

Diese Arbeit wurde vorgelegt am Institut für Stahlbau.

The present work was submitted to the Institute of Steel Construction.

Masterarbeit

Master Thesis

Messdatenbasierte Zustandsbeurteilung einer Plattenbalkenbrücke mit orthotroper Fahrbahnplatte am Beispiel der Autobahnbrücke im Autobahnkreuz Dortmund-Unna

Data-based asset management of a T-beam bridge with
orthotropic deck exemplified by the motorway bridge
at the Dortmund-Unna motorway intersection

vorgelegt von / *presented by*

Stefan Kimpeler

(Matr.-Nr. 367760)

Betreuer: M.Sc. Thorben Geers

1. Prüfer: Dr.-Ing., apl. Professor Benno Hoffmeister

2. Prüfer: Dr.-Ing., Univ.-Prof. Markus Feldmann

Aachen, 16. Juni 2023

**Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Markus Feldmann**

Mies-van-der-Rohe-Str. 1
D-52074 Aachen

Telefon: +49 241 80-25177

Fax: +49 241 80-22140

feldmann@stb.rwth-aachen.de
www.stb.rwth-aachen.de

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	vi
Abkürzungsverzeichnis	vii
1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Zielsetzung und Methodik	2
2. Stand der Technik	3
2.1. Ermüdung	3
2.1.1. Allgemein	3
2.1.2. Wöhlerversuch (Einstufungsversuche)	6
2.1.3. Klassifizierung	8
2.1.4. Vorgehen zur Ermittlung der Schädigung bei variablen Spannungsschwingbreiten	12
2.2. Orthotrope Fahrbahnplatte	14
2.2.1. Allgemein	14
2.2.2. Aufbau	15
2.2.3. Ermüdung in Bezug auf orthotrope Fahrbahnplatten	16
3. Bestandsanalyse des Bauwerks	19
3.1. Beschreibung des Bauwerks	19
3.2. Bestehende Schäden	21
3.3. Vorstellung des Messkonzeptes	22
4. Modellierung	26
4.1. Globalmodell	27
4.1.1. Modellierung relevanter Bauteile	28
4.1.2. Material	33
4.1.3. Verbindung der Bauteile im zusammengesetzten Modell	33
4.2. Submodell	34
4.3. FE Ergebnisanalyse	37
4.3.1. Vergleich unterschiedlicher Lastfallsituationen	37
4.3.2. Bestimmung der ungünstigsten Lastposition in Längsrichtung	42

4.3.3.	Einflusslinie der Last in Querrichtung	44
4.3.4.	Identifizierung des Rissursprungs auf Basis einer FE-Simulation .	46
4.3.5.	Vergleich der Struktur- und Kerbspannung am Schweißdetail . .	49
5.	Messdatenanalyse	54
5.1.	Rohdatenüberblick	54
5.2.	Datenaufbereitung	55
5.3.	Ereigniserfassung	57
5.3.1.	Grenzwernermittlung	57
5.3.2.	Zeitliche Abgrenzung der Fahrzeugereignisse	60
5.3.3.	Beschreibung eines Fahrzeugereignisses	62
5.3.4.	Positionsbestimmung des Fahrzeuges in Querrichtung	63
5.4.	Vergleich der Messdaten unterschiedlicher Messquerschnitte	67
5.5.	Analyse der Messergebnisse der QT-DMS	70
5.6.	Erweiterung der Fahrzeugeventintervalle	73
6.	Ermüdungsberechnung - Diskussion der Ergebnisse	74
6.1.	Allgemeiner Ablauf	74
6.2.	Wahl der Kerbfallklasse	75
6.3.	Messdatenbasierte Strukturspannungen an ermüdungskritischen Schweißnähten	78
6.4.	Vergleich der Schweißnahtschädigung an unterschiedlichen Messquer- schnitten	80
6.4.1.	Vergleich zwischen Schädigungsrate und Radposition in Quer- richtung	85
6.5.	Lebensdauerbestimmung und Zustandsprognose für den Gesamtzeitraum	87
7.	Zusammenfassung und Ausblick	91
	Literatur	94
A.	Anhang	I
A.1.	Programmablaufplan Analysetool	I
A.2.	Fourier Transformation	II

Abbildungsverzeichnis

2.1. Kraftfluss und Spannungserhöhung	5
2.2. Kraftflussstörung bei verschiedenen Schweißnahtausführungen und Ort der Rissausbreitung [2]	5
2.3. Ermüdungsfestigkeitskurve für Längsschwingbreiten [4]	7
2.4. Auszug aus Kerbfallkatalog [4]	8
2.5. Skizze des Strukturspannungskonzeptes [6]	10
2.6. FE-Modellierung zur Anwendung des Strukturspannungskonzeptes [5] .	11
2.7. Empfehlungen für die Abstände zwischen den Referenzpunkten und dem Schweißnahtübergang [5]	11
2.8. Ablauf der Schadensakkumulation [4]	13
2.9. Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner [1]	14
2.10. Haupttragwerk einer orthotropen Fahrbahnplatte [9]	15
2.11. Verschiedene Längssteifenprofile [10]	16
2.12. Gefährdungsbereiche und -kategorien der orthotropen Fahrbahnplatte [8]	17
2.13. Rissursache und -ort bei Schäden der Kategorie 2	18
3.1. Draufsicht Autobahnkreuz Dortmund-Unna [14]	20
3.2. Unteransicht Teilbauwerk 2	20
3.3. Häufige Schäden am Bauwerk	22
3.4. Lage des Messbereichs unterhalb der Brücke in der Draufsicht (Maße in [m]) (Hintergrund: [16])	23
3.5. Sensorpositionen der Messquerschnitte und Abstände zur Längssteife .	24
4.1. Globalmodell der Brücke	27
4.2. Ansicht Brückenquerschnitt	27
4.3. Skizze der Längsträger im Querschnitt	29
4.4. Modellierung der Auflager: westliches Widerlager (links), mittleres und östliches Widerlager (rechts)	29
4.5. Querträgermodell im Regelfall (links) und mit Aussparung (rechts) . . .	30
4.6. Mesh QT5	31
4.7. Trapezförmige Längssteifen in isoparametrischer Ansicht	32
4.8. Finite Elemente pro Längssteife	32
4.9. „Tie constraint“ zum Ausgleich der Netzfeinheit [17]	34

4.10. Submodell mit markierten Kontaktflächen und Referenzpunkten der DMS-Positionen	36
4.11. LF1: 2 Räder einer Achse in Querrichtung	38
4.12. LF2: 1 Rad auf Steg der Längssteife	39
4.13. Vergleich der Querverteilung am Deckblech für LF1 und LF2	40
4.14. Einflusslinien durch Simulation eines rollenden Rades	43
4.15. Einflusslinien der Querverteilung am Deckblech	46
4.16. Grafische Darstellung der von-Mises-Spannungen im Schweißnahtdetail	47
4.17. Darstellung des Strukturspannungskonzeptes und der gerichteten Spannungen nach DMS Nr. 4 (S_x) im Detailausschnitt des FE-Modells . .	50
4.18. Vergleich Hotspot-Stress und Strukturspannungskonzept der FE-Ergebnisse	52
5.1. Beispiel von DMS- und Temperatur-Rohdaten für 10 Minuten	55
5.2. Grenzwertermittlung zur ausschließlichen Erfassung des Schwerverkehrs	58
5.3. Histogramm der Differenzen der FZ-Anzahl der BASt und des Auswertetools	59
5.4. Ereignisse mit Start und Endpunkt	62
5.5. Sattelzug und Messdaten (Hintergrund: [21])	63
5.6. Vergleich der Einflusslinie in Querrichtung für Index 26690	64
5.7. Vergleich der DB-DMS für die 3 Messquerschnitte	67
5.8. Messkonzept an MQS-1	70
5.9. Vergleich des QT- und Deckblech-DMS für Index 26590	71
6.1. Auszug aus Kerbfalltabelle B.1 [22]	76
6.2. Vergleich des inneren und äußeren DMS zur Anwendung des Struktur- und Kerbspannungskonzeptes	79
6.3. Schweißnahtschäden im Bereich des Messsystems	83
6.4. Vergleich der Schädigung am MQS-1 und der Radposition in Querrichtung	85
A.1. Grobes Ablaufdiagramm des Analysetools	I
A.2. Frequenzspektren für maximal belastete QT-DMS innerhalb eines 10-Minuten-Abschnitts	II
A.3. Frequenzspektrum für DMS 17 während eines Fahrzeugereignisses . . .	II

Tabellenverzeichnis

4.1. Vergleich LF1 und LF2 an ausgewählten Sensoren	39
4.2. Von-Mises-Spannungswerte im Schweißnahtdetail an ausgewählten FE- Elementen	48
4.3. Vergleich Struktur- und Kerbspannung	52
5.1. Auszug der Fahrzeugeventtabelle	62
5.2. Bestimmtheitsmaße für Einflusslinien in Querrichtung	66
5.3. Achsevents für das Fahrzeug Ereignis 26590	68
6.1. Lebensdauern für ausgewählte Schweißnähte unter verschiedenen Kerbfallannahmen	77
6.2. Vergleich der Sensorwerte und der berechneten Strukturspannungen .	80
6.3. Vergleich der Schädigung in Querrichtung je MQS im Oktober 2022 . .	81
6.4. Lebensdauer des Schweißnahtdetails	88

Abkürzungsverzeichnis

BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
CAD	Computer-Aided-Design
DMS	Dehnungsmessstreifen
ELM	Ermüdungslastmodell
FEM	Finite-Elemente-Methode
FZ	Fahrzeug
IWW	International Institute of Welding
LF	Lastfall
LT	Längsträger
MQS	Messquerschnitt
NK	Nachkommastelle
PCC	Pearson correlation coefficient
QT	Querträger
TBW	Teilbauwerk

1. Einleitung

1.1. Motivation

Die Problematik, dass immer mehr Brücken in Deutschland in einem schlechten Zustand sind, ist ein aktuelles Thema für Gesellschaft, Industrie, Forschung und Wissenschaft. Nicht nur die Verkehrssicherheit wird durch Brückenschäden beeinträchtigt, sondern auch der Verkehrsfluss wird durch Sperrungen gestört, was wiederum wirtschaftliche Folgen durch Staus und längere Transportwege für den Güterverkehr haben kann. In der Vergangenheit wurde die regelmäßige Wartung und Instandhaltung vieler Brücken vernachlässigt. Dies hat dazu geführt, dass sich die Schäden im Laufe der Zeit vergrößert haben und sich die Brücken heute in einem schlechten Zustand befinden.

Die Bauwerksprüfung spielt eine entscheidende Rolle bei der Überwachung und Bewertung von Bauwerken. Hierfür stellt die DIN 1076 die aktuell geltende Richtlinien für die Prüfhäufigkeit und den Umfang der Inspektionen auf. Gemäß dieser Richtlinie werden visuelle handnahe Prüfungen in Intervallen von drei Jahren durchgeführt, abwechselnd als Haupt- und einfache Prüfungen, bei denen Schäden erfasst und dokumentiert werden. Diese Vorgehensweise erfordert jedoch einen erheblichen Personalaufwand. Zudem besteht das Risiko, dass Schäden möglicherweise zu spät erkannt werden. Daher ist es wichtig, alternative Ansätze zu untersuchen, um die Effizienz der Bauwerksprüfung zu verbessern und sicherzustellen, dass Schäden frühzeitig erkannt und behoben werden können.

Neue Konzepte und Technologien wie das Structural Health Monitoring (SHM) bieten innovative Ansätze zur Verbesserung der Bauwerksüberwachung. SHM nutzt Sensoren zur Datenanalyse und Echtzeitüberwachung, um den Zustand von Brücken kontinuierlich zu erfassen. Durch die kontinuierliche Überwachung können diese Systeme die zeitliche Entwicklung des Bauwerkszustands erfassen und Schäden frühzeitig erkennen. Durch rechtzeitige Warnungen können Instandsetzungsmaßnahmen effektiver geplant und kleinere Reparaturen durchgeführt werden, bevor größere Schäden auftreten. Dadurch können Kosten und Einschränkungen im Betrieb reduziert werden. Ebenso ermöglicht die Installation von Sensoren in schwer zugänglichen Bereichen eine umfassendere Überwachung der Brücke. Grundlagen für die Zustandsbewertung von Stahlbrücken mit orthotroper Fahrbahnplatte liefert das Forschungsprojekt BrAssMan,

in dem Vergleichskennwerte, sogenannte Key Performance Indicators (KPI), für quantifizierbare Zustands- und Prognoseaussagen entwickelt werden.

1.2. Zielsetzung und Methodik

Die Ausgangslage für diese Arbeit bildet eine Autobahnbrücke, bei der Schäden am Überbauwerk aufgetreten sind. An drei Querträgern wurden Dehnungsmessstreifen angebracht, um an relevanten Schweißnähten Sensordaten zu erfassen. Ein zentraler Bestandteil dieser Arbeit besteht darin, einen Algorithmus zu entwickeln, der die Auswertung der Sensordaten ermöglicht, Fahrzeugereignisse erkennt und auf der Grundlage des Strukturspannungskonzeptes die Einwirkung analysiert. Zusätzlich wird mithilfe des Algorithmus die Ermüdungsschädigung der Schweißnähte pro Fahrzeug, sowie eine Restlebensdauer berechnet.

Zur Analyse der Bauwerkseigenschaften und der Lastabtragung der orthotropen Platte sowie zur Untersuchung der Ermüdungsanfälligkeit wird ein Finite-Elemente-Modell der Brücke erstellt. Mit diesem Modell kann die Position der Fahrzeuge während der Überfahrt berechnet werden, indem die Spannungen aus den Messdaten mit den Einflusslinien aus der Simulation kombiniert werden. Hierbei werden verschiedene Lastfallsituationen verglichen, um die maßgebenden und ungünstigsten Lastpositionen zu ermitteln. Im abschließenden Teil der Arbeit werden die Schädigungen ausgewertet und eine Zustandsprognose sowie die Versagenswahrscheinlichkeit ermittelt. Die Ergebnisse werden zudem mit früheren Schäden verglichen, um den aktuellen Zustand der Brücke einordnen zu können.

Durch die Untersuchung der Stahlermüdung an diesem Beispiel und die Entwicklung eines geeigneten Algorithmus und Modells wird ein wichtiger Beitrag zur Erhaltung und Sicherheit von Brücken geleistet. Die gewonnenen Erkenntnisse können dazu beitragen, Schäden frühzeitig zu erkennen, geeignete Maßnahmen zur Schadensbegrenzung einzuleiten und die Lebensdauer von Brücken zu verlängern.

2. Stand der Technik

2.1. Ermüdung

2.1.1. Allgemein

Tragwerke sind während der Nutzungszeit neben statischen Beanspruchungen auch ständig wechselnden Beanspruchungen ausgesetzt, die sowohl in ihrer Größe als auch in ihrer zeitlichen Abfolge variieren [1]. Zusätzlich zu den statischen Nachweisen wie Festigkeit und Standsicherheit muss auch die Betriebssicherheit unter Berücksichtigung häufiger dynamischer Lastwechsel gewährleistet und nachgewiesen werden [2]. Insbesondere Schweißnähte und heterogene Konstruktionsübergänge sind durch Ermüdung des Werkstoffes gefährdet. Häufig wechselnde Belastungen, die sich ungünstig auf ermüdungsanfällige Bauwerke auswirken können, lassen sich in folgende Kategorien einteilen [1, 2].

- Verkehrsbelastung (Brücken)
- Lasten auf Kranbahnträger
- Dynamische Lasten durch vibrierende Maschinen
- Windlasten auf schlanke Bauwerke (z.B.: Schornsteine, Windkraftträder)

Werkstoffermüdung

Das Phänomen der Ermüdung kann durch eine Probe in einem Dauerschwingversuch verdeutlicht werden. Dazu wird die Probe kontinuierlich mit einer fest eingestellten Ober- und Unterspannung beansprucht. Obwohl die Oberspannung kleiner als die Zugfestigkeit bzw. Fließgrenze ist, erfolgt nach einer bestimmten Zahl an Lastwechseln ein Bruch des Probenstücks. [2] Unter mikroskopischer Betrachtung ist Stahl ein heterogener Werkstoff, durchsetzt mit vielen Gitterfehlern und Anhäufung von Fremdatomen an den Korngrenzen [2, 3]. Durch diese Fehler liegen die Atome im Gitter nicht in einem Gleichgewichtszustand, wodurch ein Eigenspannungszustand resultiert, welcher sich mit den Spannungen aus den äußeren Lasten überlagert. Ebenfalls können Eigenspannungszustände aus der Fertigung beeinflusst werden [3]. Durch die Wirkung äußerer Kräfte können sich Atomlagen sprunghaft verschieben. An Hindernissen, wie

Korngrenzen stauen sich die Versetzungen auf und führen zu Spannungsspitzen, welche deutlich über den rechnerischen Nennspannungen liegen können. [1] Durch wiederholte Belastung entstehen an der Oberfläche und im Inneren des Werkstücks Mikrorisse, die sich mit zunehmender Lastspielzahl zu Makrorissen vergrößern. Hohe Spannungen am Kerbgrund lösen die Zerrüttung des Werkstoffes aus, wodurch sich ein Riss an der Oberfläche bildet, welcher durch die Kerbwirkung weiter fortschreitet. [3] Sobald der Riss eine kritische Größe erreicht hat, kommt es im verbleibenden Restquerschnitt zu einem Gewaltbruch [2]. Bei statischer Beanspruchung plastifizieren die Spannungsspitzen durch Fließen aus dem Werkstoff und es kommt zu einem duktilen Verformungsbruch. Im Gegensatz dazu fließt beim ermüdungsinduzierten Bruch der Werkstoff im Riss durch die Wechselbeanspruchung und verfestigt sich anschließend wieder, wodurch der Werkstoff ein sprödes Bruchverhalten aufweist. Die Bruchfläche lässt sich in zwei Bereiche unterteilen. Im Bereich der Kerbe (Dauerbruchfläche) bilden sich Rastlinien, die konzentrisch um die Ausgangsstelle verlaufen. Die Oberfläche ist glatt und feinkörnig. Die restliche Fläche (Gewaltbruchfläche) ist durch eine grobe und zerklüftete Struktur gekennzeichnet. [2]

Kerbwirkung

Neben der Beanspruchungsgeschichte, dem Spannungsverhältnis κ und der Schwingbreite $\Delta\sigma$ haben Fehlstellen in der Konstruktion einen erheblichen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit [2]. Beschädigungen und Bohrungen sind äußere Fehlstellen, während Schweißnähte, Dicken- und Steifigkeitssprünge konstruktive Fehlstellen sind [1]. Solche Fehler werden im Allgemeinen als Kerben bezeichnet, und wenn sie an der Oberfläche vorhanden sind, wird der Riss wahrscheinlich von solchen Kerbwirkungen ausgehen. Für eine ermüdungsgerechte Bemessung, insbesondere von Brücken, ist daher die Vermeidung von äußeren Kerben anzustreben. [3] Die Empfindlichkeit der Ermüdungsfestigkeit wird wesentlich von der Kerbschärfe [3] beeinflusst. Diese kann mit Hilfe des Kraftflusses veranschaulicht werden, welcher mit Hilfe von Kraftflusslinien dargestellt wird (siehe Abbildung 2.1 (links)).

