{LM71}}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} \cdot \frac{\sigma_{\text{Lok}} + \Delta\sigma_{\text{Lok}}}{\sigma_{\text{Lok}}}}{\sigma_{\text{LM71}}} \\ &= \frac{\sigma_{\text{Blz}} \cdot \frac{\sigma_{\text{Blz}} + \Delta\sigma_{\text{Blz}}}{\sigma_{\text{Blz}}}}{\sigma_{\text{LM71}}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} + \Delta\sigma_{\text{Blz}}}{\sigma_{\text{LM71}}} = \Phi_{\text{obs,II}}\end{aligned}\tag{6.5}$$

Es ist ersichtlich, dass die zweite und dritte Berechnungsvariante von Φ_{obs} in der Theorie die gleichen Ergebnisse liefern müssten, sofern der jeweilige Betriebslastenzug denselben Spannungszuwachs $\Delta\sigma$ wie die Messlok liefert. Um dies einordnen zu können, wurden im Anschluss an die Auswertung Untersuchungen durchgeführt, ob der Aussage von WEBER, dass die Spannungszuwächse $\Delta\sigma$ annähernd konstant sind, gefolgt werden kann. Hierfür wurden beispielhaft an Brücke 3 am Querträger, Hauptträger und Längsträger und an Brücke 4 am Querträger die Ermittlung der dynamischen Zuwächse aus dem maßgebenden Betriebslastenzug bei unterschiedlichen Geschwindigkeitsstufen gegenübergestellt. Der Vergleich kann dem Anhang 6 - A entnommen werden. Bei der Auswertung zeigte sich, dass bei exakter Rekonstruktion der Spannungseinflusslinie die dynamischen Zuwächse $\Delta\sigma$ bei Optimalbedingungen, wie bspw. einer konstanten Geschwindigkeit der Überfahrt, nur in einem geringen Maß schwanken. Liegen diese Bedingungen nicht vor, konnten größere Abweichungen festgestellt werden. Aus dieser Untersuchung lässt sich folgern, dass die Annahme von WEBER als Berechnungsansatz grundsätzlich verwendet werden kann, jedoch weitere Untersuchungen zu Bestätigung der Annahme erfolgen sollten.

Anzuführen ist weiterhin, dass die zweite Variante zur Ermittlung des Schwingfaktors in der Praxis den entscheidenden Nachteil hat, dass dort der Absolutwert des Spannungszuwachses $\Delta\sigma$ der Belastungslok eingeht. Aufgrund des Absolutwertes ist keine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Brücken gegeben. Auch die Einordnung und Abschätzbarkeit der dynamischen Zuwächse ist nur bedingt möglich. Hierzu sind zur Veranschaulichung in Tabelle 6.1 einige Zahlenwerte der Brücke 3 exemplarisch aufgeführt. Die dynamischen Zuwächse liegen zwischen 1,14 N/mm² und 2,29 N/mm² bei einem dynamischen Beiwert von 1,10 sowie zwischen 0,43 N/mm² und 0,85 N/mm² bei einem dynamischen Beiwert von 1,03. Dabei ist erkennbar, dass der dynamische Spannungszuwachs $\Delta\sigma$ um 100 % voneinander abweicht bei gleichem dynamischen Beiwert.

Tabelle 6.1: Vergleichbarkeit des dynamischen Spannungszuwachses $\Delta\sigma$ als Absolutwert bei gleichem dynamischen Beiwert $1 + \varphi$

Vergleich dyn. Zuwächse bei gleichem dyn. Beiwert an Brücke 3			
Messpunkt	Bauteil	dyn. Zuwachs	dyn. Beiwert
QT2.1.3y	Querträger	2,28 N/mm ²	1,10
QT2.2.3y		2,29 N/mm ²	
QT5.1.3y		2,29 N/mm ²	
HT3.1.3x	Hauptträger	1,14 N/mm ²	
HT3.2.4x		1,67 N/mm ²	
HT1.1.2x	Hauptträger	0,67 N/mm ²	1,03
HT1.2.3x		0,85 N/mm ²	
HT1.2.4x		0,69 N/mm ²	
HT3.2.3x		0,43 N/mm ²	
LT1.1.2x	Längsträger	0,60 N/mm ²	1,03
LT1.1.3x		0,63 N/mm ²	
QT2.2.2y	Querträger	0,61 N/mm ²	
QT5.1.2y		0,66 N/mm ²	
EQT3.1.2y	Endquerträger	0,60 N/mm ²	
EQT3.1.3y		0,53 N/mm ²	
EQT3.2.2y		0,50 N/mm ²	

Der dritte Ansatz (Gleichung (6.3)) berücksichtigt den dynamischen Spannungszuwachs durch Multiplikation mit dem dynamischen Beiwert $1 + \varphi$. Dadurch wird ein direkter Bezug zum Betriebslastenzug hergestellt. Die Normierung der dynamischen Beanspruchung auf die Belastungslok hat den Vorteil, dass dieses Vorgehen konstantere Ergebnisse liefert als der vorherige Ansatz und demzufolge eine einfachere Abschätzung der dynamischen Erhöhung für jedes Bauteil ermöglicht.

Ein weiterer Vorteil dieser Berechnungsvariante ist der vorhandene Bezug zur Norm, welche ebenfalls dynamische Beiwerte für die einzelnen Bauteile ermittelt. So wäre es beispielsweise möglich nur „quasi-statische“ Messfahrten mit $v = 10$ km/h durchzuführen. Aus den Messwerten kann im Anschluss die Einflusslinie rekursiv ermittelt werden, woraus sich aus Überfahrt mit dem LM 71 bzw. den Betriebslastenzügen die maßgebenden Spannungen ergeben. Für den dynamischen Beiwert sind die Werte aus der Norm einzusetzen. Es muss demnach keine dynamische Untersuchung der Brücke durch Messfahrten in unterschiedlichen Geschwindigkeitsstufen erfolgen. Dieses Vorgehen könnte zum Einsatz kommen, wenn beispielsweise eine Streckensperrung zur Durchführung ausreichend vieler Messfahrten nicht möglich ist. Ebenfalls wird die

anschließende Auswertung aufgrund einer geringeren Anzahl an Messdaten deutlich erleichtert. Nachteilig an dieser Vorgehensweise ist jedoch, dass der Charakter einer messwertgestützten Ermittlung zum Teil verloren geht und Reserven aufgrund des teilweise höheren dynamischen Beiwertes unterschätzt werden.