Je stärker die Strömungslinien an einer Fehlstelle umgelenkt werden, desto größer ist die Kerbwirkung (siehe Abbildung 2.1 Mitte und Rechts). Bei Kerben liegen, wie bei den oben beschriebenen Makrorissen, die tatsächlichen Spannungen σ_{max} am Kerbgrund deutlich über den Nennspannungen σ_n . Diese hohen Spannungsspitzen können bei statischer Beanspruchung durch Fließen abgebaut werden. Bei Wechselbeanspruchung führen die Spannungsspitzen jedoch zu einem Riss, der sich weiter nach innen

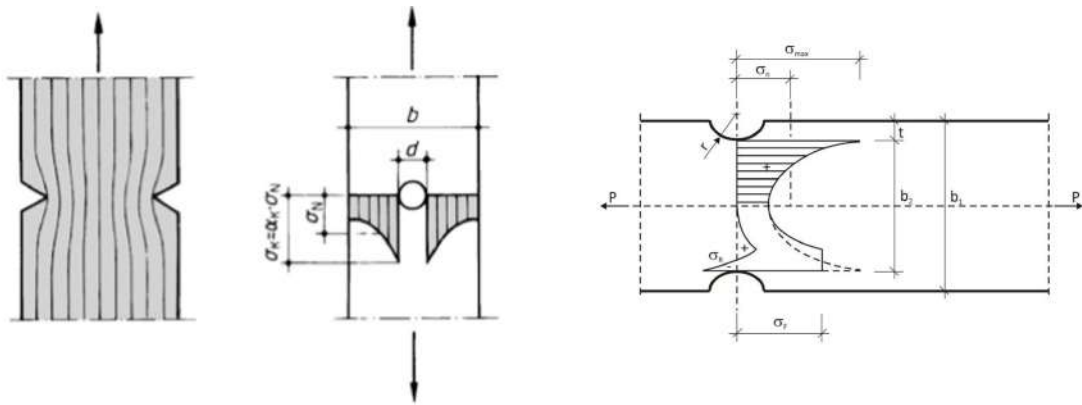


Abbildung 2.1.: Strömungslinien zur Darstellung des Kraftflusses (links), Erhöhung der Spannungen durch Kerbwirkung (mitte, rechts) [2]

ausbreitet. Dieser Riss führt schließlich, wie oben erläutert, zum Gewaltbruch des Restquerschnitts. [2]

Schweißnähte

Schweißnähte zählen zu den konstruktiven Fehlstellen [1]. Sowohl tragende, als auch gering belastete Schweißnähte haben einen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit. Der Einfluss ist abhängig von der Art der Beanspruchung, der Lage zur Beanspruchung, der Art der Schweißnaht und den Schweißnahtfehlern. Entscheidend sind die Umlenkung des Kraftflusses und die Gefügeänderung im Übergangsbereich an der Schweißnahtwurzel. Der Ermüdungsriss liegt selten im Schweißnahtquerschnitt, sondern beginnt an der Schweißnahtwurzel und breitet sich zunehmend im Grundwerkstoff fort. [2] Abbildung 2.2 zeigt die Kraftflusslinien bei gängigen Schweißanschlüssen und die damit einhergehende Kraftflussstörung unter Zugbeanspruchung. Zusätzlich sind die Rissinitiationsstellen durch einen Blitz gekennzeichnet.

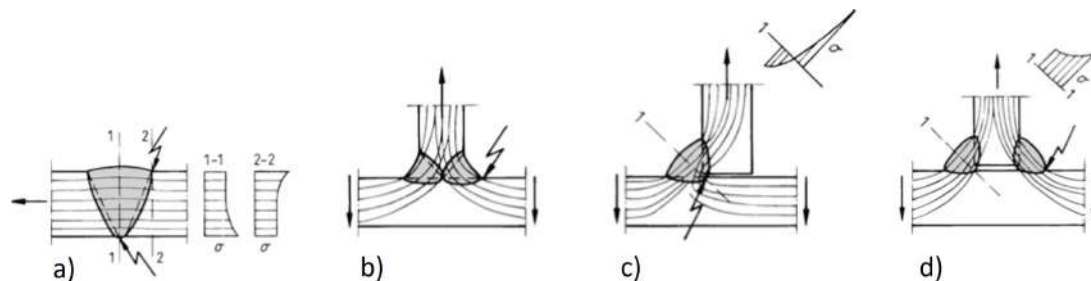


Abbildung 2.2.: Kraftflussstörung bei verschiedenen Schweißnahtausführungen und Ort der Rissausbreitung [2]

Bei Kehlnähten mit T- oder Kreuzstoß (siehe Abbildung b), c) und d) führt eine starke Kraftumlenkung (Kerbwirkung) zu einer hohen Beanspruchung und infolgedessen zu geringer Ermüdungsfestigkeit der Schweißnaht. Bei den Varianten c) und d) ist im Vergleich zu b) zu beachten, dass die Schweißnaht weniger tief in den Werkstoff eingebraunt ist und somit die Kerbwirkung verstärkt wird. [2]

Eine geringe Schweißnahtqualität durch Schweißnahtfehler (Einbrandkerben, Oberflächenfehler, Poren und Schlackeneinschlüsse) wirkt sich ebenfalls negativ auf die Ermüdungsfestigkeit aus [2]. Durch Nachbehandlungsmethoden kann das Ermüdungsverhalten verbessert werden. Mögliche Methoden wie u.a. Überschleifen oder Strahlen reduzieren dabei die Kerbschärfe und Eigenspannungen im Bauteil. Einheitliche Regelungen fehlen jedoch bislang [1].

2.1.2. Wöhlerversuch (Einstufungsversuche)

Der Wöhlerversuch ist ein Dauerschwingversuch bei dem eine Reihe an möglichst identischer Probekörper unter harmonischer Belastung bei gleicher Ober- und Unterspannung bis zum Bruch belastet werden. Das Ergebnis der Bruchlastspielzahl N mit der zugehörigen Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ wird in ein Diagramm eingetragen. Zur Einschätzung der Proben können folgende Kennwerte herangezogen werden: [1]

Oberspannung:	σ_o
Unterspannung:	σ_u
Spannungsschwingbreite:	$\Delta\sigma = \sigma_o - \sigma_u$
Mittelspannung:	$\sigma_m = (\sigma_o + \sigma_u)/2$
Spannungsamplitude:	$\Delta\sigma_A = (\sigma_o - \sigma_u)/2$
Spannungsverhältnis:	$R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$

Die hieraus entstehenden Kurven werden als Wöhlerlinien bezeichnet. Diese geben an, wie viele Lastwechsel ein Bauteil unter einer bestimmter Mittelspannung und Spannungsschwingbreite bis zum Bruch ertragen kann [1]. Die gemessene Lastwechselzahl wird im logarithmischen Maßstab auf die x-Achse aufgetragen. Wird die dazugehörige Spannungsschwingbreite auf die y-Achse ebenfalls logarithmisch skaliert ergeben sich mehrere Abschnitte mit linearen Steigungsanteilen von $m = 0$, $m = 3$ und $m = 5$ (siehe Abbildung 2.3).

Im Eurocode 3 wird der Dauerfestigkeitsbereich der Wöhlerlinie bis $N = 1 \times 10^8$ mit einer geringeren Steigung ($m = 5$) fortgeführt. Schwingbreiten unterhalb dieser Grenze

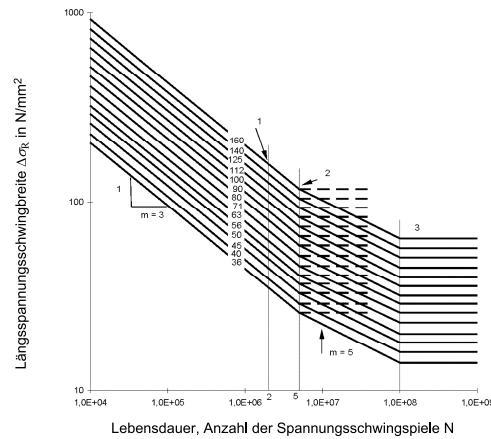


Abbildung 2.3.: Ermüdungsfestigkeitskurve für Längsschwingbreiten [4]

tragen keinen Beitrag zur Schädigung bei. [1] Zudem werden die Bauteile nach Kerbempfindlichkeit in Kerbfallkategorien eingeordnet. Je höher die Empfindlichkeit, desto niedriger die Klasse. Die Klassennummer gibt den Bezugswert $\Delta\sigma_C$ der Ermüdungsfestigkeitskurve bei 2 Millionen Spannungszyklen an [4].

Im Wöhler-Diagramm kann in folgende Festigkeitsbereiche unterschieden werden: [1, 3]

- Kurzeitfestigkeitsbereich: $N < 1 \times 10^4$ (Bruchvorgang ist durch plastisches fließen gekennzeichnet)
- Zeitfestigkeitsbereich: $1 \times 10^4 < N < 5 \times 10^6$
- Dauerfestigkeitsbereich: $5 \times 10^6 < N < 1 \times 10^8$ (Wöhlerlinie mit geringerer Steigung)
- Ermüdungsfestigkeitsbereich: $N > 5 \times 10^8$ (Ermüdungsbruch ist nicht mehr zu erwarten)

Wichtige Kenngrößen sind (vgl. Abbildung 2.3):

1. Bezugswert des Kerbfalls $\Delta\sigma_C$ bei $N = 2 \times 10^6$
2. Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D$ bei $N = 5 \times 10^6$
3. Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_L$ bei $N = 1 \times 10^8$

Für die Berechnung der zu erwartenden Lastwechselzahlen bei gegebener Schwingbreite können folgende Formeln herangezogen werden: [4]

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_D &= \left(\frac{2}{5}\right)^{1/3} \cdot \Delta\sigma_C \\ &= 0,737 \cdot \Delta\sigma_C \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_L &= \left(\frac{5}{100}\right)^{1/5} \cdot \Delta\sigma_D \\ &= 0,549 \cdot \Delta\sigma_D\end{aligned}\quad (2.2)$$

2.1.3. Klassifizierung

Für die Ermittlung der Spannungen auf der Einwirkungs- und der Widerstandsseite sind im Eurocode 3 verschiedene Spannungskonzepte aufgeführt. In den folgenden Kapiteln werden das Nennspannungskonzept und das Strukturspannungskonzept vorgestellt.

Nennspannungskonzept

Beim Nennspannungskonzept wird die Spannung im Querschnitt ohne Einbeziehung von makrogeometrischen spannungserhöhenden Effekten durch die Schweißnaht zugrunde gelegt [5]. Diese werden durch den Kerbfallkatalog berücksichtigt, sodass eine Spannungsberechnung an der Kerbe nicht erforderlich ist. [6] Der Kerbfallkatalog enthält mehr als 70 Konstruktionsdetails. Die Kerbfallklasse entspricht dabei dem Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit bei 2×10^6 Lastwechsel. Zusätzlich werden in der Tabelle die Details beschrieben und die Randbedingungen angegeben. Abbildung 2.4 zeigt einen Auszug aus dem Kerbfallkatalog für geschweißte T-Stoßverbindungen.

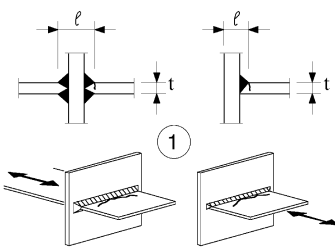
Kerbfall	Konstruktionsdetail			Beschreibung
80	$l < 50$	alle t		Kreuz- und T-Stöße: 1) Riss am Schweißnahtübergang in voll durchgeschweißten Stumpfnähten und allen nicht durchgeschweißten Nähten.
71	$50 < l \leq 80$	alle t		
63	$80 < l \leq 100$	alle t		
56	$100 < l \leq 120$	alle t		
56	$l > 120$	$t \leq 20$		
50	$120 < l \leq 200$	$t > 20$		
	$l > 200$	$20 < t \leq 30$		
45	$200 < l \leq 300$	$t > 30$		
	$l > 300$	$30 < t \leq 50$		
40	$l > 300$	$t > 50$		

Abbildung 2.4.: Auszug aus Kerbfallkatalog [4]

Die Berechnung der Nennspannung erfolgt mit elementaren Theorien der Strukturmechanik auf Grundlage eines linear-elastischen Materialverhaltens [5]. Die Nennspannung entspricht der mittleren Spannung in der Schweißnahtkehle oder im Blech an der

Schweißnahtspitze.

$$\sigma_W \text{ bzw. } \tau_W = \frac{F}{A_W} = \frac{F}{a \cdot l_W} \quad (2.3)$$

mit: σ_W = Spannung in der Schweißnaht in $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
 F = Normalspannung in der Schweißnaht in N
 A_W = Schweißnaht Kontaktfläche in mm

Bei komplizierten Strukturen oder bei makrogeometrischen Effekten, für welche keine analytische Lösung vorhanden ist, kann die FEM (Finite Elemente Methode) verwendet werden. Zu beachten ist, dass bei einem groben Mesh die Knotenkräfte anstatt der Elementspannungen verwendet werden sollten, um eine Unterschätzung der Spannungen zu vermeiden. [5]

Bei Messung der Spannungen direkt am Bauteil müssen die DMS (Dehnungsmessstreifen) außerhalb des Einflussfeldes der Schweißnaht appliziert werden, da beim Nennspannungskonzept die durch die Schweißnaht verursachten Spannungskonzentration nicht berücksichtigt wird. [5]

Bei axialem oder winkligem Versatz sind die Biegespannungen zu berücksichtigen, wenn diese den Betrag aus der Ermüdungsfestigkeitskurve überschreiten [5]. Solche konstruktiv bedingten Spannungsspitzen werden durch eine korrigierte Nennspannung mit einem Spannungskonzentrationsfaktor k_f erhöht, welcher aus der Literatur oder einer FE-Berechnung entnommen werden kann.[6]

Strukturspannungskonzept

Das Strukturspannungskonzept wird angewendet, um spannungserhöhende makrogeometrische Effekte einzubeziehen [6]. Dabei werden jedoch nicht-lineare Spannungsspitzen lokaler Effekte (Kerbspannung), die durch die Schweißnaht verursacht werden mit dem Strukturspannungskonzept nicht berücksichtigt [5]. Das Verfahren wurde speziell für Schweißnähte entwickelt und hat seinen Ursprung in der Offshore-Technik [1]. Es wird typischerweise verwendet, wenn eine Nennspannung aufgrund komplexer Effekte nicht ermittelt werden kann oder wenn das Strukturdetail nicht im Kerbfallkatalog klassifiziert ist. [5] Die Strukturspannung stellt eine fiktive Spannung am Schweißnahtfuß an der Bauteiloberfläche („Hotspot“) dar und der Verlauf ist in Abbildung 2.5 grafisch dargestellt [1].

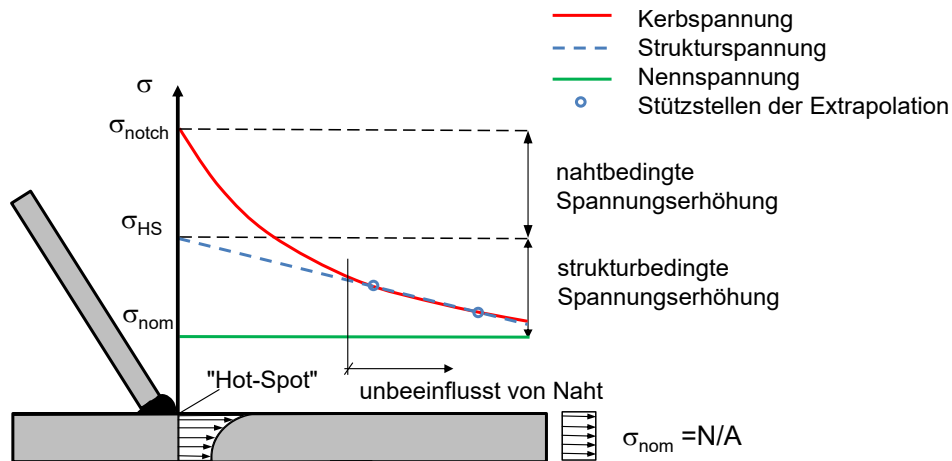


Abbildung 2.5.: Skizze des Spannungsstresskonzeptes [6]

Die in der Schweißnaht vorhandene Kerbspannung σ_{notch} ist wesentlich größer als die Nennspannung σ_{nom} , die beim Nennspannungskonzept zur Berechnung der Spannung in der Schweißnaht verwendet wird. Bei dem Spannungsstresskonzept wird die Spannung der Kerbspannung angenähert, indem die Spannung am Schweißnahtübergang an zwei Referenzpunkten mit bekanntem Abstand extrapoliert wird [5]. Der Maximalwert der Extrapolation am Schweißnahtfuß ergibt den Hotspot-Stress σ_{HS} [1].

Im Falle einer zweiachsigen Beanspruchung ist die Hauptspannung zu verwenden, welche annähernd senkrecht zur Schweißnaht verläuft [5]. Die Spannungen an den Referenzstellen können am realen Bauwerk mittels Dehnungsmessstreifen oder FEM ermittelt werden. Eine Verknüpfung zwischen der Nennspannung und der Strukturspannung stellt der Spannungskonzentrationsfaktor SCF dar, welcher dem Verhältnis von σ_{nom} und σ_{HS} entspricht [1]. Zu beachten ist, dass der SCF von den geometrischen Parametern abhängt und somit nur innerhalb des Bereiches der Schweißnaht gültig ist [5].

Der Ermüdungsnachweis erfolgt mit σ_{HS} analog zu dem Nennspannungskonzept auf Basis der Kerbfalltabellen B.1 aus [4]. Dabei liegen die Kerbfallklassen zwischen $90 \frac{N}{mm^2}$ und $112 \frac{N}{mm^2}$. [4]

Ermittlung der Spannung mittels FEM

Analytische Methoden können nur selten verwendet werden, um die Spannung am Hotspot mit parametrischen Formeln zu bestimmen. Daher wird in der Regel ein FE-Modell verwendet und die Spannung zunächst an einer idealisierten Schweißnaht bestimmt. Mögliche Schweißnahtfehler müssen im Modell explizit modelliert oder über einen Spannungserhöhungsfaktor berücksichtigt werden. [5]

Die Verwendung sowohl von Schalen- als auch von Volumenelementen ist möglich. Es ist jedoch zu beachten, dass durch die Anordnung und Art der Elemente sich große Spannungsgradienten darstellen lassen. Bei komplexen Systemen werden Volumenelemente verwendet, sodass Verschiebungen und eine lineare Spannungsverteilung über die Plattendicke berechnet werden können. Zur Linearisierung der Spannungen über die Blechdicke werden entweder Elemente mit Zwischenknoten und einer quadratischen Verschiebungsfunktion oder mehrere Elemente über die Dicke modelliert. [5] Abbildung 2.6 zeigt eine mögliche Modellierung mit Shell- und Solidelementen. Auf der linken Seite der Abbildung ist die Anordnung von verschiedenen Typen zur Anwendung des Strukturspannungskonzeptes dargestellt.

Nach [5] wird die Modellierung von Schweißnähten im FE-Modell empfohlen. Werden Schweißnähte jedoch nicht explizit modelliert, sollte eine Anpassung der Steifigkeiten im Bereich und eine Extrapolation bis in den Schnittbereich erfolgen.

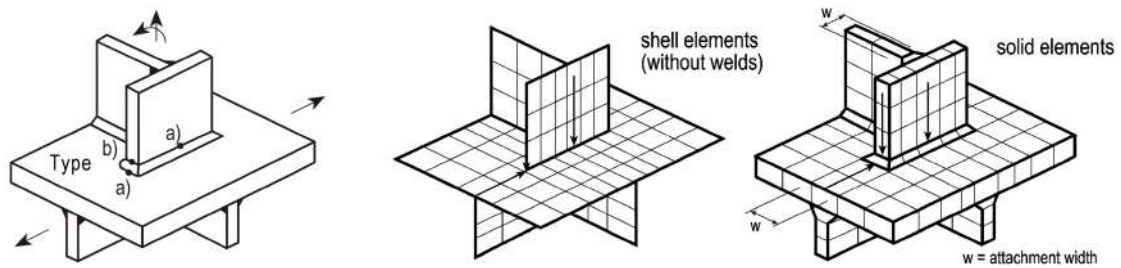


Abbildung 2.6.: FE-Modellierung zur Anwendung des Strukturspannungskonzeptes [5]

Für den Punkt a) kann bei feiner Vernetzung, wenn die Elementlänge $l_e < 0,4 \cdot t$ ist, eine lineare Interpolation mit den Stützstellen $0,4 \cdot t$ und $1,0 \cdot t$ vom Schweißnahtübergang aus durchgeführt werden. Für eine Messung mit Dehnungsmessstreifen direkt am Bauteil gelten die gleichen Empfehlungen. Abbildung 2.7 zeigt schematisch die Abstände zur Platzierung der DMS. [5]

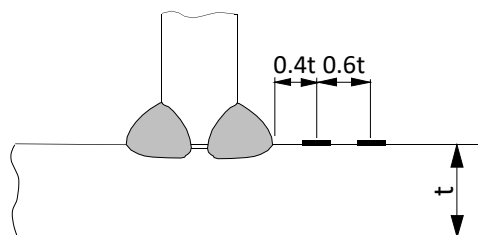


Abbildung 2.7.: Empfehlungen für die Abstände zwischen den Referenzpunkten und dem Schweißnahtübergang [5]

2.1.4. Vorgehen zur Ermittlung der Schädigung bei variablen Spannungsschwingbreiten

Werden die realen Betriebsbedingungen eines Bauwerks oder Bauteils erfasst, ergeben sich häufig keine konstanten, sondern variable Schwingbreiten. Das Ziel ist über eine mehrstufige Berechnung die Schädigung, welches das Bauteil erfährt, zu ermitteln und eine Aussage über die restliche Lebensdauer zu erhalten. In Abbildung 2.8 sind die Schritte nach Eurocode 3 grafisch dargestellt, auf welche in den folgenden Abschnitten eingegangen wird.

In einem ersten Schritt werden die Ausgangsdaten als Spannungs-Zeit-Diagramm grafisch dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Bauteil keiner konstanten Schwingbreite unterliegt. Daher ist es notwendig, die Anzahl der gleichen Zyklen zu zählen. Zwei geeignete Klassifizierungsmethoden sind die Reservoirmethode und die Rainflow-Methode [2].

Rainflow-Verfahren

Das Rainflow-Verfahren berücksichtigt sowohl die Spannungsschwingbreiten als auch die Mittelspannung [1]. Der Algorithmus zählt geschlossene Schwingspiele (Hysteresen), während nicht geschlossene Schwingspiele als Residuum gezählt werden [7]. Zur Veranschaulichung wird das Spannungs-Zeit-Diagramm im UHZ um 90° gedreht, sodass die Zeitachse senkrecht nach unten verläuft. Die lokalen Maxima und Minima werden durch gerade Linien verbunden. Die Geraden bilden veranschaulicht jeweils ein Dach, von denen Regen von einem Umkehrpunkt zum nächsten tropft. Ein Vollzyklus besteht aus zwei Halbzyklen mit gleicher Schwingungsamplitude und Lage. [7] Ein Halbzyklus wird unter folgenden Bedingungen gezählt: [1]

- Tropfen beginnt bei einem Minimum und erreicht ein mindestens gleich großes Minimum
- Tropfen startet von einem Maximum und erreicht ein mindestens gleich großes Maximum
- Tropfen erreicht den Verlauf eines anderen Tropfens

Im nächsten Schritt werden die gezählten Zyklen in Klassen eingeteilt und mit ihrer Häufigkeit in einem Histogramm dargestellt. Daraus lässt sich eine Summenhäufigkeitskurve generieren, die als Spannungskollektiv bezeichnet wird und durch ihren funktionalen Verlauf und weitere statistische Parameter charakterisiert ist. [2] Für jede Stufe des

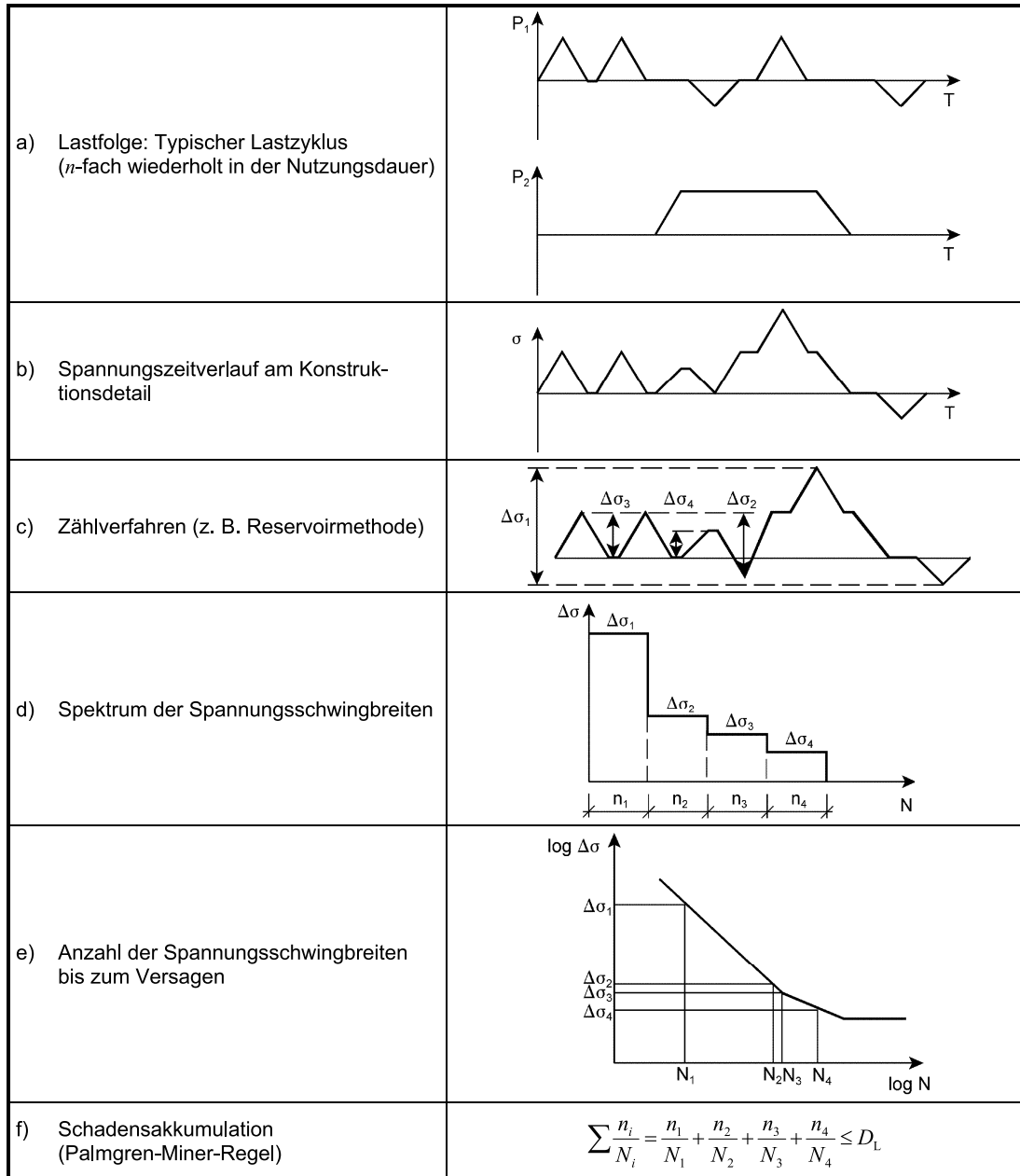


Abbildung 2.8.: Ablauf der Schadensakkumulation [4]

Spannungskollektivs kann mit Hilfe der Wöhlerlinie und des Kerbdetails die zugehörige Lastwechselzahl der Ermüdungsfestigkeit ermittelt werden. Als einfaches rechnerisches Verfahren zur Ermittlung der Betriebsfestigkeit hat sich die Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner etabliert.

Lineare Schädigungsberechnung nach Palmgren-Miner

Die lineare Schädigungshypothese nach Palmgren-Miner geht davon aus, dass bei einer mehrstufigen Beanspruchung jede Spannung σ_i , die n_i -mal auftritt einen Schädigungsanteil am Bruchversagen verursacht.

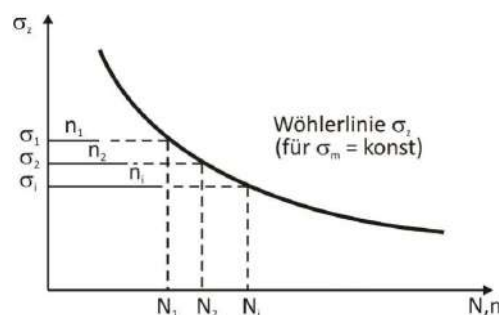


Abbildung 2.9.: Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner [1]

Der Schädigungsanteil wird durch den Quotienten n_i/N_i gebildet, wobei N_i die zur Spannung zugehörige Lastwechselzahl nach der Wöhlerlinie ist. (siehe Abbildung 2.9). Ein Bruch ist zu erwarten, wenn die Summe der Teilschädigungen den Wert 1 erreicht (siehe Gleichung 2.4). [2]

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \leq 1.0 \quad (2.4)$$

2.2. Orthotrope Fahrbahnplatte

2.2.1. Allgemein

Die orthotrope Fahrbahnplatte ist seit den 1930er Jahren eine gängige Bauweise und wird bis heute als Standard für Stahlbrücken betrachtet. Der Begriff „orthotrop“ setzt sich aus den Wörtern „orthogonal“ und „anisotrop“ zusammen, was darauf hinweist, dass die Bauteile rechtwinklig zueinander angeordnet sind und unterschiedliche Steifigkeiten aufweisen. [8] Der Durchbruch dieser Bauweise erfolgte in den 1950er Jahren

in Deutschland, insbesondere im Zuge zahlreicher Neubauten von Brücken mit großer Spannweite. Ein bedeutender Vorteil dieser Bauweise liegt in der vergleichsweise leichten Konstruktion. Durch die Verwendung von dünnen Stahlplatten als Fahrbahnbelag, die von Längs- und Querträgern unterstützt werden, kann das Gesamtgewicht der Brücke reduziert werden. [8]

2.2.2. Aufbau

Das Haupttragwerk einer orthotropen Fahrbahnplatte besteht aus in regelmäßigen Abständen angeordnet Querträger, welche von Längsträgern gehalten werden. Die Fahrbahnplatte selbst setzt sich aus längsorientierten Rippen und einem Deckblech zusammen. [8] Das Deckblech spielt eine entscheidende Rolle in der Funktionalität der Fahrbahnplatte, da es mehrere Aufgaben erfüllt. Zum einen leitet es die Radlasten der Fahrzeuge gleichmäßig in die Gesamtkonstruktion ein, sodass durch die steife Verbindung zwischen Deckblech und Längsträgern die Lasten effizient übertragen werden können. Zum anderen hat das Deckblech eine weitere Funktion als Obergurt für die darunterliegenden stützenden Bauteile. [8] Abbildung 2.10 zeigt ein Ausschnitt des Haupttragwerks als schematische Darstellung.

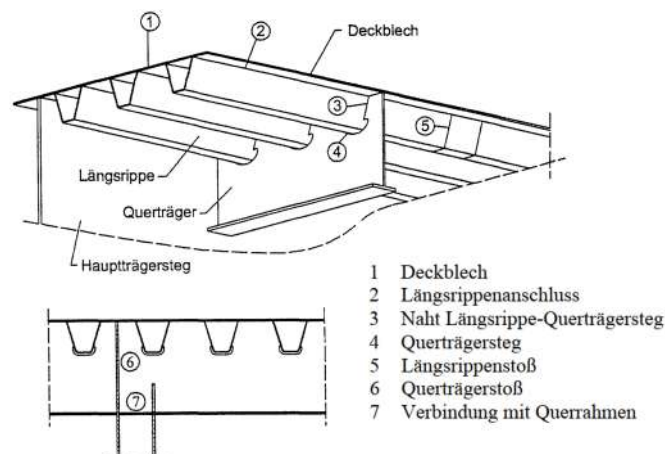


Abbildung 2.10.: Haupttragwerk einer orthotropen Fahrbahnplatte [9]

In den 1970er Jahren wurden torsionsweiche Flachsteifen als tragende Elemente für orthotrope Fahrbahnplatten verwendet. Diese wurden jedoch später durch Trapezhohlsteifen abgelöst [8]. Die Verwendung von Trapezhohlsteifen brachte einige Vorteile mit sich, wie beispielsweise eine verbesserte Torsionssteifigkeit und eine effizientere Lastverteilung. Im Zuge der Entwicklung von orthotropen Fahrbahnplatten wurden auch alternative Profilformen untersucht, um die Leistungsfähigkeit der Brückenkonstruktion

weiter zu verbessern. Aus patentrechtlichen Gründen wurden zudem V- oder Y-Profile, die auch als Sektkelchprofile bezeichnet werden, entwickelt. Die verschiedenen Ausführungsformen der Längssteifen sind in Abbildung 2.11 gezeigt. Dabei ist die Form der Trapezhohlsteife der heutige Standard. [10]

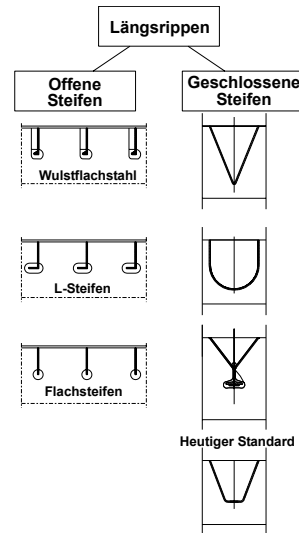


Abbildung 2.11.: Verschiedene Längssteifenprofile [10]

Allerdings brachten die alternativen Profilformen einige Herausforderungen mit sich. Zum einen war der Herstellungsaufwand für diese speziellen Profile erhöht, was sich auf die Kosten und die Umsetzbarkeit der Konstruktion auswirkte. Darüber hinaus traten vermehrt Ermüdungsprobleme bei den Verbindungen zwischen den Profilen und anderen Bauteilen auf. [11]

2.2.3. Ermüdung in Bezug auf orthotrope Fahrbahnplatten

Die Zunahme des Verkehrs und die immer schwereren Lasten führen zu charakteristischen Schäden an Brücken, da viele Brücken für diese Belastungen nicht ausreichend ausgelegt sind [12]. Besonders betroffen sind Bauwerke aus den 1960er und 1970er Jahren, bei denen aufgrund fehlender Erfahrungen das Ermüdungsversagen unterschätzt und zu geringe Materialdicken angesetzt wurden. Dies führt zu einer verringerten Tragfähigkeit und einer erhöhten Anfälligkeit für Schäden. Zusätzlich zu diesen Herausforderungen kam es aufgrund von Ausführungsfehlern beim Schweißen zu einer unzureichenden Nahtqualität. [8]

Die Schäden an orthotropen Fahrbahnplatten können in vier Gefährdungskategorien eingeteilt werden, wobei nur Schäden berücksichtigt werden, die auf das Bauwerk

selbst und nicht auf Planung, Ausführung oder Baustoffe zurückzuführen sind (siehe Abbildung 2.12) [11]. Besonders relevant sind die Kategorien 1 und 2, die nachfolgend näher erläutert werden.

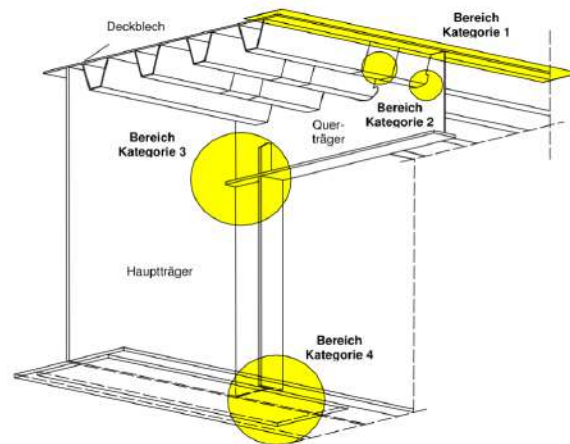


Abbildung 2.12.: Gefährdungsbereiche und -kategorien der orthotropen Fahrbahnplatte [8]

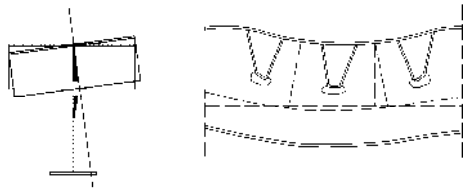
In der Kategorie 1 werden die Verbindungen zwischen den Rippen und dem Deckblech betrachtet. Hier treten Schäden in den Kehlnähten auf, die sich zwischen dem Rippensteg und dem Deckblech befinden. Diese Schäden stehen in direktem Zusammenhang mit dem Beanspruchungsort, da eine Vielzahl von Rissen unterhalb der Fahrspur des Schwerlastverkehrs auftreten. [8, 12]

Ein weiteres Problem besteht darin, dass durch Risse in den Schweißnähten Luft und Feuchtigkeit eindringen können. Aufgrund des oft fehlenden Korrosionsschutzes im Inneren der Hohlsteife kann dies zu einer Schädigung der ungeschützten Stahloberfläche führen. Als Folge davon kann es zu Korrosion und Reduzierung der Blechdicken kommen, was wiederum die Tragfähigkeit der Fahrbahnplatte beeinträchtigt. [8]

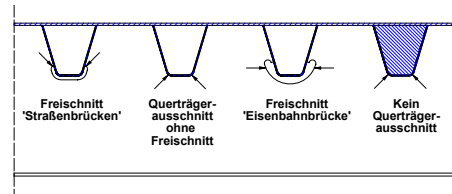
In der Kategorie 2 werden die Schäden in den Verbindungsstößen zwischen den Rippen und den Querträgerstegen betrachtet [12]. Im Gegensatz zur Kategorie 1 besteht hier kein zwingender Zusammenhang zwischen der Beanspruchung und dem Schadensort [8].

Die Risse in der Kategorie 2 entstehen durch die Verdrehung des Kreuzungspunktes zwischen den Rippen und den Querträgerstegen. Die Verdrehung, welche in Abbildung 2.13a dargestellt ist, führt zu Zwängungen, deren Ausmaß von der Dicke des Querträgerblechs abhängt. [12] Abbildung 2.13b verdeutlicht die Stellen der Risse für Kategorie 2 bei Trapezsteifen mit und ohne Querträgerfreischnitt. Es ist ersichtlich, dass

bei der Ausführung ohne Freischnitt die Schadstellen an den Rundungen an der Unterseite der Steife auftreten.



(a) Verdrehung und Verformung der Längsrippen [9]



(b) Rissstellen bei unterschiedlichen Querträgerausschnitten [10]

Abbildung 2.13.: Rissursache und -ort bei Schäden der Kategorie 2

Die orthotrope Fahrbahnplatte unterliegt definierten Anforderungen gemäß DIN EN 1993-2, um die Ausführungsqualität und Ermüdungssicherheit zu gewährleisten [11]. Diese Anforderungen umfassen Mindestwerte für die Blechstärke des Deckblechs (14 mm) und den horizontalen Abstand zwischen den Trapezsteifen (300 mm) [8]. Zusätzlich sollten die Blechdicken der Längsrippen gemäß statischer Erfordernisse zwischen 6 mm und 8 mm liegen [13].

Die Einhaltung dieser Anforderungen ermöglicht den Verzicht auf einen rechnerischen Nachweis bei Neubauten. Abweichende Ausführungen erfordern jedoch einen Ermüdungsnachweis mit dem entsprechenden Ermüdungslastmodell gemäß DIN EN 1991-2. Zur Überprüfung der orthotropen Fahrbahnplatte wird das Nennspannungskonzept mit definierten Kerbfällen angewendet. Aufgrund lokaler Spannungserhöhungen an den Verbindungsstellen und der komplexen Geometrie werden maximale Verformungsgrößen gemäß DIN EN 1993-2 angegeben. Aktuell wird die Verwendung von FE-Simulationen als wirtschaftliche Methode zur Bemessung empfohlen. [11]

3. Bestandsanalyse des Bauwerks

Um einen Überblick über das in dieser Arbeit untersuchte Bauwerk zu erhalten, wird in diesem Kapitel zunächst das Bauwerk beschrieben, anschließend die bereits vorhandenen Schäden am Bauwerk, insbesondere an den Schweißnähten, untersucht und schließlich das Messsystem erläutert, welches die Daten liefert, die in der Messdatenanalyse ausgewertet werden.

3.1. Beschreibung des Bauwerks

Bei dem in dieser Arbeit untersuchtem Bauwerk handelt es sich um den Überbau des Autobahnkreuzes Dortmund-Unna. Die Brücke liegt südwestlich der Stadt Unna und etwa 14 km östlich von Dortmund. Das Autobahnkreuz verbindet die A44 (West-Ost-Richtung) mit der A1 (Nord-Süd-Richtung) und ist in der Kleeblattbauweise ausgeführt. Die A44 wird in westlicher Richtung als Bundesstraße 1 weitergeführt und verläuft durch die Dortmunder Innenstadt. Das Bauwerk wurde 1972 fertiggestellt.

Der Überbau besteht aus vier voneinander entkoppelten Teilbauwerken (TBW), mit jeweils zwei Fahrspuren. Auf dem äußeren TBW werden die Abbiegespuren geführt, wohingegen auf den beiden inneren TBW die Hauptfahrspuren geführt werden. Die einzelnen Teilbauwerke weisen etwa die gleichen Abmessungen auf. Der einzige Unterschied besteht darin, dass die äußeren TBW schmaler ausgeführt sind. Die Brücke weist eine geringe Krümmung mit einem Radius von 2260 m auf. In Abbildung 3.1 ist die Draufsicht des Autobahnkreuzes als Satellitenbild abgebildet und das TBW 2 markiert.

In dieser Arbeit wird ausschließlich das TBW 2 auf der nördlichen Seite des Autobahnkreuzes mit den Hauptfahrbahnen in Richtung Dortmund untersucht. Das zweifeldrig ausgeführte Bauwerk hat eine Gesamtlänge von 65,17 m mit Einzelstützweiten von 33,42 m und 31,75 m. Die Breite einschließlich der Konsolen beträgt 15,15 m. In der Abbildung 3.2 ist die Unteransicht des Teilbauwerks 2 dargestellt. Das Haupttragwerk besteht aus zwei parallelen Längsträgern mit einem Abstand in Querrichtung von 8,7 m und 33 Querträgern mit einer Regelfeldlänge von 2,02 m. Die Fahrbahnplatte der Brücke liegt auf trapezförmigen Längssteifen auf, die stirnseitig an die Querträger angeschlossen und nicht durchgesteckt sind. Darüber hinaus weist das Bauwerk im Vergleich zu



Abbildung 3.1.: Draufsicht Autobahnkreuz Dortmund-Unna [14]



Abbildung 3.2.: Unteransicht Teilbauwerk 2

anderen orthotropen Fahrbahnplatten keine Querträgeröffnung im Bereich der Längssteifen auf. Bei den Schweißnähten handelt es sich, sowohl an den Anschlüssen der Längssteifen als auch am Übergang zum Deckblech ausschließlich um Kehlnähte. Die Dicke der Schweißnaht ist aus den Unterlagen nicht zu entnehmen und wird aufgrund einer visuellen Einschätzung mit 10 mm angenommen. Inwieweit die Schweißnähte in das Material eingebrannt sind, kann nicht beurteilt werden. Auf nähere Abmessungen der Bauteile wird in Kapitel Unterabschnitt 4.1.1 eingegangen.