Auf der Grundlage des dynamischen Beiwertes können ebenfalls weiterführende Größen, wie der R -Wert berechnet werden, welcher in Gleichung (6.6) definiert ist. Dieser dient der Einstufungsberechnung in Streckenklassen nach Ril 458.

$$R = \frac{(1 + \varphi)}{\Phi} \quad (6.6)$$

In der Auswertung in Kapitel 5 ist erkennbar, dass die dritte Definition zur Berechnung des Schwingfaktors $\Phi_{\text{obs,III}}$ grundsätzlich ein größeres Ergebnis liefert als die zweite Definition $\Phi_{\text{obs,II}}$. Dies ist auf die Vorgehensweise der Ermittlung zurückzuführen. Der dynamische Beiwert $1 + \varphi$ bietet eine zusätzliche statistische Sicherheit im Vergleich zum dynamischen Spannungszuwachs $\Delta\sigma$. Auf dem Bruchstrich wird stets das Maximorum und unter dem Bruchstrich das Minimorum verwendet, um dem ungünstigsten Fall Rechnung zu tragen.

Zusammenfassung

Aus den genannten Gründen wird die Gleichung (6.3) als Vorzugsvariante gewählt. Die Qualität der Ergebnisse dieses Ansatzes sowie die Flexibilität und Handhabbarkeit durch den dynamischen Beiwert sind überzeugend. Da die Herangehensweise zur Ermittlung des messwertgestützten Schwingfaktors Φ_{obs} nach Gleichung (6.2) nicht gänzlich verworfen werden kann und weiterer Untersuchungen bedarf, schlagen die Verfasser vor, diese Form der Ermittlung als zweite mögliche Hauptvariante zu berücksichtigen. Als Nebenbedingung ist die Gleichung (6.1) zu berücksichtigen.

Die Ermittlung des messwertgestützten Schwingfaktors Φ_{obs} wird folgendermaßen vorgeschlagen:

- Hauptbedingung:

$$\Phi_{\text{obs}} = \max \begin{cases} \Phi_{\text{obs,III}} \\ \Phi_{\text{obs,II}} \end{cases} > 1, 0$$

- Nebenbedingung:

$$\Phi_{\text{obs}} = \Phi_{\text{obs,I}} \geq 1, 0 \quad \text{wenn: } \Phi_{\text{obs,II}} = \Phi_{\text{obs,III}} = 1, 0$$

6.2 Analyse der messwertgestützten dynamischen Beiwerte sowie des Schwingfaktors in Bezug zur „maßgeblichen Länge“ sowie der Geschwindigkeit

Im Folgenden sollen zunächst die messtechnisch ermittelten dynamischen Beiwerten der DIN EN 1991-2 gegenübergestellt werden. Dafür ist in Abbildung 6.2 die Einordnung der dynamischen Beiwerte in Abhängigkeit der Geschwindigkeit sowie der maßgeblichen Länge aufgetragen. Die Berechnung der oberen (blaue Kurve) und unteren (orange Kurve) Grenze der dynamischen Beiwerte erfolgt auf Grundlage der DIN EN 1991-2.

Auf die Herleitung der Ermittlung des dynamischen Beiwertes $1 + \varphi$ wurde bereits im Kapitel 2.2.3 eingegangen. Der dafür benötigte Parameter für die Gleisqualität wird in der folgenden Auswertung mit $a_2 = 0,5$ festgelegt. Dieser Wert bildet den Gleiszustand des Schienennetzes in Deutschland adäquat ab. Weitere Eingangsgrößen für den dynamischen Beiwert werden wie folgt bestimmt: Zur Ermittlung der oberen Grenze der ersten Biegeeigenfrequenz ist in Abhängigkeit der maßgebenden Länge die Gleichung (2.11) zu berücksichtigen. Um die untere Grenze der ersten Biegeeigenfrequenz zu bestimmen, sind die Gleichungen (2.12) bzw. (2.13) heranzuziehen.

Die „maßgebliche“ Länge entspricht der Länge der messwertgestützt erstellten Einflusslinien. Alle aus den Einflusslinien der maßgebenden Bauteile ermittelten Längen können dem Anhang 6 - B entnommen werden. In der Abbildung 6.1 wird die Ermittlung der Einflusslinienlänge beispielhaft am Längsträger der Brücke 4 gezeigt.

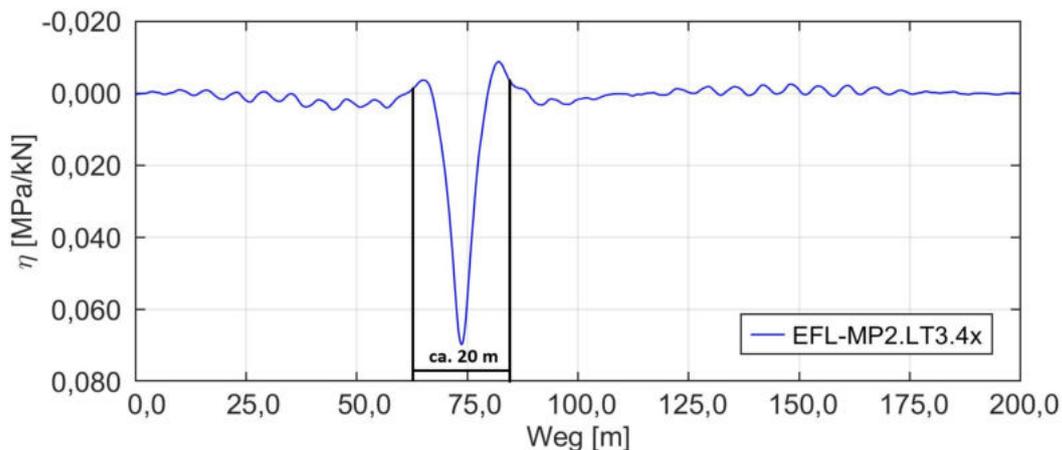


Abbildung 6.1: Ermittlung der maßgeblichen Länge der Einflusslinie des Längsträger Brücke 4

Die vier ausgewerteten Brücken werden in der Abbildung 6.2 durch verschiedene Symbole gemäß der nebenstehenden Legende dargestellt. Neben dieser Unterteilung wurden ebenfalls die unterschiedlichen Oberbauarten berücksichtigt. Die Brücken 1 und 3 werden aufgrund der Lagerung der Schienen auf Schotter (geschlossene Bauweise) in rot und die Brücken 2 und 4 mit teilweise direkter Schienenbefestigung am Tragsystem (offene Bauweise) in grün dargestellt.

In den Diagrammen aus Abbildung 6.2 ist erkennbar, dass deutliche Diskrepanzen zwischen den messtechnisch ermittelten und den sich normativ ergebenden dynamischen Beiwerten $1 + \varphi$ vorliegen. Diese äußern sich darin, dass sich die untersuchten Messpunkte nicht, wie normativ gefordert, zwischen den Hüllkurven der Grenzen ansiedeln, sondern diese in den Bereichen der maßgebenden Länge < 40 m zum Teil signifikant übersteigen bzw. unterschreiten. Hier ergeben sich bei der Betrachtung der Messergebnisse Abweichungen von bis zu 32 % (Brücke 2, $L = 20$ m). Bei der Einordnung der Messpunkte lässt sich in diesen Bereichen der maßgebenden Länge keine Abhängigkeit von der Art der Gleisbefestigung erkennen. Sowohl Brücken mit geschlossener Fahrbahn (rot) als auch Brücken mit offener Bauweise (grün) verfehlen die Grenzbedingungen in gleichem Maße. Die über die Geschwindigkeit angenommene Zunahme der dynamischen Beiwerte kann ebenfalls nicht beobachtet werden. So rufen beispielsweise in allen Messpunkten der Brücke 1 die quasi-statischen Überfahrten mit $v = 10$ km/h die größte dynamische Beanspruchung hervor. Lediglich bei maßgebenden Längen > 40 m, welche durch die Hauptträger der Brücken 2 und 4 sowie die Diagonalen der Brücke 4 repräsentiert werden, ist eine gute Annäherung an die Norm erkennbar. So überschreiten von neun aufgetragenen Messpunkten fünf die in der DIN EN 1991-2 festgelegten Grenzen. Die Abweichungen sind dabei sehr gering ausgeprägt und betragen maximal 5 %. Der Anhang 6 - C enthält weitere Diagramme mit $a_2 = 0,25/0,50/0,75$, die den Vergleich der messwertgestützten dynamischen Beiwerte mit der Norm visualisieren.

Woher diese Abweichungen bzw. Übereinstimmungen herrühren, soll nachfolgend aufgezeigt werden. Die aus der DIN EN 1991-2 ermittelten Grenzkurven entspringen den vorangegangenen Untersuchungen des ORE-Sachverständigenausschusses, welcher in den 1960er Jahren messtechnische Untersuchungen an Eisenbahnbrücken durchgeführt hat. Auf Basis der an Einfeldträgern durchgeführten Messungen, erfolgte schließlich die Herleitung einer Definition zur Bestimmung des dynamischen Beiwertes (vgl. Kapitel 2.2.3). Mit Veröffentlichung der Änderungen des DIN Fachberichts 101 im Jahr 2009 fand ebenfalls die vereinfachte dynamische Berechnung

6 Einordnung und Diskussion der Ergebnisse

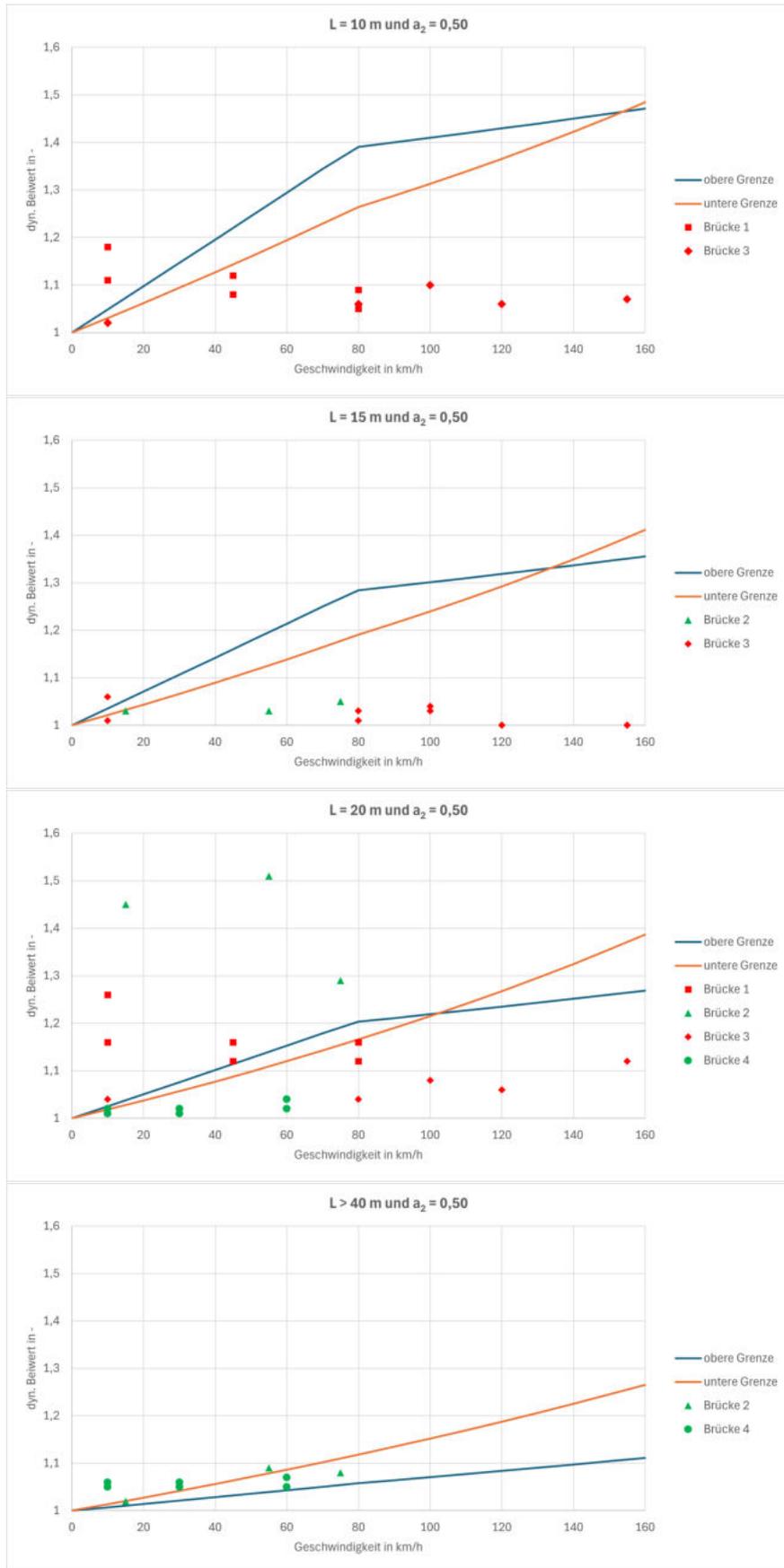


Abbildung 6.2: Vergleich der dyn. Beiwerte mit der Norm unter der Annahme des Parameters $a_2 = 0,5$ für die Gleisqualität

normativ ihren Ursprung, sodass fortan unter Abschätzung der ersten Biegeeigenfrequenz der dynamische Beiwert direkt berechnet werden konnte [8]. Da die in der Norm aufgeführten Grenzen lediglich aus Betrachtungen am Einfeldträger herrühren, sind demzufolge Abweichungen erwartbar und konnten vorliegend auch messtechnisch bestätigt werden. Zum einen existieren in der Praxis in der Regel keine idealen Einfeldsysteme, da bspw. durch die Verbindungstechnik eine Durchlaufwirkung erzeugt wird, und zum anderen werden Durchlaufsysteme baulich umgesetzt. Die durch den ORE untersuchten Brücken weisen zusätzlich durchgehend offene Bauweisen auf. Die in dieser Arbeit untersuchten Brücken wurden jedoch zum Teil mit geschlossener Fahrbahn hergestellt, sodass durch den lastverteilenden Einfluss bzw. aufgrund der Dämpfung des Schotterbetts Abweichungen zu erwarten sind. Diese Abweichungen sind insbesondere bei geringen maßgeblichen Längen erkennbar.