3.2. Bestehende Schäden

Um für die späteren Untersuchungen Anhaltspunkte zu erhalten, welche Bereiche näher zu untersuchen sind, werden im Rahmen der Voruntersuchung vorhandene Schäden an der Brücke identifiziert. Da das Ziel dieser Arbeit die Untersuchung der Restlebensdauer im Hinblick auf die Ermüdungsfestigkeit ist, wird im Folgenden der Schwerpunkt auf die ermüdungskritischen Schweißnähte gelegt. Für dieses Bauwerk liegen Prüfberichte vor, in denen die Schäden der letzten 20 Jahre dokumentiert sind.

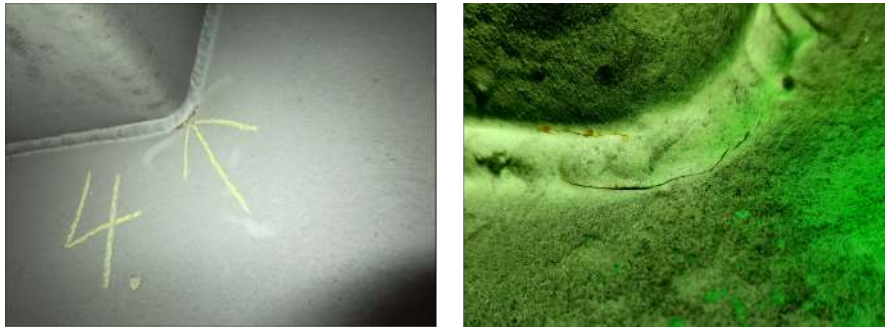
Die Schweißnahtbrüche treten bei diesem Bauwerk insbesondere an zwei Stellen auf. Der in Abbildung 3.3a im linken Bild dargestellte Riss befindet sich im abgerundeten Eckbereich der Längssteife im Anschlussbereich an den Querträger. Dieser Schaden ist typisch für Längssteifen, die direkt mit dem Querträger verschweißt sind und nicht in den nächsten Abschnitt übergehen. Der Bereich wird durch Schub- und Zugbeanspruchung beansprucht, zudem sind im Bauwerk viele solcher Schweißnahtdetails vorhanden. Der erste derartige Riss wurde im Jahr 2002 dokumentiert und mit dem Sicherheitskennwert $D = 2$ für die Dauerhaftigkeit¹ bewertet. Weitere 125 Schweißnahttrisse wurden bei der Hauptprüfung 2014 festgestellt. Aus den Bestandsunterlagen geht nicht hervor, ob diese instand gesetzt wurden.

Die zweite kritische Stelle ist die Verbindung der Längssteifen untereinander durch eine Stumpfnah (siehe Abbildung 3.3a). Der in diesem Beispiel dargestellte Riss hat den Ursprung im Bogenbereich des Trapezprofils und wächst Richtung Fahrbahnplatte weiter an. Das statische System der Trapezsteife entspricht einem eingespannten Einfeldträger mit einer Streckenlast durch die aufliegende Fahrbahnplatte. Daher liegt an der Unterseite der Steife Zugspannungen vor, welche die Schweißnähte belasten. Falls der Riss

¹Der Mangel/Schaden beeinträchtigt die Dauerhaftigkeit des Bauteils und kann langfristig auch zur Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit des Bauwerks führen. Die Schadensausbreitung oder Folgeschädigung anderer Bauteile kann nicht ausgeschlossen werden. Schadensbeseitigung mittelfristig erforderlich.

bereits entstanden ist und eine gewisse Größe erreicht hat, ist das Material der Bewitterung frei ausgesetzt, da die Korrosionsbeschichtung den Riss nicht mehr überdeckt.

Weitere Schäden an der Brücke sind zahlreiche korrodierte Stellen an nicht tragenden Bauteile und das Aufplatzen der Beschichtung der Fahrbahn.



(a) Gerissene Schweißnaht im Übergang der Längssteife zum Querträger



(b) Riss im Stoß der Trapezsteifen mit zusätzlicher Abplatzung des Korrosionsschutzes

Abbildung 3.3.: Häufige Schäden am Bauwerk

3.3. Vorstellung des Messkonzeptes

Die Entwicklung des Messkonzeptes wurde bereits in Vorarbeiten im Projekt BrAssMan durchgeführt und ist nicht Bestandteil dieser Arbeit. Das Messkonzept sieht vor, die tatsächlichen Dehnungen sowie die Bauteil- und Außentemperatur zu erfassen. Zusätzlich wird die Sonneneinstrahlung auf die Brücke detektiert, um eine Korrelation zur Bauteiltemperatur herstellen zu können. Insbesondere sollen in dieser Arbeit ermüdungsempfindliche Bereiche überwacht und ausgewertet werden. Insgesamt sind 57 Dehnungsmessstreifen und 9 Temperatursensoren verbaut. Um die Übertragbarkeit der Messdaten bei Ausfall einzelner Sensoren zu gewährleisten, wurden drei Querträger mit der Bezeichnung QT4 - QT6 ausgewählt. Diese befinden sich auf der östlichen Seite der Brücke zwischen 6 m und 10 m in Fahrtrichtung hinter der Brückenschwelle.

Die Positionen der Sensoren in Querrichtung richten sich nach der halbseitigen Ausführung des RQ 29,5 [15]. Die Sensoren sollen unterhalb des linken Reifens des Schwerlasttransports installiert werden, da hier die höchsten Ermüdungsbeanspruchungen zu erwarten sind. Der Regelquerschnitt sieht vier Fahrstreifen vor, davon zwei je Richtung mit einer Fahrstreifenbreite von je 11,5 m. Jede Fahrspur ist 3,75 m breit. Wenn die Konsolbreite und die Sicherheitsabstände zur Spurweite addiert werden, ergibt sich ein Abstand des linken Reifens vom rechten Rand des Oberbaus von etwa 7,5 m.

Abbildung 3.4 zeigt die Draufsicht der Brücke als Satellitenbild. Die rote Linie stellt den Übergang von der festen Fahrbahn zur Brücke dar. Der diagonale Verlauf ergibt sich daraus, dass die Kreuzungswinkel der Autobahnen nicht senkrecht zueinander stehen. Die violette Umrandung markiert die Grenzen des TBW 2. Der Fokus der Abbildung liegt auf dem schwarzen Rechteck in der Mitte. In diesem Bereich sind die Sensoren am Querträger 5 montiert. Es ist deutlich zu erkennen, dass die DMS genau unter der Spur des linken Reifens angebracht sind. Die Sensoren am QT 4 und QT 6 sind in der Abbildung nicht dargestellt und liegen ebenfalls unterhalb der Spur.

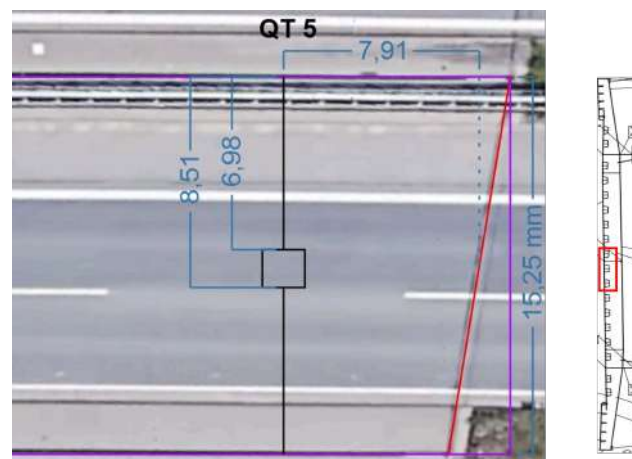


Abbildung 3.4.: Lage des Messbereichs unterhalb der Brücke in der Draufsicht (Maße in [m]) (Hintergrund: [16])

Damit das Rad auch bei einer seitlichen Spurabweichung erfasst wird, sind die Sensoren an drei Längssteifen verteilt. Auf der rechten Seite der Abbildung 3.4 ist der Querschnitt des Überbaus parallel zur Fahrbahn dargestellt. Im roten Rahmen ist der von den Sensoren des Messsystems erfasste Bereich mit einer Breite von 1,53 m gekennzeichnet.

Nachfolgend wird die Platzierung der DMS auf den Bauteilen beschrieben. In der Abbildung 3.5 auf der linken Seite sind die Bezeichnungen der DMS mit der jeweiligen Position angegeben. Es ist zwischen zwei verschiedenen Messquerschnitten zu unterscheiden. Der MQS-1 bezieht sich auf den QT 5 und damit auf den mittleren Querträger. Die

Messquerschnitte 2 und 3 beziehen sich auf QT 4 und QT 6. Der MQS-2 ist dabei der in Fahrtrichtung vordere und der MQS-3 der hintere Querträger. Diese Messquerschnitte sind mit weniger Sensoren ausgestattet und dienen der Überprüfung einer Redundanz der Messergebnisse und der Ermittlung der Fahrzeuggeschwindigkeit. Es entfallen die gelben DMS parallel zum Trapezprofilblech sowie die DMS an den Positionen 10 und 21 des MQS-1. Zur Berechnung der Spannungen, die für die Ermüdungsberechnung der Schweißnahtdetails maßgebend sind, werden die von den DMS gemessenen Dehnungen mit dem Elastizitätsmodul von $210\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ multipliziert. Nachfolgend wird die Funktion der DMS, die durch unterschiedliche Farben in Gruppen eingeteilt sind, erläutert.

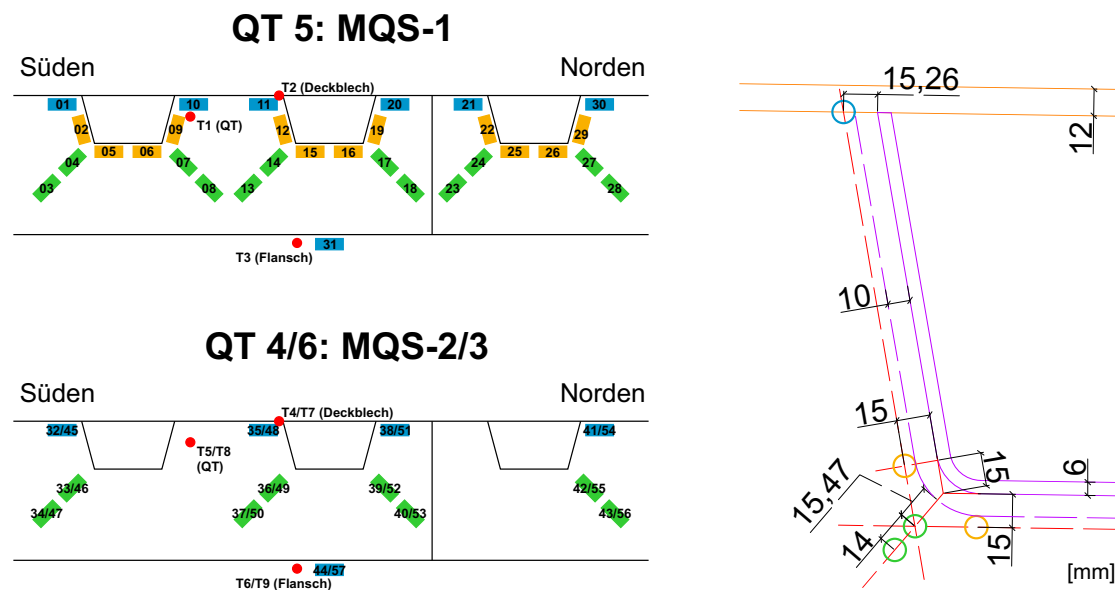


Abbildung 3.5.: Sensorpositionen der Messquerschnitte und Abstände zur Längssteife

Es ist zu beachten, dass die DMS der blauen Gruppe nicht auf dem Querträger, sondern unter der Fahrbahnplatte aufgeklebt sind, sodass ein gewisser Abstand zum Querträgersteg eingehalten werden muss. Der horizontale Abstand in Brückenlängsrichtung vom Querträgersteg beträgt 20 mm. Die DMS dienen zur Lokalisierung des Rades in Brückenquerrichtung, um eine Verteilung zu erhalten, welcher Anteil der Fahrzeuge genau mittig in der Spurrille fährt und welcher Anteil einen seitlichen Versatz aufweist. Es soll geprüft werden, ob die Anzahl der Schwerfahrzeuge, die ständig die gleiche Schweißnaht belasten, reduziert werden kann. Zusätzlich kann die Bestimmung der Radposition verwendet werden, um die Belastungssituation der Fahrzeugüberfahrt mit der Lasteinwirkung des FE-Modells abzugleichen.

Die Hauptfunktion der gelben DMS besteht darin, die Dehnungen in vertikaler Richtung an der Schweißnaht des Längsträgers zu erfassen und eine Bewertung der Mehrachs-

keit der Spannungen im Bereich der Eckausrundung der Längssteife vornehmen zu können. Bei diesen Schweißnähten ist von einer geringeren Ermüdungsanfälligkeit auszugehen, weshalb diesen Dehnungsmessstreifen eine geringere Bedeutung beigemessen wird. Aus diesem Grund ist die gelbe Sensorgruppe nur an der MQS-1 installiert.

Für die eigentliche Messung der Dehnungen im ermüdungsanfälligen Bereich, d.h. im Bogen der Trapezsteife, werden die grünen Dehnungsmessstreifen appliziert. Aufgrund der Tatsache, dass die Messstreifen nicht direkt auf die Schweißnähte aufgebracht werden können, sondern sich in einem gewissen Abstand von der Schweißnaht befinden, wird die kritische Spannung nicht direkt in der Schweißnaht ermittelt. Um eine genauere Aussage über die vorhandenen kritischen Spannungen zu erhalten, wird hierfür das Strukturspannungskonzept in der Messdatenanalyse angewendet. Das Konzept ermöglicht die Extrapolation der gemessenen Spannungen am Schweißnahtübergang unter Verwendung von zwei Messpunkten, die in bekanntem Abstand voneinander und von der Schweißnaht angeordnet sind. Die Empfehlungen nach dem IWW [5] geben einen Abstand der Referenzpunkte von $0,4 \cdot t$ und $1,0 \cdot t$ vom Hotspot (Schweißnahtübergang) an, wobei t die Blechdicke ist. Bei einer Dicke von 10 mm würde dies einem Abstand des inneren DMS von 4 mm und des äußeren DMS von 10 mm entsprechen. Mit der Bezeichnung „inneren“ wird der DMS bezeichnet, welcher näher an der Steife liegt. Beim Messsystemen sind die Sensoren in unterschiedlichen Abständen am Querträger angebracht. Bei MQS-1 beträgt der Abstand, wie in der Abbildung dargestellt, jeweils 15 mm zum Steg bzw. Flansch und bei MQS-2 und MQS-3 jeweils 20 mm, wodurch sich entsprechend größere Abstände zum Hotspot ergeben. Die Abstände zum Schweißnahtübergang, auf den die Spannungen extrapoliert werden, betragen bei MQS-1 15,47 mm zum inneren und 29,47 mm zum äußeren DMS und sind damit größer als vom IWW empfohlen. Aus geometrischen Gründen können die Sensoren nicht näher an die Schweißnaht geklebt werden, sodass die kleinstmöglichen Abstände gewählt sind.

Auf der rechten Seite der Abbildung 3.5 sind Abmessungen des Trapezprofils, sowie die Abstände der Sensoren zur Längssteife eingezeichnet. Die Längssteife weist eine Blechdicke von 6 mm und eine obere Breite von 300 mm auf. Der mittige horizontale Abstand der Längssteifen untereinander beträgt 600 mm. Die Dicke der Schweißnaht kann nicht aus den Bestandsunterlagen entnommen werden und wird visuell bei der Begehung des Bauwerks mit 10 mm ermittelt und ist in der Abbildung als lila gestrichelte Linie eingezeichnet. Zusätzlich ist das Deckblech mit einer Dicke von 12 mm orange gekennzeichnet.

4. Modellierung

Damit die am Bauwerk erhobenen Messdaten validiert und zusätzliche Ermittlungen durchgeführt werden können, wird eine Simulation einer Überfahrt mittels FE-Berechnung durchgeführt. Das FE-Modell stellt ein Abbild des Bauwerks mit den zugehörigen Randbedingungen und Lastbedingungen dar. Die Abmessungen der Bauteile und Geometrie der Brücke wird den originalen Bestandsunterlagen entnommen. Dazu werden die 2D-Pläne zunächst mittels CAD digitalisiert und anschließend in einer FE-Software in ein 3D-Modell überführt und die Bauteile anschließend zusammengefügt. Um die Analyse durchführen zu können, wird jedes Bauteil in finite Elemente unterteilt und die Kräfte, Spannungen und Verschiebungen berechnet. Grundsätzlich gilt, dass eine höhere Anzahl von Elementen die Berechnungsgenauigkeit erhöht, jedoch der Rechenaufwand und damit der einhergehenden Zeitaufwand steigt.

Das Modell wird mit der Software Abaqus (Version 2019) erstellt, weshalb sich die Beschreibung der Modellierung eng an diese anlehnt.

Zur Reduzierung des Rechenaufwands wird das Gesamtmodell als Schalenmodell abgebildet. Für die Ergebnisse ist jedoch nur der Ausschnitt relevant, in dem die Dehnungsmessstreifen angebracht sind. Um genauere Ergebnisse in diesem Bereich zu erhalten wird dieser Bereich als Volumenmodell mit einer feineren Netzdichte konstruiert. Damit eine feinere Vernetzung im Volumenmodell möglich ist, müssen Übergangsbereiche erstellt werden.

Anschließend wird in einem separaten Modell (Submodell) ein Ausschnitt erstellt, mit dem die Netzgröße auf die erforderliche Maschenweite reduziert werden kann. Um die Anzahl an verschiedenen Meshgrößen zu begrenzen und zu vereinheitlichen, werden folgende Elementkantenlängen verwendet:

- 200 mm: Deckblech
- 100 mm: Längsträger und Bereiche geringerer Bedeutung
- 50 mm: Zwischengröße des Übergangs von Schalenmodell und Volumenmodell
- 7,5 mm: Volumenmodell
- 2 mm: Submodell in separater Simulation

Die Netzgröße von wenigen Millimetern ist entscheidend, da die Ergebnisse an den Knotenpunkten ausgewertet werden und deren Positionen möglichst mit den Positionen der Messsensoren übereinstimmen müssen. Im folgenden Kapitel wird zunächst die

Modellierung des Globalmodells erläutert und anschließend auf das Submodell und die berechneten Ergebnisse eingegangen.

4.1. Globalmodell

Das Gesamtmodell bildet das Teilbauwerk 2 der Autobahnbrücke wie in Abbildung 4.1 dargestellt ab. Bei der Modellierung eines Bauwerks als FE-Modell muss immer ein Kompromiss zwischen Detaillierungsgrad und Vereinfachungen getroffen werden. Die Geometrie, insbesondere von hoch beanspruchten Bauteilen, sollte möglichst realitätsnah abgebildet werden. Bauteile mit geringeren Anforderungen an die Tragfähigkeit können vereinfacht oder vernachlässigt werden. Besteht das Bauwerk aus vielen Einzelbauteilen, kann eine Vereinfachung des Gesamtmodells auch die Anzahl der zu verbindenden Teile reduzieren und damit zur Übersichtlichkeit und Verringerung der Komplexität beitragen.

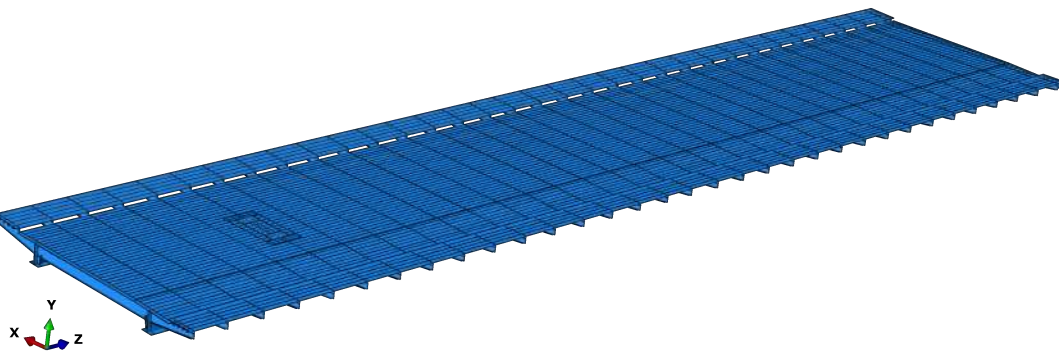


Abbildung 4.1.: Globalmodell der Brücke

Die Querschnittsansicht der Brücke und die Lage der Längssteifen ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Die Querträger sind grün, die Längsträger blau und die Längssteifen rosa markiert.