Tabelle 6.2: Vergleich der maßgeblichen Längen der ausgewerteten Brücken

Vergleich der maßgeblichen Längen der Brücke 1			
Bauteil	Messung	Norm	Abweichung
Hauptträger	20,00 m	8,15 m	145 %
Längsträger	10,00 m	4,74 m	111 %
Querträger	10,00 m	6,16 m	62 %
Endquerträger	20,00 m	6,16 m	225 %
Vergleich der maßgeblichen Längen der Brücke 2			
Bauteil	Messung	Norm	Abweichung
Hauptträger	> 40 m	> 40 m	–
Längsträger	20,00 m	6,94 m	188 %
Querträger	15,00 m	8,40 m	76 %
Vergleich der maßgeblichen Längen der Brücke 3			
Bauteil	Messung	Norm	Abweichung
Hauptträger	20,00 m	7,84 m	155 %
Längsträger	15,00 m	4,31 m	248 %
Querträger	10,00 m	5,87 m	70 %
Endquerträger	15,00 m	5,87 m	156 %
Vergleich der maßgeblichen Längen der Brücke 4			
Bauteil	Messung	Norm	Abweichung
Untergurt	> 40 m	> 40 m	–
Längsträger	20,00 m	11,92 m	68 %
Querträger	20,00 m	19,00 m	5 %
Diagonale	> 40 m	> 40 m	–

Neben den Abweichungen der dynamischen Beiwerte in der Abbildung 6.2 konnten zusätzlich Unterschiede in der Ausprägung der maßgeblichen Länge der Bauteile festgestellt werden. Die nach Norm ermittelten und die sich aus der Einflusslinie ergebenden Längen sind in der Tabelle 6.2 gegenübergestellt. Hier wird deutlich, dass die maßgeblichen Längen gemäß Norm sehr konservativ berechnet werden und für die durchgeführten Messungen sehr stark auf der sicheren Seite liegen. Die Abweichungen der getätigten Untersuchungen betragen dabei bis zu 248 %.

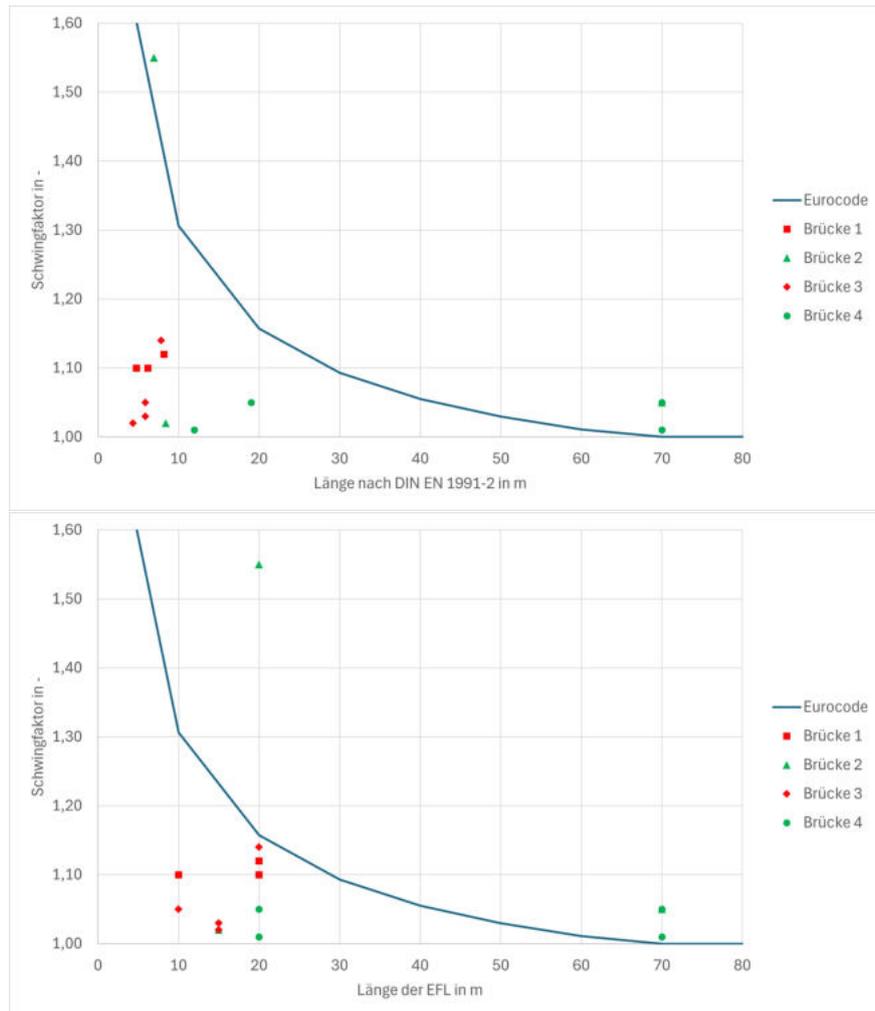


Abbildung 6.3: Vergleich der ermittelten Schwingfaktoren bezüglich ihrer maßgeblichen Länge

Abschließend soll in der Abbildung 6.3 ein Vergleich der Schwingfaktoren in Abhängigkeit der maßgeblichen Länge erfolgen. Als Referenz (blaue Kurve) dient der nach DIN EN 1991-2 ermittelte Schwingfaktor Φ_2 unter Annahme sorgfältig instand gehaltener Gleise (vgl. Gleichung (2.14)). Im oberen Diagramm der Abbildung 6.3 erfolgt die Einordnung der messtechnisch ermittelten Schwingfaktoren Φ_{obs} unter Berücksichtigung der von der Norm vorgegebenen maßgeblichen Längen L_Φ (vgl. Ta-

belle 6.2). Im unteren Diagramm hingegen werden die Schwingfaktoren Φ_{obs} auf die Länge der messwertgestützten Einflusslinien bezogen. Aus den Diagrammen wird ersichtlich, dass die zuvor beschriebene, eher konservative Festlegung der maßgeblichen Länge der Norm in Relation zur Referenzkurve deutlich größere Abweichungen hervorbringt. Trotz teilweise sehr geringer maßgeblicher Längen siedeln sich die ermittelten Schwingfaktoren eher im unteren Bereich an. Dies führt zu Abweichungen in Bezug auf die Werte der Referenzkurve von bis zu 56 % (Längsträger der Brücke 3). Lediglich die untersuchten Hauptträger der Brücken 3 und 4 sowie die Diagonale der Brücke 4 mit maßgeblichen Längen nach Norm > 70 m überschreiten die Angaben der Norm. Wird zur maßgebliche Länge die ermittelte Einflusslinie herangezogen, so ergeben sich aufgrund größerer maßgeblicher Längen Schwingfaktoren, welche sich besser an die Werte der Norm annähern. Bei dieser Betrachtung sind maximale Abweichungen von 43 % beobachtbar (Endquerträger der Brücke 4). Lediglich der Schwingfaktor für den auf Druck beanspruchten Längsträger der Brücke 2 weist eine deutliche Abweichung von 34 % auf. Es sei darauf verwiesen, dass es sich hierbei um einen statistischen Ausreißer handeln muss. Die messwertgestützten Schwingfaktoren und die „maßgeblichen Längen“ sind im Anhang 6 - D enthalten. Die beiden zugehörigen Diagramme aus Abbildung 6.3 sind zusätzlich im Anhang 6 - E zu finden.

Bei der Betrachtung aller Diagramme wird die nachfolgend in Kapitel 6.3 beschriebene „Zwittrigkeit“ des Schwingfaktors deutlich, welcher ebenso von den statischen Lasten beeinflusst wird. So lassen sich trotz teilweise hoher dynamischer Beiwerte (siehe bspw. Ergebnisse der Brücke 1) nahezu ausschließlich Schwingfaktoren ermitteln, welche den Wert der Referenzkurve unterschreiten. Dies wurde bereits in der Auswertung der Ergebnisse in Kapitel 5 deutlich, da die Belastung aus dem LM 71 mehrfach die des maßgebenden Betriebslastenzuges überstieg. Die sich hieraus ergebende Reserve schlägt sich demzufolge auf den messtechnisch ermittelten Schwingfaktor nieder. Es ist ersichtlich, dass in der Praxis ein nicht zu vernachlässigender Anteil des Schwingfaktors aus der statischen Ausnutzung folgt und der dynamische Anteil oftmals nur geringe Auswirkungen bei der Bestimmung des Schwingfaktors Φ einnimmt. Die messwertgestützt erschlossenen Reserven des Schwingfaktors Φ_{obs} gegenüber dem Φ_{cal} ergeben sich größtenteils aus statischen Reserven, welche durch die in der Praxis günstigeren Einflusslinien im Vergleich zu den ideellen Einflusslinien der Theorie entstehen. Der wirkliche dynamische Einfluss wird durch die Norm jedoch nicht hinreichend genau beschrieben.

6.3 Diskussion der ungünstigen Benennung des Schwingfaktors

Abschließend soll die Benennung des Schwingfaktors Φ diskutiert werden. Dass der in der Norm aufgeführte Schwingfaktor Φ kein wirklicher Schwingfaktor ist, wurde bereits in den Veröffentlichungen [2] und [33] von WEBER ausführlich diskutiert. Dieser vertritt die Meinung, dass die Bezeichnung als sog. „Schwingfaktor“ nicht benennungsgenau ist. Der Schwingfaktor trägt lediglich dazu bei, dass dieser durch Multiplikation mit der statischen Beanspruchung des LM 71 die statischen und dynamischen Einwirkungen der sechs idealen Betriebslastenzüge abdeckt. Aus diesem Grund kommt ihm nach WEBER eine hermaphroditische Bedeutung zu, da neben dynamischen Größen auch statische Größen Einfluss auf seine Berechnung nehmen. Der Schwingfaktor wird demzufolge kleiner, wenn die statischen Schnittgrößen des LM 71 diejenigen des maßgeblichen Betriebslastenzuges übersteigen. Aus besagten Gründen fordert WEBER in [2] eine Umbenennung des Schwingfaktors: Um seiner tatsächlichen Aufgabe gerecht zu werden, soll fortan der Schwingfaktor Φ als „Anpassungsfaktor“ bezeichnet werden.

Dieselbe Sicht vertritt auch PROMMERSBERGER. In [15] beschreibt dieser ebenfalls, dass der Schwingfaktor nicht benennungsgenau ist und „jedoch in keinem Fall mit einem echten Schwingfaktor [...]“ [15] verwechselt werden darf. Hierbei führt er als Grund ebenfalls den hermaphroditischen Charakter des Faktors an und zeigt beispielhaft auf, dass neben dynamischen Einflüssen auch die Statik des Systems den Faktor beeinflusst.

Die Verfasser dieser Arbeit stimmen den vorangegangenen Gedanken von WEBER und PROMMERSBERGER vollumfänglich zu. Der Begriff „Schwingfaktor“ impliziert im fachlichen Sprachgebrauch zunächst, dass dieser allein zur Abdeckung dynamischer Beanspruchungen eingeführt wurde. Dass dem nicht so ist, wurde bereits zuvor beschrieben und innerhalb dieser Arbeit mehrfach bestätigt. Die Verfasser schlagen deshalb eine eigene Benennung in Form des Begriffs „**Abdeckungsfaktor**“ vor. Diese Benennung verdeutlicht bereits in ihrem Wortlaut sowie der mathematischen Bedeutung die eigentliche Aufgabe des Schwingfaktors: das „Abdecken“, d. h. mathematisch die vollständige Überdeckung der statischen und dynamischen Beanspruchung aus den idealen Betriebslastenzügen mithilfe eines Faktors. Durch die Generalisierung des Begriffs kann die von WEBER und PROMMERSBERGER beschriebene hermaphroditische Bedeutung des Faktors auch sprachlich fortbestehen und verlei-

tet nicht mehr zu der Fehlinterpretation, dass der Faktor lediglich die hervorgerufene dynamische Beanspruchung aus den idealen Betriebslastenzügen abdeckt.