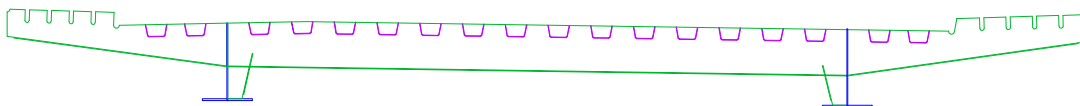


Abbildung 4.2.: Ansicht Brückenquerschnitt

In diesem Modell werden die Geometrie, die Lagerungsbedingungen und das Material so realistisch wie möglich modelliert. Die Seitenbleche der Fahrbahn, die keinen

Einfluss auf die Tragfähigkeit haben, werden vernachlässigt. Die Krümmung der Brücke wird ebenfalls nicht berücksichtigt und die Brücke wird als rechteckig angenommen. Da die Ergebnisse im Bereich der DMS ermittelt werden, ist eine generelle Vereinfachung der Brücke zulässig.

4.1.1. Modellierung relevanter Bauteile

Die Brücke besteht aus mehreren Bauteilen, von denen die wichtigsten in den folgenden Abschnitten erörtert werden. In Abaqus werden die Bauteile zunächst als Parts erzeugt, um diese anschließend im Assembly Modus räumlich zu positionieren und miteinander zu verbinden. Dabei stellt der Part eine Vorlage dar, die im zusammengesetzten Modell beliebig oft verwendet werden kann. Ein Part muss nicht zwangsläufig aus einem zusammenhängenden geometrischen Körper bestehen. Besteht ein Bauteil aus zusammenhängenden Körpern, so sind diese stoffgleich miteinander verbunden. Innerhalb eines Parts ist es daher nicht erforderlich, die Schweißnähte oder die Verbindungen zu modellieren.

Längsträger

Durch die Vernachlässigung der Krümmung des Teilbauwerks weisen der nördliche und südliche Längsträger die gleiche Geometrie auf. In dem Modell sind diese zusammengefasst als ein Part mit einem horizontalen Abstand von 8,7 m modelliert. Aufgrund der seitlichen Neigung der Fahrbahn liegt der südliche Träger (in Abbildung 4.1 vordere LT) 92 mm niedriger als der nördliche Längsträger.

Die Länge entspricht der gesamten Brückenlänge von 65,164 m. Die Querschnittsgeometrie ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Der Längsträger besteht aus einer vertikalen 1058 mm und einer horizontalen 700 mm breiten Platte, welche im Knotenpunkt verbunden sind. Die Dicke des Steges beträgt 12 mm.

Die gesamte Lagerung des Bauwerks erfolgt über die Längsträger (siehe Abbildung 4.4). Das statische System entspricht einem Zweifeldträger mit etwa gleichen Feldlängen. Auf der Westseite ist die Brücke auf einer Gleitfläche gelagert und wird im Modell durch ein flächiges Festlager modelliert, welches sowohl eine Verschiebung, als auch eine Verdrehung blockiert. Das mittlere und östliche Lager sind im Bauwerk durch ein Rollenlager

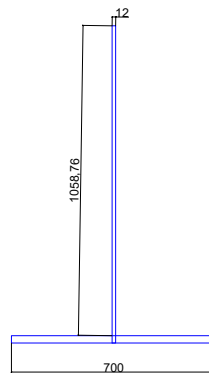


Abbildung 4.3.: Skizze der Längsträger im Querschnitt

konstruktiv gelöst. Im Modell wird hierzu eine Linie über die Breite des Flansches erstellt, für welche die Lagerungsbedingungen definiert wird. Hierbei ist die Verschiebung in Brückenlängsrichtung und die Verdrehung um die X-Achse gewährleistet.

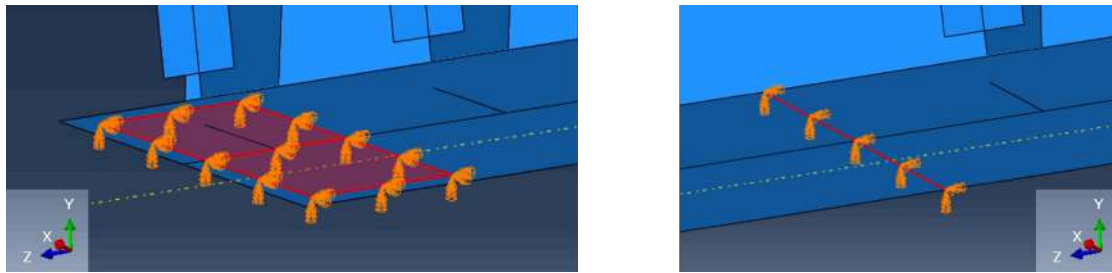


Abbildung 4.4.: Modellierung der Auflager: westliches Widerlager (links), mittleres und östliches Widerlager (rechts)

Es ist zu beachten, dass der untere Flansch unterschiedliche Dicken aufweist. Aus den Unterlagen geht hervor, dass die Dicke an den Auflagern 25 mm, im Feld 50 mm und im Bereich des Mittelaufagers 75 mm beträgt. Messungen am Bauwerk zeigen, dass in beiden Feldbereichen eine nachträgliche Verstärkung der Flanschdicke vorhanden ist. Im Abstand von 2 m von den äußeren Auflagern wird die Flanschdicke nach unten um 45 mm vergrößert, sodass die Dicke an dieser Stelle 70 mm beträgt. Um die verschiedenen Dicken im Schalenmodell zu modellieren, werden in Abaqus Flächen partitioniert und diesen anschließend verschiedene Dicken zugeordnet.

Im Hinblick auf die Rechenzeit und die große Geometrie der Längsträger wird das Netz relativ grob ausgelegt. Die Kantenlänge der Elemente beträgt 100 mm, sodass sich für die beiden Längsträger insgesamt 24.000 quadratische Schalenelemente ergeben.

Querträger

Der Querträger ist das Verbindungsglied zwischen dem Traggerüst aus Längssteifen und den Längsträgern, die die Kräfte in die Auflager einleiten. Der Querträger dient somit als Knotenpunkt mit zahlreichen Anschlüssen. In Abbildung 4.5 ist die Geometrie der modellierten Querträger dargestellt. Grob kann der Querträger (QT) in drei Abschnitte unterteilt werden. Zum einen in den Mittelabschnitt, der sich zwischen den Längsträgern befindet und in zwei Außenabschnitte, welche kragarmförmig den äußeren Teil der Fahrbahnplatte und die Konsolplatten tragen.

Der Flansch an der Unterseite des Querträgersteges und die Steifen im Bereich der Auflagerung auf den Längsträgern sind im Bauwerk angeschweißte Bleche. Im Modell sind die Bleche Teil des Parts und somit starr mit dem Querträger verbunden. Am Bauwerk sind die Bleche verschweißt, was zu einer Verminderung der Steifigkeit führt. Um jedoch die Anzahl der Verbindungen im Modell zu reduzieren, wird hier darauf verzichtet, die Bleche als separate Bauteile zu modellieren. Aufgrund der Tatsache, dass an diesen Stellen keine Brüche in den Schweißnähten gefunden wurden, kann davon ausgegangen werden, dass diese Vereinfachung gültig ist. Am Bauwerk ist der Steg des Querträgers in einzelne Blechabschnitte unterteilt und durch eine Doppellaschung als Schraubverbindung miteinander verbunden. Im FE-Modell werden diese Verbindungen nicht berücksichtigt und stattdessen der Querträgersteg als ein zusammenhängendes Bauteil erstellt.

Alle Querträger weisen die gleiche Geometrie auf und werden als Schalenmodell modelliert. Insgesamt sind 33 Querträger im Modell mit einem Regelabstand von 2020 mm angeordnet und nur in den Auflagerbereichen weicht der Querträgerabstand von der Regellänge ab. Eine Besonderheit stellt der Part des Querträgers Nr. 5 dar, bei dem eine Aussparung für die Integration des aus Volumenelementen bestehenden Sumodells vorgesehen werden muss.

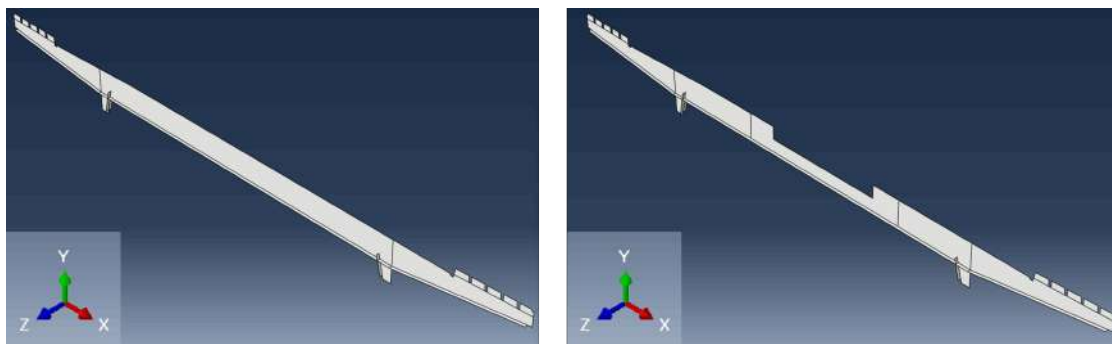


Abbildung 4.5.: Querträgermodell im Regelfall (links) und mit Aussparung (rechts)

In Abbildung 4.6 ist die Vernetzung des Querträgers Nr. 5 dargestellt. Die Meshgröße außerhalb des Einflussbereiches des Submodells liegt bei 100 mm, um mit der Meshgröße des Längsträgers übereinzustimmen. Das Volumenmodell wird mit einer Elementkantenlänge von 7,5 mm modelliert. Um einen Übergang zwischen dem gröberen Netz des Querträgers und dem feineren Netz des Volumenmodells zu ermöglichen, wird in einem Abstand von 700 mm um die Öffnung herum ein Übergang mit einer Netzgröße von 50 mm erzeugt.

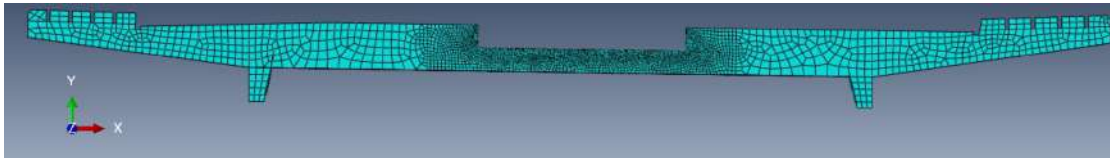


Abbildung 4.6.: Mesh QT5

Längssteifen

Die Längssteifen bilden das Untergerüst der Fahrbahnplatte und sind der direkten Belastung aus dem Fahrzeug ausgesetzt. Infolgedessen ist eine möglichst übereinstimmende Geometrie der Längssteifen mit dem realen Bauteilen von großer Wichtigkeit. Im Grund der Tatsache, dass die Längssteifen bei diesem Bauwerk nicht durchgehend sind, sondern am Querträger eingepasst und an diesem angeschweißt sind, ist die Länge der Steifen von dem Abstand zwischen den Querträgern abhängig. In dem Modell liegen daher mehrere Parts vor, welche den gleichen Querschnitt (x-y-Achse in Abbildung 4.7) haben, jedoch unterschiedlich tief extrudiert sind. Die Breite eines Trapezes beträgt 300 mm. Der Abstand der Steifen untereinander beträgt 600 mm. Durch die Fahrbahnneigung sind die Steifen leicht zur Seite gedreht, sodass die Stege gleich lang sind und die Unterseite der Steife parallel zur Fahrbahnplatte ausgerichtet ist.

In dem Schalenmodell gibt die Systemlinie der Steife die Geometrie vor, welche der Mittellinie zwischen Außen- und Innenseite entspricht. Die Blechdicke von 6 mm ist als Flächenattribut im Schalenmodell zugewiesen. In Abaqus können verschiedene Optionen zur Definition eines Shell Offsets angegeben werden. Hierbei ist die Option „Middle Surface“ angegeben, damit die Abmessung der Trapezsteife beibehalten wird. Bei Volumenmodellen muss die Dicke nicht eigens zugewiesen werden, da diese implizit durch die Geometrie des Körpers vorgegeben wird.

Bei der Anordnung der Elemente wird unterschieden zwischen normalen Längssteifen, die unabhängig vom Submodell sind, und Steifen, die mit dem Volumenmodell verbunden sind. In Abbildung 4.8 ist das Netz für eine Steife dargestellt, die einen Übergang

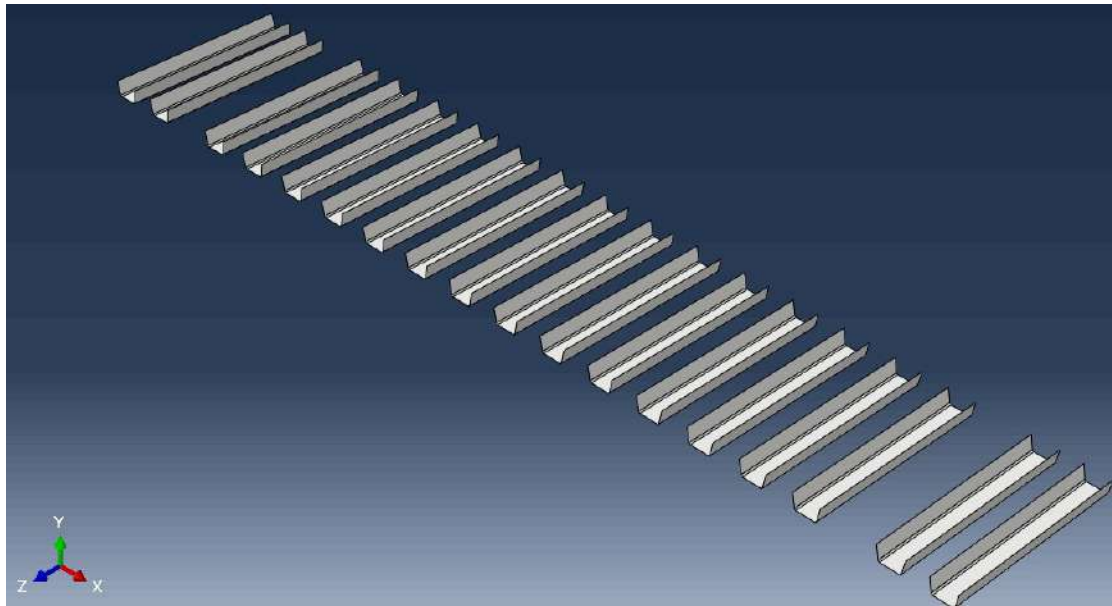


Abbildung 4.7.: Trapezförmige Längssteifen in isoparametrischer Ansicht

zwischen der Netzgröße des Volumenmodells und der üblichen Elementgröße der Steifen aufweist. Allgemein wird für die Längssteifen die gewählte Meshgröße aufgrund der Geometrie des Bogens begrenzt. Bei größerer Elementkantenlänge, wird der Bogen sehr stark approximiert, da dieser mit weniger Elementen gebildet wird. Da die Elementgröße über die gesamte Steife konstant ist, erhöht sich die Anzahl der Elemente, wenn die Elementgröße innerhalb des Bogens kleiner wird und damit eine bessere Approximation erreicht wird. Da im Modell viele Steifen verwendet werden, muss ein Kompromiss zwischen ausreichender Genauigkeit des Bogens und der Anzahl der Gesamtelemente gefunden werden. Um außerdem ein Kantenlängenverhältnis kleiner als 3 einhalten zu können, wird als Netzgröße 50 mm gewählt.

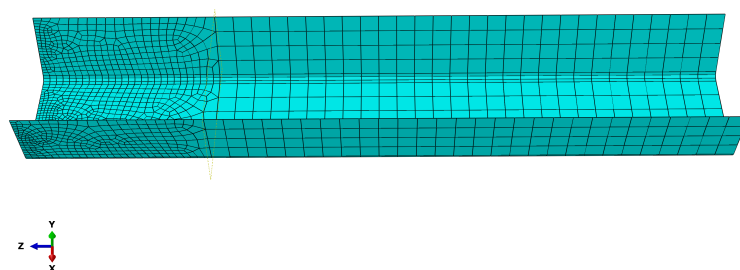


Abbildung 4.8.: Finite Elemente pro Längssteife

4.1.2. Material

Aus den Bestandsunterlagen geht hervor, dass beim Bau der Brücke als Material ein Stahl der Sorte S52 verwendet wurde, was heute einer Stahlgüte von S355 entspricht. Für alle Bauteile des Modells wird dieses Material verwendet, wobei in Abaqus nur der elastische Teil mit einem E-Modul von $210\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ angegeben ist und somit die Streckgrenze von $355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ vernachlässigt wird. Es benötigt keine Angabe der Dichte des Materials, denn in der Berechnung wird das Eigengewicht nicht berücksichtigt.

Im Prinzip müsste auf der Fahrbahn eine Deckschicht aus Gussasphalt und verschiedenen Zwischenschichten modelliert werden. Im FE-Modell wird jedoch darauf verzichtet und die Last direkt auf die Stahloberfläche der Deckschicht aufgebracht, da die Materialparameter des Asphalts und der Aufbau der Deckschicht vor Ort nicht bekannt sind. Darüber hinaus weist Asphalt temperaturabhängige Materialparameter auf, sodass die Ergebnisse für verschiedene Jahreszeiten betrachtet werden müssten. In dieser Arbeit wird das Modell temperaturunabhängig simuliert und der Einfluss daher vernachlässigt.

Bei den Simulationsergebnissen ist zu beachten, dass durch die direkte Lasteinleitung in die Deckplatte keine horizontale Verteilung der Radlasten über den Asphalt erfolgt. Diese Vorgehensweise ist zulässig, da ohne horizontale Querverteilung der Lasten die Spannungen zentrierter in den Unterbau eingeleitet werden und somit die Spannungen in der Schweißnaht größer sind und es sich somit um eine konservative Betrachtung handelt.

4.1.3. Verbindung der Bauteile im zusammengesetzten Modell

Nachdem im Assembly Modus alle Bauteilen an die entsprechende Anfangsposition platziert sind, müssen im nächsten Schritt die Bauteile miteinander verbunden werden. In Abaqus werden dazu die notwendigen Bedingungen (engl. „constraints“) eingefügt. Einen groben Überblick über die im Modell zu verbindenden Elemente gibt folgende Liste:

- Deckplatte an Untergerüst (Längssteifen, Querträgeroberkante)
- Längssteifen an Querträger
- Querträger an Längsträger

Des Weiteren müssen Verbindungen definiert werden, um das Schalenmodell mit dem Volumenmodell zu verknüpfen, auf welche an dieser Stelle nicht eingegangen wird (siehe Abschnitt 4.2).

Um in der Software zwei Flächen oder Kanten zu verbinden, müssen zunächst eine Haupt- („Master“) und eine Nebenfläche („Slave“) oder -Kante definiert werden. Diese werden über eine Bedingung (Constraint) miteinander verknüpft, bei der die Rotationsfreiheitsgrade standardmäßig berücksichtigt werden.

In Abaqus stehen verschiedene Arten von Verbindungsmöglichkeiten zu Verfügung, welche für unterschiedliche Bedingungen verwendet werden. In dieser Arbeit wird ausschließlich die Option „tie constraint“ verwendet. Diese Möglichkeit erlaubt es zwei Bauteile miteinander zu verbinden, bei denen die Vernetzung nicht identisch ist. Das bedeutet, dass die Knoten beider Bauteile nicht an der gleichen Position liegen müssen, was beispielsweise bei einer unterschiedlichen Netzdichte der Fall ist. Bei der Berechnung führt Abaqus automatisch eine Netzverfeinerung an der Kontaktstelle durch, unter der Voraussetzung, dass die Bauteile sich exakt berühren und keine Lücke aufweisen [17].