7 Fazit

Mit dieser Arbeit erfolgte die Bestimmung des messwertgestützten Schwingfaktors Φ_{obs} auf Grundlage von Dehnungsmessungen an vier stählernen Vollwandträgerbrücken. Das Ziel war es, verschiedene Definitionen zur Bestimmung des Schwingfaktors herauszuarbeiten, diese im Kontext ihrer Anwendbarkeit und Plausibilität zu diskutieren und letztlich eine Vorzugsvariante zu wählen. Die Ergebnisse der Diskussion brachten hervor, dass die Definition des Schwingfaktors auf Basis von Haupt- und Nebenbedingungen erfolgen sollte. Als Vorzugsvariante für die Definition gilt:

$$\Phi_{\text{obs}} = \frac{\sigma_{\text{Blz}} \cdot (1 + \varphi)}{\sigma_{\text{LM71}}}$$

Begründet werden konnte dies unter anderem durch die Verwendung des dynamischen Beiwerts $1 + \varphi$, welcher sich aufgrund der Normierung des dynamischen Zuwachses auf die Messlok als Vorteil erweist. Denn der dynamische Beiwert unterliegt weniger starken Schwankungen und erlaubt aus diesem Grund eine bessere bauteilübergreifende Abschätzung des dynamischen Verhaltens. Zudem bringt die Definition des Schwingfaktors über den dynamischen Beiwert auch messtechnische Vorteile mit sich. So ist für die Ermittlung des Schwingfaktors der Verzicht auf eine dynamische Untersuchung möglich, sofern für diesen die Werte aus der Norm eingesetzt werden. Demzufolge wären ausschließlich Messfahrten mit $v = 10$ km/h nötig, um die Spannungseinflusslinien zu ermitteln. Die gewählte Vorzugsvariante birgt auch mittelbare Vorteile. So können über diese Definition weiterführende Größen, wie der R -Wert, bestimmt werden. Dieser ist die Grundlage, um eine Einordnung in Streckenklassen vornehmen zu können.

Im Rahmen der Auswertung wurden die Messergebnisse näher untersucht. Hierfür erfolgte ein Vergleich der dynamischen Beiwerte, der maßgeblichen Längen sowie des Schwingfaktors mit den normativen Regelungen der DIN EN 1991-2. Es stellte sich heraus, dass im Bezug auf die Ermittlung des dynamischen Beiwerts zum Teil signifikante Diskrepanzen zwischen den messtechnisch ermittelten und normativ berechneten dynamischen Beiwerten vorliegen. Die Abweichungen betragen dabei maximal 32 %. Lediglich bei maßgeblichen Längen > 40 m war eine ausreichende Deckung mit den Grenzkurven der Norm erkennbar. Die genannten Abweichungen konnten durch unterschiedliche Grundlagen hinsichtlich der Ermittlung der Werte begründet werden. Während bei der Messung das „reale“ statische System erfasst werden konnte, erfolgte die Berechnung der Werte der Norm anhand eines idea-

len Einfeldträgers. Zusätzlich bilden die in den 1960er Jahren durch messtechnische Versuche ermittelten Hüllkurven lediglich Brücken mit offener Bauweise ab. Die bei geschlossenen Bauweisen durch das Schotterbett auftretende Verteilung der Lasten sowie die Dämpfung blieb unberücksichtigt.

Bei der Ermittlung der maßgeblichen Längen setzten sich die Abweichungen fort. Hier konnten überwiegend Abweichungen größer 100 % festgestellt werden, was darauf hindeutet, dass die in der DIN EN 1991-2 für die jeweiligen Bauteile festgelegten maßgeblichen Längen sehr konservativ und damit auf der sicheren Seite festgelegt wurden. Ebenfalls stellte sich heraus, dass die ursprünglich als Einfeldsysteme ausgelegten Bauteile wie Längs- und Querträger in der Realität durch bspw. die Verbindungstechnik als Durchlaufsysteme fungieren. Ausschließlich dort, wo fast ideale Einfeldträger vorliegen (bspw. der Querträger bei Brücke 4) ist eine Annäherung an die Norm erkennbar. Die Abweichungen in der maßgeblichen Länge wurden abschließend bei einem Vergleich der Schwingfaktoren untersucht. Hier konnte beobachtet werden, dass die messtechnisch ermittelten Schwingfaktoren mehrheitlich die Werte aus der Norm unterschreiten.

Dabei kam die in Kapitel 6.3 beschriebene hermaphroditische Bedeutung besonders zum Vorschein. Trotz ungünstiger dynamischer Beiwerte, welche die Werte aus der Norm überschritten, wurde letztlich nur ein geringer Schwingfaktor berechnet. Dies begründete sich darin, dass in der Auswertung in Kapitel 5 festgestellt werden konnte, dass die Beanspruchung aus dem LM 71 diese des maßgebenden Betriebslastenzuges regelmäßig übersteigt. Angesichts der Definition des Schwingfaktors beeinflussen ihn demzufolge nicht ausschließlich dynamische Beanspruchungen sondern dieser wird ebenfalls durch überschießende statische Beanspruchungen aus dem LM 71 vermindert. Diese Eigenschaft führt dazu, dass in Kapitel 6.3 die Benennung des Schwingfaktors in Frage gestellt wurde. Eben aufgrund dieser Zwitterigkeit, dass ihn statische und dynamische Größen beeinflussen stellen WEBER und PROMERSBERGER heraus, dass es sich beim Schwingfaktor nach DIN EN 1991-2 um keinen wirklichen Schwingfaktor handelt und stufen diesen als nicht benennungsgenau ein. Von WEBER wird deshalb die Änderung des Begriffs zu „Anpassungsfaktor“ vorgeschlagen. Die Verfasser dieser Arbeit stimmen den vorangegangenen Gedanken zu und führen als eigene Definition den Begriff „Abdeckungsfaktor“ ein.

Bezugnehmend auf die Ermittlung des Schwingfaktors empfehlen die Verfasser die Definition nach WEBER (Gleichung (2.9)) zu überprüfen. Es ist fraglich, ob der dynamische Zuwachs tatsächlich unabhängig vom Belastungsfahrzeug ist.

Erfolgt ein Blick auf die Gesamtheit des Konzepts der Lastmodelle im Kontext der Historie sowie der aktuellen Entwicklungen kann darüber hinaus festgestellt werden, dass das UIC 71 (heute: LM 71) Schwachstellen aufweist. Diese wurden im Laufe der Zeit mit weiteren Lastmodellen (SW/0 und SW/2) und zusätzlichen Parametern (Schwingfaktor Φ und Lastklassenbeiwert α) kaschiert. Problematisch ist indes, dass das gesamte Konstrukt um das LM 71 zu tief in der Norm verankert ist, um zeitnah Änderungen herbeizuführen. Aufgrund dessen sollte dennoch an vorangegangenen Untersuchungen und Diskussionen angeknüpft werden und weiterhin thematisiert werden, ob die aktuell gültigen Vorgaben der Norm zu den Einwirkungen in dieser Form noch zeitgemäß sind und den tatsächlichen Einwirkungen noch gerecht werden.

Literatur

- [1] Hubert Naraniecki und Steffen Marx. “Zustandsentwicklung und -prognose von Eisenbahnbrücken”. In: *60. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton* (2019). Abrufbar unter: <https://d-nb.info/1213522617/34>.
- [2] Wilmar Weber. “Schwingbeiwerte und sogenannte „dynamische Beiwerte“ („Schwingfaktoren“) von Eisenbahnbrücken”. In: *Stahlbau 67, Heft 8* (1998), S. 659–666.
- [3] Georg Mehrstens. *Vorlesungen über Ingenieurwissenschaften*. Bd. 1. W. Engelmann, 1908, S. 107, 130.
- [4] Ernst Ebert. “Über zulässige Beanspruchungen von Eisenkonstruktionen”. In: *Deutsche Bauzeitung* (1896), S. 13–15, 24–27, 35–36, 38, 47–50.
- [5] Saatsministerium des Innern - Bayern. “Nr. 7 - Vorschriften über Entwurf, Ausführung und Prüfung von Straßenbrücken mit eisernem Überbau”. In: *Amtsblatt des königlichen Staatsministeriums des Innern* (1878), S. 6–8, 16–22.
- [6] Julius Karig. *Neuere Stahlbrücken der Deutschen Reichsbahn*. W. Ernst & Sohn, 1934.
- [7] Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft. *Vorschriften für Eisenbauwerke: Berechnungsgrundlagen für eiserne Eisenbahnbrücken.(BE) Amtliche Ausgabe. Eingeführt durch Verfügung der Hauptverwaltung vom 25. Februar 1925. S2 D 2531*. W. Ernst & Sohn, 1925, S. 16–18.
- [8] Lamine Bagayoko, Eckart Koch und Karsten Geißler. “Dynamik bei Eisenbahnbrücken”. In: *Stahlbau-Kalender 2012: Eurocode 3 - Grundnormen, Brücken* (2012), S. 584.
- [9] Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft. *Berechnungsgrundlagen für eiserne Eisenbahnbrücken.(BE) - Dritte Auflage 1934*. W. Ernst & Sohn, 1934, S. 26, 27.
- [10] Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft. *Berechnungsgrundlagen für eiserne Eisenbahnbrücken.(BE) - Dritte Auflage 1936*. Zentralblatt der Bauverwaltung vereinigt mit Zeitschrift für Bauwesen, 1936, S. 22, 23.
- [11] Deutsche Reichsbahn. *Berechnungsgrundlagen für eiserne Eisenbahnbrücken.(BE) - Ausgabe 1944*. 1944, S. 26, 27.

- [12] Hartmut Freystein. “Entwicklungen und Tendenzen im Eisenbahnbrückenbau”. In: *Prüfingenieur* (2011), S. 23–28.
- [13] Markus Sprengler. “Dynamik von Eisenbahnbrücken unter Hochgeschwindigkeitsverkehr: Entwicklung eines Antwortspektrums zur Erfassung der dynamischen Tragwerksreaktion”. Abrufbar unter: https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/2036/3/Dissertation_Spengler_V3.pdf. Dissertation. Darmstadt: TU Darmstadt, 2010.
- [14] Deutsche Bundesbahn. *Berechnungsgrundlagen für eiserne Eisenbahnbrücken. (BE) - Ausgabe 1951*. Eisenbahndirektion München, 1951, S. 12, 13.
- [15] Gerhard Prommersberger und Hans Siebke. “Das Belastungsbild UIC 71, die neue Bemessungsgrundlage für den Eisenbahnbrückenbau”. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* (1976), S. 33–40.
- [16] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.) *DIN EN 1991-2:2010-12, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2010.
- [17] Volkmar Quoos und Roman Fila. “Vorschlag für das neue Lastbild des Internationalen Eisenbahnverbandes (UIC)”. In: *Stahlbau 67, Heft 8* (1998), S. 642–650.
- [18] DB Netz AG (Hrsg.) *Handbuch 80400: Eisenbahnbrücken (und sonstige Ingenieurbauwerke) planen, bauen und instand halten*. Frankfurt am Main: DB Netz AG, 2023.
- [19] DB Netz AG (Hrsg.) *Handbuch 80500: Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken*. Berlin: DB Netz AG, 2021.
- [20] Manfred Curbach u. a. *8. Symposium Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen*. Abrufbar unter: https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/ressourcen/dateien/veranstaltungen/seub/8-seub_2015/SEUB2015_12_Steffens_et_al.pdf/?lang=de. Techn. Univ. Dresden, Fak. Bauingenieurwesen, 2013.
- [21] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.) *E DIN EN 1991-2:2021-09, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2021.
- [22] Markus Hennecke und Tristan Mölter. “Einwirkungen aus Eisenbahnverkehr und andere Einwirkungen für Eisenbahnbrücken nach Eurocode”. In: *Bauingenieur, Band 87* (2012), S. 518–526.
- [23] Stefan Keil. *Dehnungsmessstreifen*. Springer, 2017.

- [24] Karl Hoffmann. *Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen*. HBM, 2022.
- [25] Martin Meyer. *Signalverarbeitung – Analoge und digitale Signale, Systeme und Filter*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011.
- [26] Fernando Puente León und Sebastian Bauer. *Praxis der Digitalen Signalverarbeitung*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2017.
- [27] Ulrich Karrenberg. *Signale – Prozesse – Systeme: Eine multimediale und interaktive Einführung in die Signalverarbeitung*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017.
- [28] Thomas Kuttner. *Praxiswissen Schwingungsmesstechnik*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [29] Prof. Dr.-Ing. Oliver Nelles. “Signalverarbeitung”. Abrufbar unter: https://www.mb.uni-siegen.de/mrt/lehre/sv/signalverarbeitung_2019_06_26.pdf. Vorlesungsskript. Siegen: Universität Siegen, 2019.
- [30] Josef Puhani. *Statistik – Einführung mit praktischen Beispielen*. Wiesbaden: Springer Gabler Wiesbaden, 2020.
- [31] Claus Brell, Juliana Brell und Siegfried Kirsch. *Statistik von Null auf Hundert – Mit Kochrezepten schnell zum Statistik-Grundwissen*. Berlin: Springer Spektrum, 2016.
- [32] Hartmut Schiefer und Felix Schiefer. *Statistik für Ingenieure – Eine Einführung mit Beispielen aus der Praxis*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [33] Wilmar Weber und G Kehl. “Messungen am Stahlüberbau der neuen Hammer Eisenbahnbrücke anlässlich von Belastungsversuchen”. In: *Stahlbau* 62.Heft 2 (1993).
- [34] Konstantin Meskouris und Erwin Hake. *Statik der Stabtragwerke: Einführung in die Tragwerkslehre*. Springer-Verlag, 2008.
- [35] Wolfgang Braune. “Beitrag zur Feststellung der Belastbarkeit von Ingenieurbauten durch die Bestimmung von Einflusslinien aus Dehnungsmessungen unter beliebigen wandernden Lasten”. In: *Die Bautechnik* 54 (1977), S. 145–149.