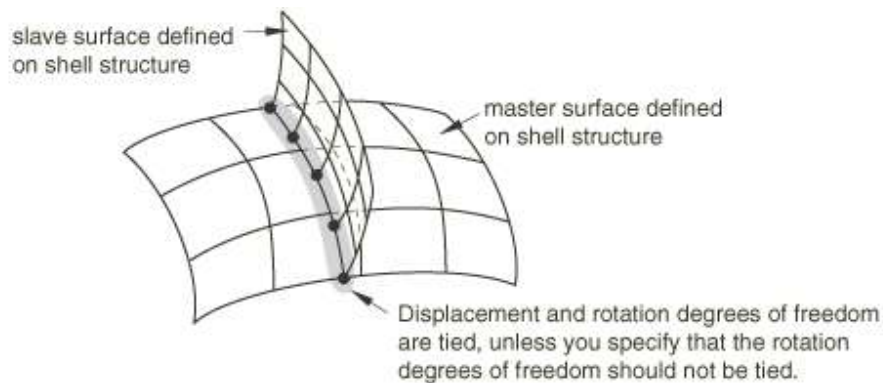


Abbildung 4.9.: „Tie constraint“ zum Ausgleich der Netzfeinheit [17]

Im Allgemeinen gilt, dass die Netzdichte des Slave-Elements eine höhere Netzdichte als das Master-Element aufweisen sollte. Falls dies nicht der Fall ist, können die Ergebnisse Ungenauigkeiten aufweisen und der Rechenvorgang benötigt mehr Zeit und Speicher.

4.2. Submodell

Mit der Submodell-Technik kann in Abaqus ein Teilbereich eines Gesamtmodells als separates Modell erneut berechnet werden. Der Vorteil liegt darin, dass eine höhere

Genauigkeit erreicht wird, da für dieses Modell eine größere Anzahl von Netzelementen verwendet werden kann. Ebenfalls können zusätzliche Details wie beispielsweise Schweißnähte abgebildet werden, welche im Globalmodell eine untergeordnete Rolle spielen und den Modellierungsaufwand verzichtbar erhöhen würden. Dabei sollte die Geometrie des Submodells mit dem Globalmodells grundsätzlich übereinstimmen und nicht wesentlich verändert werden.

Die Vorgehensweise um ein Submodell zu erstellen kann in mehreren Schritten unterteilt werden. Das Ergebnis ist ein Ausschnitt aus dem Gesamtmodell, der aus Volumenelementen besteht. Die Lage des Submodell im Raum muss mit der Lage des Gesamtmodells übereinstimmen, damit die Schnittgrößen koordinatenabhängig auf das Teilmodell übertragen werden können. Die Schnittgrößen werden an den Rändern des Submodells im Globalmodell berechnet und für die Simulation des Submodells übertragen. Dazu werden die Volumenelemente des Gesamtmodells an den Stellen geschnitten, an denen das Submodell in der separaten Datei angrenzen soll. Dies hat zur Folge, dass auch das Netz an dieser Schnittkante getrennt wird und somit Elementknoten vorhanden sind, für die die Verformungen berechnet werden. Um die gleiche Position zu gewährleisten, wird das Gesamtmodell kopiert und alle Komponenten, die nicht zum Submodell gehören, werden gelöscht. Als Ergebnis bleibt das Submodell mit der gleichen Geometrie und Position wie im Gesamtmodell. Anschließend können weitere Maßnahmen wie die Erhöhung der Netzfeinheit oder die Modellierung von Schweißnähten durchgeführt werden, um die Genauigkeit der Ergebnisse zu erhöhen.

In dieser Arbeit wird für den Bereich der Messsensoren ein Submodell erstellt, um die Netzgröße so weit zu reduzieren, dass die Ergebnisse bis auf wenige Millimeter genau berechnet werden. Andernfalls sind bei einer zu weiten Meshgröße nicht genügend Stützstellen (Knoten) vorhanden, um Detailabschnitte abbilden zu können. Dies führt zu Ungenauigkeiten bei der Interpolation der Ergebnisse. Die Dehnungsmessstreifen an der Brücke sind sowohl unter dem Fahrbahndeckblech, als auch an dem Querträger montiert. In dem Submodell wird ein Ausschnitt des Deckbleches, des Querträgers und der Längssteifen modelliert (siehe Abbildung 4.10). Zudem sind die Positionen der Sensoren mit den Bezeichnungen B1 bis B30 dargestellt, an denen in der Auswertung der Simulation die Spannungen entnommen werden. Die Abmessungen ergeben sich aus der Wahl des Abstandes der zu untersuchenden Punkte vom Rand des Submodells.

Für dieses Modell wird in x- und z-Richtung ein Abstand von 50 mm zum Rand gewählt. Nach unten beträgt der Abstand 100 mm. Eine Besonderheit ergibt sich aus der Dicke der Deckplatte. Im Globalmodell wird die äußere Last auf die 12 mm dicke Platte aufgebracht. Damit im Submodell keine äußere Last vorhanden ist, wird die Deckplatte in

der Ebene halbiert, sodass eine Kontaktfläche zum Submodell entsteht. Dies hat zur Folge, dass im Submodell keine zusätzlichen Lasten definiert werden, sondern sich diese aus den Randbedingungen der im Globalmodell berechneten Schnittgrößen ergeben. Daher ist es notwendig, zuerst die Berechnung des Globalmodells durchzuführen, um anschließend das Submodell zu simulieren. In Abbildung 4.10 sind alle Kontaktflächen rot markiert. In Abaqus muss die Anzahl der Freiheitsgrade für die Kontaktflächen definiert werden. Bei Volumenelementen sind dies drei Verschiebungsfreiheitsgrade und keine Rotationsfreiheitsgrade.

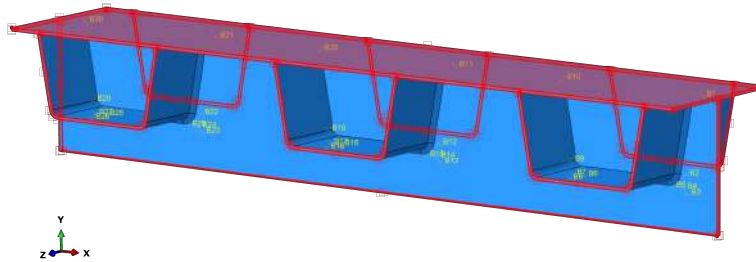


Abbildung 4.10.: Submodell mit markierten Kontaktflächen und Referenzpunkten der DMS-Positionen

Der Vorteil der Submodelltechnik liegt darin, dass das Netz im Submodell unabhängig und damit feiner als im Globalmodell definiert werden kann. Bei der Darstellung von Blechen als Volumenelemente kann die Genauigkeit durch die Anordnung mehrerer Elemente in der Dicke erhöht werden. Die Maschenweite wird im gesamten Submodell mit 2 mm angesetzt. Somit ergeben sich für die Trapezsteife drei, für den Querträgersteg fünf und für die untere Hälfte der Fahrbahnplatte drei Elemente über die Dicke. Aufgrund der relativ großen Abmessungen des Teilmodells (2900 mm, 280 mm, 300 mm in x, y, und z-Richtung) hat das Modell mit 1,3 Millionen sehr viele Netzelemente. Trotz der hohen Elementanzahl beträgt die Rechenzeit ca. 17 Minuten, da bei der Modellierung auf eine relativ kubische Form der Elemente mit einem Kantenlängenverhältnis kleiner als drei geachtet wurde, was die Rechenzeit verkürzt.

Im Bauwerk sind für den Bereich des Submodells drei Bauteilverbindungen durch Schweißnähte vorhanden, die in der folgenden Liste aufgeführt sind.

- Deckblech/Querträger
- Querträger/Längssteifen
- Längssteife/Deckblech

Um die an den Sensorpositionen vorhandenen Spannungen auf die ermüdungskritischen Schweißnähte zu extrapolieren und den Kerbfaktor zu reduzieren, müssen die

Schweißnähte in das Teilmodell einbezogen werden. Wird die Schweißnaht vernachlässigt, führt dies aufgrund der harten Kerbe zu unrealistisch hohen Werten und damit zu verfälschten Ergebnissen. Da für die Ermüdungsberechnung lediglich die Schweißnaht der Trapezsteife an den Querträger maßgebend ist, wird ausschließlich diese Schweißnaht modelliert. Die Schweißnahtdicke ist aus den Bestandsunterlagen nicht ersichtlich. Im Modell wird von einer Schweißnahtlänge von 10 mm ausgegangen, da diese bei Begehungen visuell ermittelt wurde.

4.3. FE Ergebnisanalyse

In diesem Kapitel werden die Spannungen aus der Finite-Elemente-Simulation insbesondere an den Sensorpositionen an der Brücke untersucht. Der Grundgedanke der FE-Modellierung ist eine Verknüpfung der berechneten Spannungen aus der Simulation mit den Messdaten des realen Bauwerks. Die Ergebnisse sollen für die folgenden **Ziele** genutzt werden und die Messdatenauswertung ergänzen:

1. Positionsbestimmung des Fahrzeuges / der Räder
2. Gewichtsbestimmung des überfahrenden Fahrzeuges

In den folgenden Abschnitten werden die Zielsetzungen näher beschrieben und mathematische Modelle entwickelt, die auf die Messdaten angewendet werden können. Eine zentrale Fragestellung, die sich durch die gesamte Analyse zieht, ist die Rekonstruktion der Belastungssituation eines Fahrzeugevents. Die folgenden Variablen eines erfassten Fahrzeugevents sind unbekannt und beeinflussen die Ergebnisse der FE-Berechnung.

- Fahrzeugart / Achslast
- Anzahl Räder (in Quer- und Längsrichtung)
 - in Querrichtung (Zwillingsräder)
 - in Längsrichtung (Doppel-/ Tridemachse)
- Radstand (Abstand in Längsrichtung)
- Spurweite (Abstand in Querrichtung)

4.3.1. Vergleich unterschiedlicher Lastfallsituationen

Es wird davon ausgegangen, dass zur Erreichung der Ziele nicht alle in Abschnitt 4.3 aufgeführten Variablen berücksichtigt werden müssen. Daher ist es notwendig, ver-

schiedene Belastungssituationen miteinander zu vergleichen, um durch geeignete Annahmen die Variabilität der Ergebnisse zu reduzieren.

Einen Anhaltspunkt für die Radabstände und Spurweiten gibt das ELM (Ermüdungslastmodell) 3 aus [18]. Zur Reduzierung der Anzahl der Räder, die von Fahrzeug zu Fahrzeug unterschiedlich sein kann, ist zu prüfen, ob die Betrachtung eines einzelnen Rades ausreichend ist. Damit die Simulation mit einem Rad als hinreichend genau angesehen werden kann, muss ausgeschlossen werden, dass sich mehrere Räder in Quer- oder Längsrichtung gegenseitig beeinflussen und die Beanspruchungen an den zu untersuchenden Sensorpositionen verändern. Insgesamt werden zwei Situationen miteinander verglichen.

Lastfall 1 (LF1) wird verwendet, um die Interferenz zwischen der Last von zwei Rädern einer Achse zu überprüfen. Der Abstand wird nach ELM 3 mit 2 m quer zur Fahrtrichtung gewählt. Dazu wird die Resultierende des 1. Rades (in Abbildung 4.11 links) genau auf den Steg der Längssteife bei DMS Nr. 1 ausgerichtet. Das andere Rad wird mit dem oben angegebenen Abstand weiter rechts positioniert. Da der Abstand größer ist als die erfasste Breite des Messsystems, steht das rechte Rad auf einer Längssteife, die nicht mit Dehnungsmessstreifen ausgerüstet ist. Die Radaufstandsfläche nach ELM 3 beträgt $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$. Die Resultierende in Brückenlängsrichtung wirkt oberhalb der Querträgerachse, da davon ausgegangen wird, dass dann die Interaktion der Lasten Querträgersteg maßgebend ist.

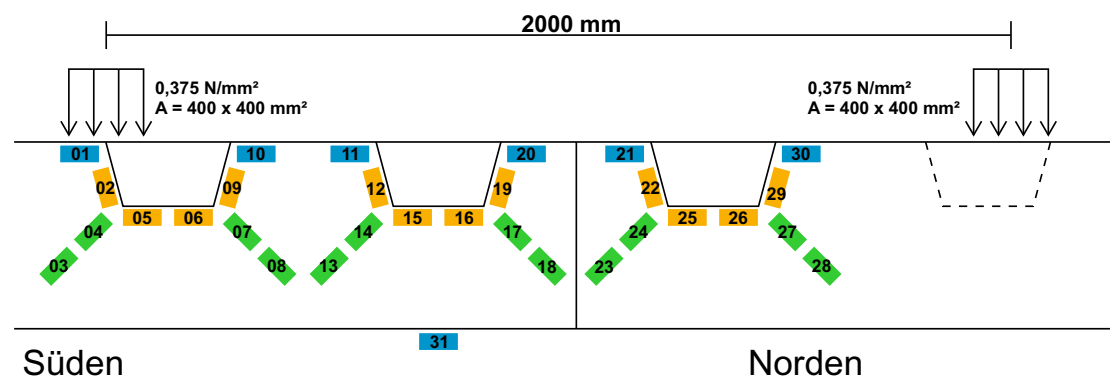


Abbildung 4.11.: LF1: 2 Räder einer Achse in Querrichtung

Zusätzlich werden die Ergebnisse mit der Anordnung eines Rades verglichen, um den Einfluss mehrerer Räder auf die Ergebnisse zu untersuchen und ggf. mögliche Interferenzen zwischen den Rädern auszuschließen zu können. Dazu wird **Lastfall 2 (LF2)** als Referenz verwendet (siehe Abbildung 4.12). Die Belastung entspricht nur der Platzierung des linken Rades aus Lastfall 1.

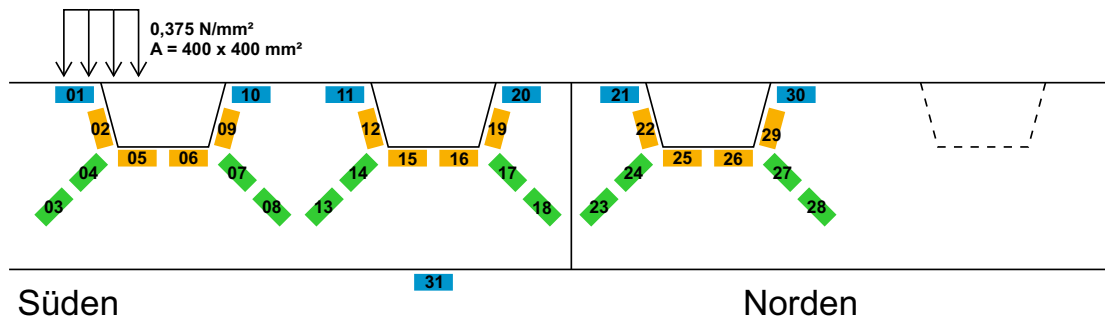


Abbildung 4.12.: LF2: 1 Rad auf Steg der Längssteife

Tabelle 4.1.: Vergleich LF1 und LF2 an ausgewählten Sensoren

DMS	LF1 [$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$]	LF2 [$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$]	Abw. LF1 zu LF2 [%]
1	-12,17	-10,65	14
2	-10,50	-11,36	-8
3	-5,30	-4,85	9
4	-5,81	-5,74	1
5	8,10	5,57	-45
7	1,48	-3,29	-145
8	1,24	-3,31	-137
13	6,08	6,52	-7
14	6,85	6,87	0

Zum Vergleich der Ergebnisse der oben beschriebenen Lastfälle werden in Tabelle 4.1 die Spannungen an den Dehnungsmessstreifen unter dem linken Rad dargestellt. Zusätzlich sind die Spannungen an den grünen DMS 7, 8, 13 und 14 aufgelistet, um einen Vergleich der Spannungen in verschiedenen Orientierungen zu ermöglichen. In der letzten Spalte ist die prozentuale Abweichung der Spannung von LF1 zu LF2 angegeben. Es ist zu beachten, dass es sich um die in DMS-Richtung transformierten Spannungen handelt. Im Folgenden wird untersucht, ob die Spannungen durch das rechte Rad beeinflusst werden.

Zunächst werden die Spannungen am Querträger verglichen. Die Spannungen der grünen DMS 3 und 4 zeigen für den Lastfall 1 Spannungen von $-5,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ und $-5,81 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$. Für Lastfall 2 werden Spannungen von $-4,85 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ und $-5,74 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ erreicht. Für DMS Nr. 4 ergibt sich eine geringe prozentuale Abweichung von 1 %. Die Spannungsdifferenz für DMS Nr. 3 beträgt 9 %.

Die Spannungsabweichungen der DMS 7 und 8 sind mit -145% und -137% zwischen den Lastfällen sehr hoch. Bei den DMS 13 und 14, die die gleiche Richtung wie die DMS 3 und 4 aufweisen, liegt die Abweichung wiederum bei -7% und 0% . Werden die

Ergebnisse mit den anderen grünen DMS (nicht in Tabelle aufgeführt) verglichen, so stellt sich das Muster heraus, dass die grünen DMS mit der gleichen Orientierung wie DMS 3 und 4 eine sehr gute Übereinstimmung für beide Lastfälle zeigen. Die grünen DMS (z.B.: 13 und 14), die eine andere Richtung aufweisen als die DMS, die direkt unter der Last angeordnet sind, zeigen keine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der beiden Lastfälle.

Durch die Belastung entsteht im unteren Bereich des Querträgers eine Zugzone. Je größer die Belastung, desto größer ist die Spannung am unteren Flansch des Querträgers. Die grünen DMS, die näher an der Trapezsteife liegen (DMS Nr.: 4, 7 und 14), zeichnen sich durch eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den beiden Lastfällen mit 0 % und 1 % aus. Im Gegensatz dazu liegen die äußeren DMS weiter in der Zugzone und werden daher stärker durch eine zweite Last beeinflusst. Für die Anwendung des Strukturspannungskonzeptes zur Berechnung der Spannungen an der Schweißnaht kann daher bei Belastung mit einem Rad die Abweichung der äußeren DMS auf die Schweißnaht übertragen werden. Eine quantitative Aussage ist jedoch nur unter Berücksichtigung beider Achsen möglich.

Im Folgenden werden die Dehnungen der Dehnungsmessstreifen auf dem Deckblech qualitativ untersucht und die Anwendbarkeit der Belastung mit einem Rad anstelle von zwei Rädern auf die Messdaten geprüft. Das Diagramm in Abbildung 4.13 zeigt die Verteilung der DMS-Spannungen am Deckblech im Vergleich der Lastfälle 1 und 2.

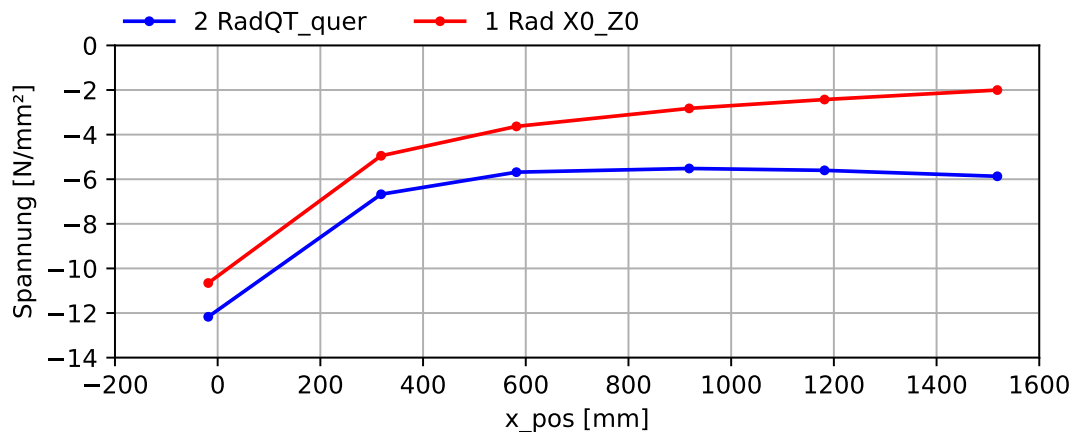


Abbildung 4.13.: Vergleich der Querverteilung am Deckblech für LF1 und LF2

Die x-Achse stellt den Abstand in Querrichtung dar. Als Ursprung $x = 0$ ist der linke Steg der linken Längssteife definiert. Daher ergibt sich für den DMS Nr. 1 ein Abstand vom Nullpunkt von $-18,32$ mm, während der äußerste rechte DMS Nr. 30 $1518,35$ mm vom

linken Steg entfernt ist. Die rote Kurve zeigt die Messwerte der Dehnungsmessstreifen am Deckblech für LF2, wenn sich ein Rad an der Position $x = 0$ befindet. Dagegen zeigt die blaue Kurve die Spannungen des LF1, wenn beide Räder einer Achse in einer Spurweite von 2 m angeordnet sind.

Es ist deutlich zu erkennen, dass der DMS direkt unterhalb des linken Rades wesentlich höher als der anderen DMS belastet ist. Für LF2 nimmt die Spannung am Deckblech mit zunehmender Entfernung zum Lasteinleitungspunkt ab und nähert sich der Spannung $0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ an. Die Kurve ähnelt einer quadratischen Funktion mit dem Maximum bei dem DMS, welcher der Radlast am nächsten liegt. Für LF1 ist ebenfalls die maximale Belastung an der Position des DMS Nr. 1. Die Spannungen am Deckblech nehmen mit steigender Entfernung zunächst ab. Aufgrund der Anordnung des rechten Rades bei $x = 2000$ fällt die Kurve nicht auf $0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$, sondern steigt ab der Mitte zwischen den Rädern wieder an. Aufgrund der Tatsache, dass die Spurweite größer als die durch das Messsystem erfassten Breite ist, wird die maximale Auslastung durch das rechte Rad nicht erfasst. Auch für die Belastungen aus LF2 ergibt sich eine charakteristische Kurve mit einem Hochpunkt, aus welchem die Position des linken Rades geschlossen werden kann.