Übersicht verwendeter Hilfsmittel

Diese Masterarbeit wurde stellenweise mithilfe des KI-Schreibassistenten *DeepL Write* (<https://www.deepl.com/de/write>) verfasst. Dieser trug zur Optimierung der Texte in ihrer Ausdrucksweise bei. Der Funktionsumfang der KI umfasst die Korrektur von Rechtschreib-, Grammatik- und Zeichensetzungsfehlern, den Vorschlag von Wort- und Satzalternativen sowie Empfehlungen für flüssige, professionelle und natürliche Formulierungen.

Anhang

- 1 - A: Brücke 1 – Prüfung und Bewertung der Fahrgeschwindigkeit
- 1 - B: Brücke 1 – Statistische Bewertung der Messdaten
- 1 - C: Brücke 1 – Bestimmung des dynamischen Zuwachses und Beiwertes
- 1 - D: Brücke 1 – Ergebnisse der Lastmodelle aus den Spannungseinflusslinien
- 1 - E: Brücke 1 – Ermittlung der messwertgestützten Schwingfaktoren
- 1 - F: Brücke 1 – Ermittlung des Schwingfaktors nach Vorgaben der Norm

- 2 - A: Brücke 2 – Prüfung und Bewertung der Fahrgeschwindigkeit
- 2 - B: Brücke 2 – Statistische Bewertung der Messdaten
- 2 - C: Brücke 2 – Bestimmung des dynamischen Zuwachses und Beiwertes
- 2 - D: Brücke 2 – Ergebnisse der Lastmodelle aus den Spannungseinflusslinien
- 2 - E: Brücke 2 – Ermittlung der messwertgestützten Schwingfaktoren
- 2 - F: Brücke 2 – Ermittlung des Schwingfaktors nach Vorgaben der Norm

- 3 - A: Brücke 3 – Prüfung und Bewertung der Fahrgeschwindigkeit
- 3 - B: Brücke 3 – Statistische Bewertung der Messdaten
- 3 - C: Brücke 3 – Bestimmung des dynamischen Zuwachses und Beiwertes
- 3 - D: Brücke 3 – Ergebnisse der Lastmodelle aus den Spannungseinflusslinien
- 3 - E: Brücke 3 – Ermittlung der messwertgestützten Schwingfaktoren
- 3 - F: Brücke 3 – Ermittlung des Schwingfaktors nach Vorgaben der Norm

- 4 - A: Brücke 4 – Prüfung und Bewertung der Fahrgeschwindigkeit
- 4 - B: Brücke 4 – Statistische Bewertung der Messdaten
- 4 - C: Brücke 4 – Bestimmung des dynamischen Zuwachses und Beiwertes
- 4 - D: Brücke 4 – Ergebnisse der Lastmodelle aus den Spannungseinflusslinien
- 4 - E: Brücke 4 – Ermittlung der messwertgestützten Schwingfaktoren
- 4 - F: Brücke 4 – Ermittlung des Schwingfaktors nach Vorgaben der Norm

- 6 - A: Vergleich dynamischer Zuwächse
- 6 - B: Messwertgestützte dyn. Beiwerte und Einflusslinienlängen
- 6 - C: Vergleich der messwertgestützten dyn. Beiwerte mit der Norm
- 6 - D: Messwertgestützte Schwingfaktoren und die „maßgeblichen Längen“
- 6 - E: Vergleich der messwertgestützten Schwingfaktoren zur „maßgeblichen Länge“

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit bestätigen wir,

Tim Altenhort (Matr.-Nr. 2019 2817) und

Jasmin Dräger (Matr.-Nr. 2018 2213),

dass wir die vorliegende Arbeit mit dem Titel „Herleitung einer Definition für den messwertgestützten Schwingfaktor Φ_{obs} unter Berücksichtigung von Messergebnissen an stählernen Eisenbahnbrücken sowie Diskussion des Begriffs *Schwingfaktor*“ selbstständig und ohne die Hilfe anderer Personen angefertigt haben.

Wir haben nur die konkret angegebenen Quellen und Hilfsmittel und diese nur in der angegebenen Form verwendet.

Aus fremden Werken und Quellen entnommene Inhalte, wörtliche Zitate oder sinn-gemäße Inhalte, z.B. der Argumentation nach, und IT-/KI-generierte Inhalte ha-ben wir an der jeweiligen Stelle unter Angabe der konkreten Quellen gekennzeich-net. IT-/KI-generierte Inhalte sind mit „Unterstützt von/durch ... (Software-name einfügen)“ und Verweis auf die detaillierten Belege in der „Übersicht verwendeter Hilfsmittel“ zu kennzeichnen.

Darüber hinaus bestätigen wir, dass wir beim Einsatz von IT-/KI-gestützten Werk-zeugen diese Hilfsmittel in der „Übersicht verwendeter Hilfsmittel“ mit dem Nut-zungsdatum, dem Produktnamen, der Bezugsquelle (z. B. URL) und Angaben zu ge-nutzten Funktionen der Software sowie zum Nutzungsumfang vollständig aufgeführt haben. Wir haben die IT-/KI-generierten Inhalte außerdem unter Beachtung der all-gemeinen Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis geprüft.

Uns ist bewusst, dass bei dem Versuch, das Ergebnis einer Prüfungsleistung durch Täuschung oder Benutzung nicht zugelassener Hilfsmittel zu beeinflussen, die betref-fende Prüfungsleistung mit „nicht ausreichend“/ „nicht erfolgreich abgeschlossen“ zu bewerten ist beziehungsweise die betreffende Prüfungsleistung als mit „nicht ausrei-chend“/ „nicht erfolgreich abgeschlossen“ bewertet gilt (Muster-SPO der Hochschule Magdeburg-Stendal vom 23.03.2023 § 35 Abs. 3 Satz 1).

Wir bestätigen ausdrücklich, dass diese Arbeit weder vollständig noch teilweise einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt oder veröffentlicht worden ist.

Wir stimmen zu, dass die Arbeit in eine Datenbank zur Plagiats- bzw. Hilfsmittelnutzungsprüfung eingestellt und gespeichert wird.

Magdeburg, 27. August 2024



Tim Altenhort (Unterschrift)



Jasmin Dräger (Unterschrift)