Der quantitative Vergleich der Belastung der Lastfälle im Maximalpunkt zeigt, wie in Tabelle 4.1 angegeben, für LF1 eine Spannung von $-12,17 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ und für LF2 $-10,65 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$. Dies entspricht einer Abweichung von 14 %. Daraus ist zu schließen, dass der DMS Nr. 1 auch durch die Last des zusätzlichen Rades des LF2 belastet wird.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass beim Vergleich der Lastfälle mit einem Rad und zwei Rädern der gleichen Achse die Messwerte der direkt unterhalb der Last angeordneten DMS ausreichend genau wiedergegeben werden. Die Dehnungsmessstreifen, die näher an der Längssteife (innerer DMS) und in der gleichen Richtung wie der DMS direkt unter der Last angeordnet sind, zeigen annähernd gleiche Messwerte. Große Abweichungen zwischen den Lastfällen zeigen die DMS, die die Spannungen an der anderen Ecke des Trapezprofils erfassen und somit eine andere Spannungsrichtung aufweisen. Es ist daher davon auszugehen, dass eine quantitative Betrachtung der Ergebnisse unter Annahme eines Rades (LF2) für die DMS am Querträger nicht möglich ist. Da für die weiteren Untersuchungen davon ausgegangen wird, dass die Beanspruchungen unter dem Rad wesentlich höher sind, wird die Wechselwirkung der Radlasten mit einem Abstand von 2 m in Querrichtung als nicht signifikant betrachtet. Darüber hinaus werden für die Ermüdungsbewertung die tatsächlich am Bauwerk auftretenden Spannungen ermittelt, wodurch eine Unabhängigkeit von der Belastungssituation erreicht

wird. Für weitergehende Untersuchungen zum Erreichen des Ziels Nr. 2 muss eine Betrachtung mit mehreren Rädern durchgeführt werden.

Für die Positionsbestimmung (Ziel Nr. 1), bei der die Ergebnisse maßgeblich auf der FE-Simulation aufbauen, kann davon ausgegangen werden, dass die Messwerte der DMS am Deckblech auch bei Anordnung einer Last verwendet werden können, da nur ein qualitativer und kein quantitativer Messwertvergleich erfolgt. Die genaue Positionsbestimmung des Rades erfolgt in Kapitel Unterabschnitt 4.3.3 und 5.3.4.

4.3.2. Bestimmung der ungünstigsten Lastposition in Längsrichtung

Für die Ermittlung der Spannungen an den Sensorpositionen in der FE-Simulation ist die Anordnung einer Last erforderlich. Die Spannungen sind einerseits von der Größe der Last, die vom ELM 3 vorgegeben wird, und andererseits von der Position abhängig. In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Laststellung in Längsrichtung auf die Beanspruchung der Messstellen untersucht. Es soll die ungünstigste Laststellung ermittelt werden, bei der die maximalen Werte eines Sensors bei gleicher Belastung ausgelöst werden. Die Bestimmung der maßgebenden Position ist eine Vorbereitung für die Rekonstruktion der Achslast einer Überfahrt, die mit einer FE-Simulation durchgeführt wird. Weiterhin ist die Hypothese zu untersuchen, dass aufgrund der Geometrie und der unterschiedlichen Positionierung der Sensoren am Querträger und am Deckblech die Maximalwerte für unterschiedliche Laststellungen in Längsrichtung erfasst werden. Der Abstand wird im Rahmen dieser Untersuchung ermittelt.

In Abbildung 4.14 sind die Einflusslinien in Längsrichtung für die DMS Nr. 1 am Deckblech und Nr. 3 und 4 am Querträger dargestellt. Die x-Achse des Diagramms stellt die Position des Rades in Längsrichtung (globale z-Achse) dar. Der Nullpunkt der x-Achse definiert den Übergang des Querträgers und ist im Diagramm durch einen senkrechten Strich gekennzeichnet. Die Ostseite des Querträgers liegt in Fahrtrichtung **vor** dem Querträger und wird durch negative Werte der x-Achse gekennzeichnet. Die Westseite ist durch positive Werte gekennzeichnet und liegt in Fahrtrichtung hinter dem Querträger. Durch abschnittsweises Aufbringen der Last wird ein über die Brücke rollendes Rad simuliert. Im Bereich -1000 mm bis -300 mm vor dem Querträger wird die Last in Schrittweiten von 100 mm und im Bereich -300 mm bis 300 mm in Schrittweiten von 50 mm angeordnet. Es wird angenommen, dass das Rad genau geradeaus rollt. Der Rollweg des Rades ist in Querrichtung auf dem Steg der Längssteifigkeit bei DMS Nr. 1 an-

geordnet (vgl. Unterabschnitt 4.3.3). Auf der y-Achse sind die Spannungen an den DMS in Sensorrichtung („richtungsabhängige Spannung“) in $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ aufgetragen.

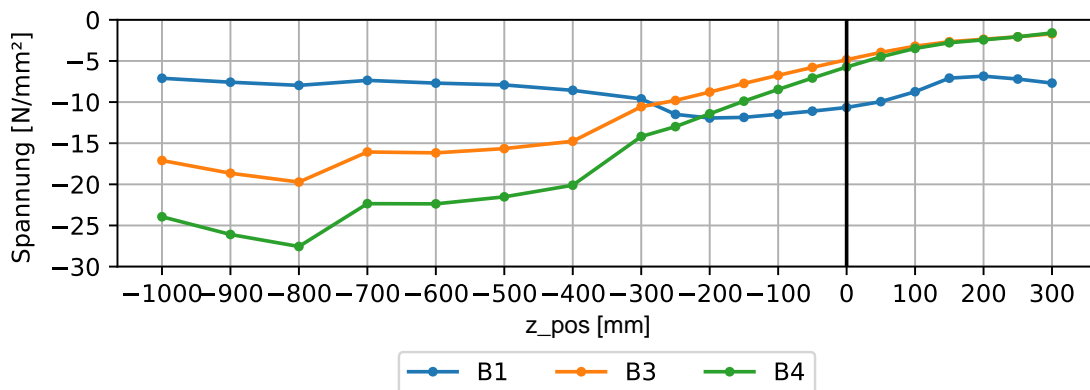


Abbildung 4.14.: Einflusslinien durch Simulation eines rollenden Rades

Es ist zu beachten, dass die Sensoren auf der östlichen Seite des Querträgers montiert sind und somit einer erhöhten Lasteinwirkung ausgesetzt sind. Der Einfluss der Last ist auf beiden Seiten des Querträgers sehr unterschiedlich. Bei Betrachtung der Kurven der DMS Nr. 3 und 4 fällt auf, dass die Werte der Sensoren mit zunehmender Entfernung vom Querträger nach Westen (positive x-Achse) abnehmen und nach einer gewissen Entfernung (im Diagramm nicht dargestellt) Zugspannungen gemessen werden. Die Beanspruchung des Dehnungsmessstreifens am Querträger ist jedoch umso größer, je weiter östlich sich das rollende Rad vor dem Querträger befindet. Die maximale Spannung wird bei einem Abstand von 800 mm ausgelöst. Zum Vergleich ist die Spannung bei DMS Nr. 4 an der Stelle $x = -800$ mit $-27,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ etwa 4-mal höher als bei $x = 0$ mit $-5,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$. Das Spannungsverhältnis für DMS Nr. 3 zwischen $x = 0$ und $x = -800$ beträgt etwa 4,1. Aufgrund der Tatsache, dass die Spannungen am Querträger an der Stelle $x = 0$ für DMS Nr. 4 nur 18,1 % größer als bei DMS Nr. 3 sind und bei $x = -800$ das Verhältnis mit 39,8 % deutlich höher ist, ist davon auszugehen, dass sich der Einfluss in Längsrichtung bei DMS Nr. 4 stärker auswirkt.

Der Dehnungsmessstreifen auf dem Deckblech wird ebenfalls stärker belastet, wenn sich die Last vor dem Querträger befindet und das Rad den Querträger noch nicht überfahren hat. Die höchste Beanspruchung des Dehnungsmessstreifens am Deckblech wird erreicht, wenn sich die Last -200 mm vor dem Querträger befindet. Im Vergleich zu den Dehnungsmessstreifen am Querträger ist die Spannungsdifferenz zwischen dem Maximalpunkt und der Spannung, die auftritt, wenn sich das Rad genau über dem Querträger befindet, kleiner. Die maximale Spannung bei $x = -200$ ist mit $-11,94 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ nur 12 % höher als bei $x = 0$ mit $-10,65 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$. Der Einfluss einer unterschiedlichen Anord-

nung in Längsrichtung ist somit für die Sensoren am Deckblech wesentlich geringer als für die Sensoren am Querträger.

Der horizontale Abstand in Fahrtrichtung der Positionen, an denen die maximalen Spannungen am Deckblech und am Querträger auftreten, beträgt somit 600 mm. Daraus ergeben sich unterschiedliche Zeitpunkte der Hochpunkte in den aufgezeichneten Messergebnissen. Bei einer angenommenen Fahrzeuggeschwindigkeit von $90 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ beträgt die Zeitdifferenz 0,024 s und somit bei einer Messauflösung von 100 Hz 2,4 Indizes.

Generell kann die Ursache der Spannungserhöhung mit zunehmendem Abstand der Last vom Querträger durch zwei Ansätze erklärt werden. Zum einen kann die mit den Querträgern verbundene Längssteife durch einen eingespannten Einfeldträger als statisches System abgebildet werden. Daher ist die Hebelwirkung der Spannung größer, wenn die Last bei $x = -800$ angeordnet ist. Die Belastung wird als Zugspannung über den Flansch der Längssteife auf den Querträger übertragen und von den Dehnungsmessstreifen am Querträger gemessen. Zum anderen zeigt sich bei der orthotropen Fahrbahnplatte mit eingeschweißten Längssteifen das Phänomen, dass je näher die Last oberhalb des Querträgers liegt, die Last von diesem aufgenommen wird und nicht über die Längssteifen abgeleitet wird. Durch die Lastabtragung über den Querträger werden die Kräfte in der Längssteife und damit auch die resultierenden Spannungen an den Positionen der Dehnungsmessstreifen auf dem Querträger reduziert.

Als wesentliche Erkenntnis aus der Auswertung der Einflusslinien in Längsrichtung kann festgehalten werden, dass bei der Bestimmung der Achslast einer Überfahrt durch Vergleich der Messwerte mit den Ergebnissen aus dem FE-Modell neben der Kenntnis in Querrichtung auch die Position in Längsrichtung bekannt sein muss. Wenn quantitative Werte aus Messungen mit FE-Ergebnissen kombiniert werden, sollte die Last an verschiedenen Positionen für Dehnungsmessstreifen auf dem Querträger oder dem Deckblech positioniert werden. Weitere Parameter, wie z. B. eine unterschiedliche Anzahl an Rädern in Längs- und Querrichtung, können in weiteren Untersuchungen einbezogen werden.

4.3.3. Einflusslinie der Last in Querrichtung

In diesem Abschnitt wird die Vorbereitung zu Bestimmung der Position der Fahrzeuge (siehe Unterabschnitt 5.3.4) getroffen. Es werden Einflusslinien verschiedener Laststellungen in Querrichtung eines Rades berechnet, um die simulierten Ergebnisse mit den Messdaten am Bauwerk korrelieren zu können.

Die Querverteilung ist für die nachträgliche Rückverfolgung eines Events notwendig, um die unbekannte Laststellung der Räder rekonstruieren zu können. Darüber hinaus soll untersucht werden, ob die Anzahl der Fahrzeuge um einen statistischen Anteil abgemindert werden kann, welche die maßgebenden Schweißnähte nicht befahren. Dabei wird die Kenntnis der Position des Fahrzeugs, insbesondere in Querrichtung, zur Erstellung einer Häufigkeitsverteilung genutzt.

Die Erstellung der Querverteilung orientiert sich an der in Unterabschnitt 4.3.1 beschriebenen Vorgehensweise und hat zum Ziel, die Einflusskurve aus Abbildung 4.13 für mehrere Laststellungen zu generieren. Für die Simulation wird ein Rad zwischen $x = 0$ und $x = 1600$ in 200 mm-Schritten in getrennten Simulationen platziert und jeweils die gerichteten Spannungen (S_{xx}) der Sensoren am Deckblech extrahiert. Die maximale Auslastung für den Sensor am Deckblech wird ausgelöst, wenn sich das Rad 200 mm **vor** dem Steg des Querträgers befindet (vgl. Unterabschnitt 4.3.2). Daher wird für die Resultierende der Flächenbelastung die Position in Längsrichtung mit $z = -200$ mm gewählt.

Abbildung 4.15 zeigt die Querverteilungen für die Lastsituationen an den gegebenen Positionen und stellt eine Erweiterung der Abbildung 4.13 dar. Die x-Achse entspricht dem Abstand zum fiktiven Nullpunkt in Querrichtung, welcher an der Position des linken Steges der linken Längssteife aus dem Messkonzept liegt. Beispielsweise zeigt die blaue Linie die Spannungen der Deckblech DMS, wenn die Lastresultierende bei $x = 0$, also genau über dem Steg der Längssteife wirkt. Hingegen bildet die y-Achse die berechneten Spannungen in $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ ab. Die Spannungen auf der y-Achse stammen aus dem Gesamtmodell, da die Abbildung zur Erläuterung des Verfahrens dient und die Werte dafür von untergeordneter Bedeutung sind. Lediglich die Verhältnisse der Spannungen untereinander sind relevant. Für die Positionsbestimmung aus den Messdaten mit dem Auswertungstool werden die FE-Spannungen des feiner vernetzten Submodells verwendet. Die vertikalen roten Linien markieren die Positionen der Dehnungsmessstreifen am Deckblech.

Aus dem Diagramm geht hervor, dass je deutlicher der Maximalpunkt der Kurve ist, desto näher liegt die Last über dem DMS. Die rosa Kurve zeigt dies deutlich. Die Last befindet sich an der Position $x = 1200$ und der DMS Nr. 21 daher in unmittelbarer Nähe bei $x = 1181,82$ mm. Der DMS ist mit $-13,36 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ stärker belastet als die anderen DMS. DMS 20 weist nur eine Spannung von $-7,49 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ auf und ist damit etwa halb so groß wie das Maximum.

Eine Laststellung, bei der das Maximum nicht eindeutig identifizierbar ist, wird durch

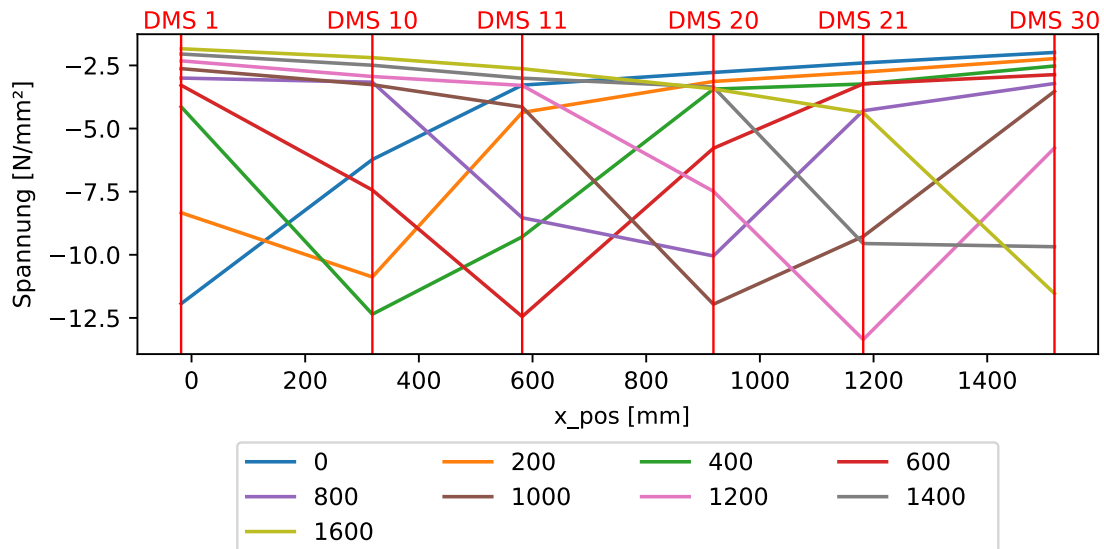


Abbildung 4.15.: Einflusslinien der Querverteilung am Deckblech

die violette Kurve dargestellt. In diesem Beispiel ist die Last bei $x = 800$ positioniert und befindet sich somit ungefähr zwischen zwei DMS. Die DMS 11 und 20 befinden sich an den Positionen $x = 581,75$ mm bzw. $x = 918,28$ mm. Die Abstände zwischen den Lasteinleitungspunkten und den Sensoren betragen somit $218,25$ mm für DMS 11 und $118,28$ mm für DMS 20. Es zeigt sich, dass das Maximum nicht eindeutig identifizierbar ist und sowohl DMS 11 als auch DMS 20 mit $-8,53 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ und $-10,05 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ eine vergleichsweise hohe Spannung aufweisen. Die Spannungen an den übrigen Positionen der Kurve liegen im Mittel bei $-3,42 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ und damit prozentual deutlich niedriger.

Anhand der Einflusslinien wird eine Beziehung zwischen dem Lasteinleitungspunkt, den berechneten Spannungen und den DMS-Positionen hergestellt. Für die Rückrechnung des Lasteinleitungspunktes ist die Kenntnis der Spannungshöhe aus den Messdaten des realen Bauwerks einer Überfahrt sowie der DMS-Positionen ausreichend. Die Vorgehensweise wird in Unterabschnitt 5.3.4 erläutert und am Beispiel einer Überfahrt veranschaulicht. Eine genauere Positionsbestimmung ist möglich, wenn der Abstand zwischen den Laststellungen verringert wird und somit mehr Einflusslinien berechnet werden.

4.3.4. Identifizierung des Rissursprungs auf Basis einer FE-Simulation

Da für die Ermüdungsbewertung und Schadensanalyse die Kenntnis der Rissentstehung von Bedeutung ist, können mit Hilfe des FE-Modells die kritischen Stellen identifiziert

werden. Aus der Bestandsanalyse geht hervor, dass die Schweißnähte im abgerundeten Eckbereich der Längstrapezsteife sehr ermüdungsanfällig sind und insbesondere dort am Bauwerk Risse auftreten. (vgl. Abbildung 3.3a in Abschnitt 3.2)

Aus der visuellen Betrachtung des Risses ist nicht ersichtlich, wo sich der Rissursprung befindet. Für die analytische Untersuchung ist die Darstellung der von-Mises-Spannungen am besten geeignet, um die hochbeanspruchten Stellen zu lokalisieren, die auf die Rissentstehung hindeuten.

In Abbildung 4.16 ist das Schweißnahtdetail dargestellt und in Tabelle 4.2 sind drei maßgebende Punkte aufgeführt, an denen die Mises-Spannung ermittelt wird.

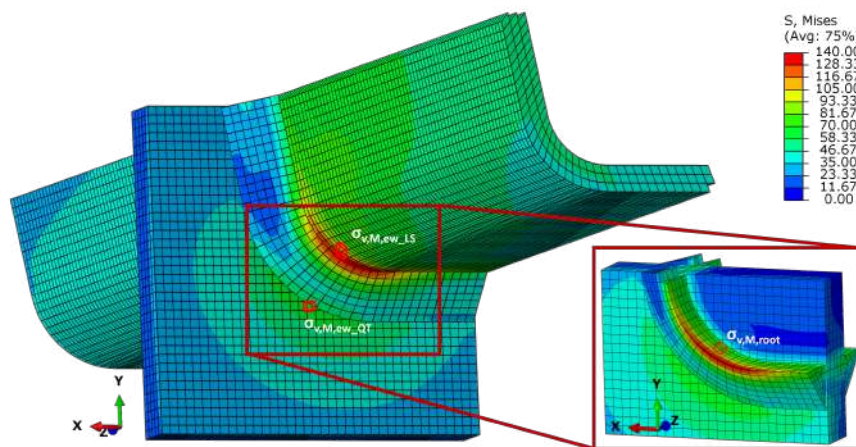


Abbildung 4.16.: Grafische Darstellung der von-Mises-Spannungen im Schweißnahtdetail

Die Abbildung zeigt einen Ausschnitt der Trapezsteife unter Belastung eines Rades auf dem linken Steg und 800 mm vor dem Querträger, sodass die Spannungen im Eckbereich der Steife maximal sind. Zu beachten ist, dass in der rechten Abbildung die Ansicht nach rechts gedreht und die Längssteife ausgeblendet ist, sodass die Schweißnahtwurzel sichtbar wird.

Als ermüdungskritische Stellen sind drei Punkte markiert, für die die Spannungen zu untersuchen sind. Zum einen der Schweißnahtübergang zum Querträger σ_{v,M,ew_QT} , der in der Ermüdungsberechnung des Auswertetools betrachtet wird und auf den die Strukturspannungen extrapoliert werden. Als zweiter Punkt wird die Ermittlung der Spannung σ_{v,M,ew_LS} am Übergang von der Schweißnaht zur Längssteife gewählt, da an dieser Stelle die höchste Beanspruchung auftritt. Die Spannung $\sigma_{v,M,root}$ in der Schweißnahtwurzel, die aus ermüdungskritischer Sicht ebenfalls einen Rissursprung darstellen könnte, wird an der dritten Position ermittelt.

Tabelle 4.2.: Von-Mises-Spannungswerte im Schweißnahtdetail an ausgewählten FE-Elementen

Position	Spannung [$\frac{N}{mm^2}$]
σ_{v,M,ew_QT}	72,34
σ_{v,M,ew_LS}	145,19
$\sigma_{v,M,root}$	81,36

Die Spannungen sind zu vergleichen, um den Rissursprung für die Schweißnaht unter der Annahme zu bestimmen, dass der Riss an der am stärksten beanspruchten Stelle beginnt. Es ist zu beachten, dass die Spannungsgröße von der Belastungssituation und der Belastungshöhe abhängen und nicht verallgemeinert werden können. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Spannungsverhältnisse eine hinreichend genaue qualitative Aussage darüber liefern, an welcher Stelle mit einer vorzeitigen Rissbildung zu rechnen ist. Die Ergebnisse sind zudem mit den am Bauwerk auftretenden Schäden zu vergleichen.

In Tabelle 4.2 sind die Mises-Spannungen der in der Abbildung 4.16 gezeigten Punkte aufgeführt. Die Vergleichsspannung nach von Mises liegt im Hotspot des Schweißnahtübergangs zum Querträger bei $72,34 \frac{N}{mm^2}$. In der Schweißnahtwurzel ist die Spannung 12,5 % höher bei $81,36 \frac{N}{mm^2}$. Am Übergang der Schweißnaht zur Längssteife treten mit $145,19 \frac{N}{mm^2}$ die mit Abstand höchsten Spannungen auf, die doppelt so hoch sind wie an den anderen Positionen.

Die äußerlich sichtbaren Schäden befinden sich sowohl am Übergang der Schweißnaht zum Querträger als auch am Übergang zur Längssteife und stimmen mit den höchsten Spannungen aus der FE-Simulation überein. Die hohen Spannungen am Übergang zur Längssteife deuten darauf hin, dass sich an dieser Stelle vorzeitig Risse bilden und dass diese Stelle für das Ermüdungsversagen maßgebend ist. Aufgrund der höheren Spannungen in der Schweißnahtwurzel im Vergleich zum Übergang zum Querträger ist davon auszugehen, dass der Rissursprung in der Schweißnahtwurzel liegt und der Riss von innen nach außen wächst. Das bedeutet, dass bei einem von außen sichtbaren Schaden der Zeitpunkt der Rissentstehung bereits früher stattgefunden hat.

Daher ist das Messkonzept nicht optimal für die zeitliche Eingrenzung der Rissentstehung ausgelegt. Zudem liegt der Schwerpunkt auf der Erfassung der Spannungen σ_{v,M,ew_QT} im Bereich des Hotspot am Übergang der Schweißnaht zum Querträger. Eine Erweiterung des Messkonzeptes ist anzustreben, um die Spannungen σ_{v,M,ew_LS}

ebenfalls am Übergang zur Längssteife zu erfassen. Die Anwendbarkeit des Strukturspannungskonzeptes an dieser Stelle könnte sich als schwieriger erweisen, da die grafische Darstellung der Mises-Spannung keine eindeutige Abnahme der Spannung in der Längssteife mit zunehmendem Abstand von der Schweißnaht zeigt. Die Möglichkeit der Extrapolation der Spannungen am Schweißnahtübergang zur Längssteife ist anhand der richtungsabhängigen Spannungen im lokalen Koordinatensystem des DMS zu überprüfen.

Es ist zu beachten, dass die Spannungswerte nicht mit den von den Dehnungsmessstreifen ermittelten Spannungen verglichen werden können, da hierfür eine Transformation in die Messrichtung des Sensors erforderlich ist, wie unter Unterabschnitt 4.3.5 erläutert.

4.3.5. Vergleich der Struktur- und Kerbspannung am Schweißdetail

Das Messkonzept, welches in dieser Arbeit an der untersuchten Brücke zur Ermittlung der Ermüdung angewendet wird, basiert auf der Berechnung der Spannungen am Schweißnahtübergang unter Anwendung des Strukturspannungskonzeptes. Hierbei wird für die Spannungsermittlung an der kritischen Stelle (Hotspot) über zwei benachbarte Stützstellen die Spannungen am Schweißnahtübergang linear extrapoliert. Aufgrund eines nichtlinearen Spannungsanstiegs in Richtung der Schweißnaht (Kerbspannungsverlauf) ist die durch das Strukturspannungskonzept ermittelte Spannung jedoch geringer. In diesem Kapitel wird die Abweichung zwischen den Spannungsgrößen qualitativ untersucht.

Qualitative Darstellung der Schweißnahtspannung

Abbildung 4.17 zeigt die grafische Spannungsverteilung im Bogenbereich des relevanten Anschlussdetails. Die Lage der vorhandenen Risse an der Brücke wird als Grundlage für die Spannungsuntersuchungen herangezogen, welche im Abschnitt 3.1 der Bestandsanalyse in Abbildung 3.3a abgebildet sind. Aus dem obigen Kapitel geht hervor, dass die maximale Belastung der Dehnungsmessstreifen am Querträger auftritt, wenn die Belastung durch ein Rad 800 mm vor dem Querträger angeordnet ist. Daher ist die Lastresultierende in diesem Abstand und äquivalent zu Lastfall 2 aus Unterabschnitt 4.3.1 vertikal oberhalb des Steges der linken Längssteife angeordnet.

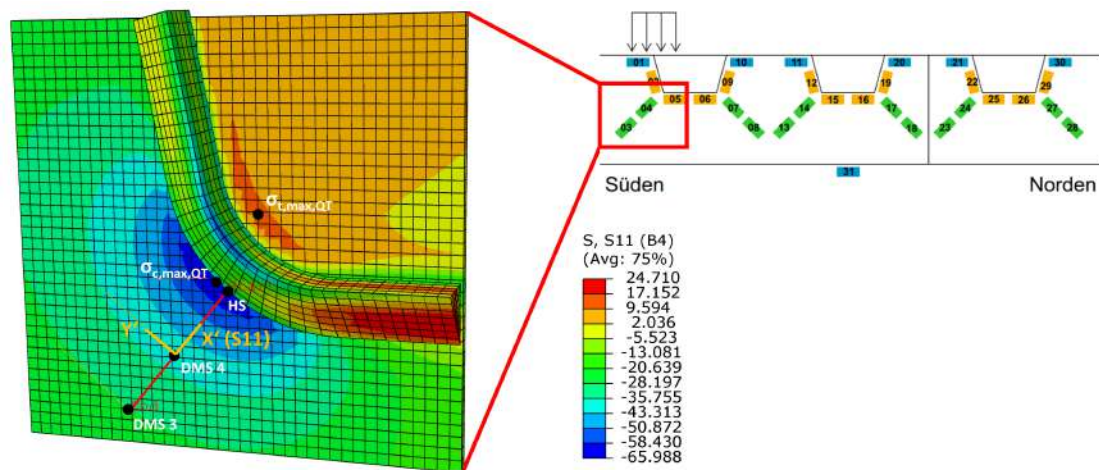


Abbildung 4.17.: Darstellung des Strukturspannungskonzeptes und der gerichteten Spannungen nach DMS Nr. 4 (S_x) im Detailausschnitt des FE-Modells

In der Abbildung ist die Längssteife aus Gründen der Übersichtlichkeit ausgeblendet, sodass die Spannungen um die Schweißnaht herum sichtbar sind. Da mit den Sensoren nur die Spannungen an der Oberfläche gemessen werden, sind in der Tiefe der Abbildung nur die Elemente in der oberen Lage des Querträgers dargestellt. Die schwarzen Punkte stellen die Positionen der grünen DMS Nr. 3 und 4 dar, welche als Stützstellen für das Strukturspannungskonzept dienen. Für die Analyse ist eine Verbindung zwischen den Stützpunkten und den Positionen der maximalen Spannungen erforderlich, die durch die rote Linie gekennzeichnet ist. In Abaqus können die Spannungen entlang dieses Pfades in gleichmäßigen Schritten berechnet werden. Der Pfad beginnt am Hot-spot der Schweißnaht und endet bei DMS Nr. 3. Die Spannungen (S_x) werden in die Ausrichtung des lokalen Koordinatensystems des Dehnungsmessstreifens Nr. 4 transformiert, sodass diese der Pfadrichtung des Strukturspannungskonzeptes entsprechen und mit den Messergebnissen der Sensoren verglichen werden können.

Im Folgenden werden die Spannungen im Querträger untersucht. Durch den Abstand von 800 mm der Vertikallast des Rades vom Querträger werden die Spannungen an den DMS-Positionen durch die Querkräfte in der Längssteife beeinflusst. Aufgrund der Tatsache, dass die Längssteife nur durch die Schweißnaht mit dem Querträger verbunden ist, treten im Querträger unterhalb der Schweißnaht, insbesondere im Bogenbereich, Druckspannungen (blauer Bereich) und oberhalb der Schweißnaht Zugspannungen (roter Bereich) auf. Die Druckspannungen sind etwa 5-mal größer als die Zugspannungen. Die maximale Zugspannung des Querträgers im Punkt $\sigma_{t,max,QT}$ beträgt $13,35 \frac{N}{mm^2}$, wohingegen die maximale Druckspannung $\sigma_{c,max,QT}$ in der Schweißnaht $-65,99 \frac{N}{mm^2}$ beträgt. Der untersuchte Punkt, für den die Hotspot-Spannung nach dem Strukturspannungskonzept berechnet wird, liegt etwa 3 mm von der Position der maximalen Druck-

spannung entfernt. Die Spannungsgröße am Hotspot beträgt $-62,77 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$. Aufgrund der geometrischen Nähe und der geringen Spannungsabweichung von 5,1 % zwischen dem Maximum und der ermittelten Spannung am Hotspot wird für die weiteren Untersuchungen die Spannung am Hotspot als maßgebend angenommen.

Nach Abbildung 4.17 ist zu vermuten, dass die Spannungen in der Schweißnaht geringer sind als im Schweißnahtübergang zum Grundwerkstoff des Querträgers. Eine verzerrte Transformation der Richtung der Spannung führt jedoch zu einer falschen Bewertung. Die maximalen Hauptspannungen in der Schweißnaht weisen aufgrund eines ausgeprägten mehrachsigen Spannungszustandes nicht die gleiche Richtung wie DMS Nr. 4 auf. Daher sind die in der Abbildung dargestellten Spannungswerte abgemindert.

Qualitativer Verlauf der Schweißnahtspannung

Dieses Unterkapitel beinhaltet den Vergleich der qualitativen Struktur- und Kerbspannung am Hotspot mit Hilfe der FE-Simulation. Die Kerbspannungen des Schweißnahtdetails werden in Abaqus wie folgt ermittelt. Zunächst wird der lineare Pfad durch die Angabe von Start- und Endpunktkoordinaten erzeugt. Im nächsten Schritt wird die Anzahl der Zwischenknoten festgelegt, für die die Spannungen berechnet werden sollen. Anschließend können die berechneten Spannungen tabellarisch ausgegeben werden. In diesem Fall wird die Position des DMS Nr. 3 als Endpunkt und der Hotspot am Schweißnahtübergang als Startpunkt verwendet und die Anzahl an Intervalle auf 10 Zwischenpunkte festgelegt. Die Strukturspannung wird durch Bestimmung der Spannungen an den Dehnungsmessstreifen Nr. 3 und 4 und anschließende Extrapolation über den bekannten Abstand zum Schweißnahtübergang ermittelt. Bei den Spannungswerten ist zu beachten, dass diese unter Modellierung einer Kehlnaht berechnet wurden. Nach dem Kerbspannungskonzept ist von einer Hohlnaht auszugehen und der Schweißnahtbereich ist feiner zu vernetzen. Aufgrund des Auftretens einer Singularität am Schweißnahtübergang kann der Spannungswert an der Kerbe nur als Orientierung dienen und ist nicht mit der Spannung nach dem Kerbspannungskonzept zu vergleichen.

In Abbildung 4.18 wird der Struktur- und Kerbspannungsverlauf in Abhängigkeit der Entfernung zur Schweißnaht dargestellt. Auf der x-Achse ist der Abstand zum Hotspot in mm und auf der y-Achse die Spannung in $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ aufgetragen. Die Kerbspannung wird durch die rote Kurve und die Strukturspannung durch die blaue Kurve repräsentiert. Die Spannungen an den Zwischenknoten sind durch Punkte dargestellt, welche linear miteinander verbunden sind. Im Diagramm sind durch senkrechte Striche die Positionen

der Dehnungsmessstreifen und des Hotspots gekennzeichnet. Die Kerbspannung am Hotspot wird mit σ_{notch} und die Strukturspannung mit σ_{HS} bezeichnet.

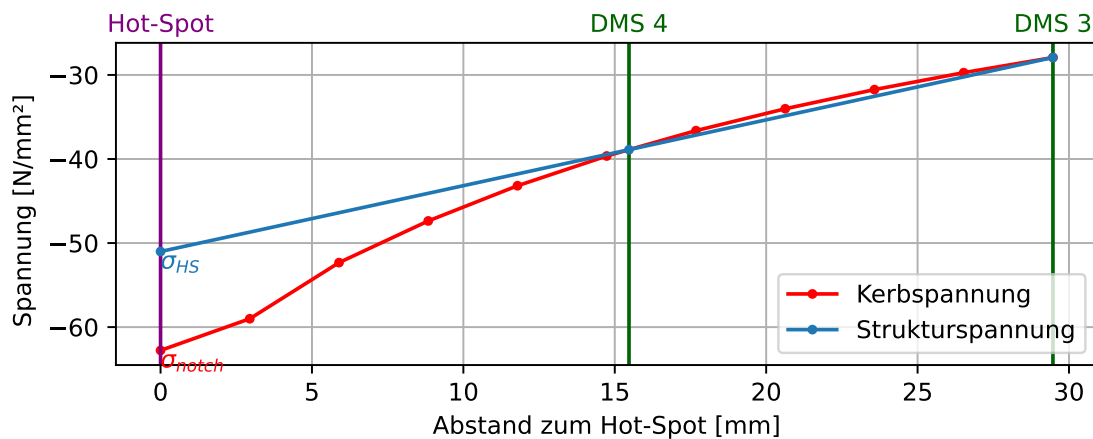


Abbildung 4.18.: Vergleich Hotspot-Stress und Strukturspannungskonzept der FE-Ergebnisse

Die in dem Diagramm dargestellten Spannungen sind zusätzlich an ausgewählten Punkten in Tabelle 4.3 aufgelistet.

Der nichtlineare Verlauf der Kerbspannung ist deutlich zu erkennen. Die Spannung beginnt bei DMS 3 in 29,47 mm Entfernung vom Hotspot bei $-27,926 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$. Die Spannung bei größeren Abständen ist im Diagramm nicht dargestellt. Wie bereits in Abbildung 4.17 erkennbar, nimmt die Spannung mit zunehmendem Abstand vom Schweißdetail ab. Die Spannung an DMS Nr. 4, welcher mit einer Distanz von 14 mm zum DMS 3 montiert ist und damit einen Abstand von 15,47 mm zum Schweißnahtübergang aufweist, beträgt $-38,891 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ und ist damit 39,2 % höher als an DMS Nr. 3. Der Verlauf der Kerbspannung ist, wie oben bereits erwähnt, in 10 Stufen unterteilt und weist am Hotspot mit $-62,772 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ den höchsten Wert auf. An dieser Stelle des Nahtübergangs liegt eine Singularität im Modell vor, sodass der quantitative Wert keine große Aussagekraft hat. Aufgrund der FE-Maschenweite von 2 mm kann die Spannung am Schweißnahtübergang nicht exakt bestimmt werden und wird durch eine lineare Interpolation der

Tabelle 4.3.: Vergleich Struktur- und Kerbspannung

Position	Abstand [mm]	σ_{HS} [$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$]	σ_{notch} [$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$]
Hotspot	0	-51,008	-62,772
DMS 4	15,47	-38,891	-38,891
DMS 3	29,47	-27,926	-27,926

Spannungen innerhalb eines Elements reduziert. Im Prinzip sollte sich ein nichtlinearer Verlauf der Kerbspannung ohne Wendepunkt bei $x = 2,9$ ergeben. Die Kerbspannung kann durch eine feinere Vernetzung und die Modellierung einer Hohlnaht besser dargestellt werden. Daher wird für die folgenden Analysen die Kerbspannung nicht weiter betrachtet und stattdessen die Hotspot-Spannung auf der Grundlage des Strukturspannungskonzeptes für die Ermüdungsberechnung und die Zustandsanalyse des Bauwerks verwendet.

Im Strukturspannungsverlauf sind σ_{HS} und σ_{notch} für DMS 3 und DMS 4 gleich, da beide Spannungskurven auf diesen Werten basieren. Es ist zu beachten, dass die Strukturspannung eine fiktive Spannung ist und eine Annäherung an die Kerbspannung darstellt, jedoch aufgrund des linearen Funktionsverlaufs eine geringere Spannung am Hotspot als die Kerbspannung aufweist. Über die Stützstellen kann die Spannung am Hotspot σ_{HS} mit $-51,008 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ bestimmt werden, welche somit 31,2 % höher als die Spannung am DMS Nr. 4 ist.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Genauigkeit der Ergebnisse zunimmt, je näher die Dehnungsmessstreifen an der Schweißnaht angebracht werden. Für das in dieser Arbeit angewendete Messkonzept und die darauf aufbauende Ermüdungsberechnung werden die Spannungen mit den grünen DMS extrapoliert und die Strukturspannung ermittelt. Da aufgrund der Montage ein gewisser Abstand zur Schweißnaht eingehalten werden muss, können die Spannungen am Hotspot näherungsweise mit dem Strukturspannungskonzept berechnet werden.

5. Messdatenanalyse

Die durch die Sensoren erfassten Messdaten werden vor Ort an der Brücke jeweils für einen Tag zwischengespeichert und anschließend auf einen externen Server übertragen. Ziel der Messdatenanalyse ist eine automatische Reduzierung der Daten und Auswertung. Hierzu wird in dieser Arbeit Softwarealgorithmus entwickelt und in diesem Kapitel vorgestellt. Als Programmiersprache wird Python verwendet, da diese Sprache für Daten- und Auswertungstools geeignet ist und der Quellcode leicht verständlich ist. Ein grober Programmablaufplan ist im Anhang A.1 dargestellt. Die in dieser Arbeit verwendete Python-Version ist 3.9.6 und zusätzlich werden folgende externe Bibliotheken verwendet:

- Pandas 1.5.3
- Numpy 1.24.1
- SciPy 1.10.0
- Rainflow 3.1.1

5.1. Rohdatenüberblick

Um einen Überblick über die Daten zu erhalten, eignet sich zunächst eine Visualisierung der Rohdaten. Anschließend können weitergehende Maßnahmen zur Datenaufbereitung entwickelt werden. An der Brücke werden Dehnungen, Bauteiltemperatur und die Außentemperatur erhoben. Die Daten sind zunächst in einem Binärformat mit aneinandergereihten 32-Bit Fließkommazahlen abgespeichert. Die Messfrequenz entspricht bei den DMS 100 Hz und bei den Temperatursensoren 1 Hz. Die Dateien enthalten jeweils 10 Minuten Abschnitte, sodass pro Datei 3,4 Millionen Datenpunkte aufgezeichnet werden. Nach einer Sortierung der Daten liegen diese getrennt für DMS und Temperatur tabellarisch vor, sodass jede Spalte einem Sensor zugewiesen ist. In der folgenden Abbildung 5.1 ist ein Beispiel für eine Aufzeichnung der Dehnungen und Temperatur am 19.10.2022 um 11:00 Uhr dargestellt.

Im oberen Diagramm sind die Werte der DMS mit den Bezeichnungen 11 und 24. DMS 11 steht stellvertretend für die DMS am Deckblech und DMS 24 für die Dehnungsmessstreifen am Querträger. Beide liefern für ihre Kategorie jeweils die höchsten Dehnungsschwingbreiten. Auf der x-Achse sind die Anzahl an Indizes und auf der y-Achse

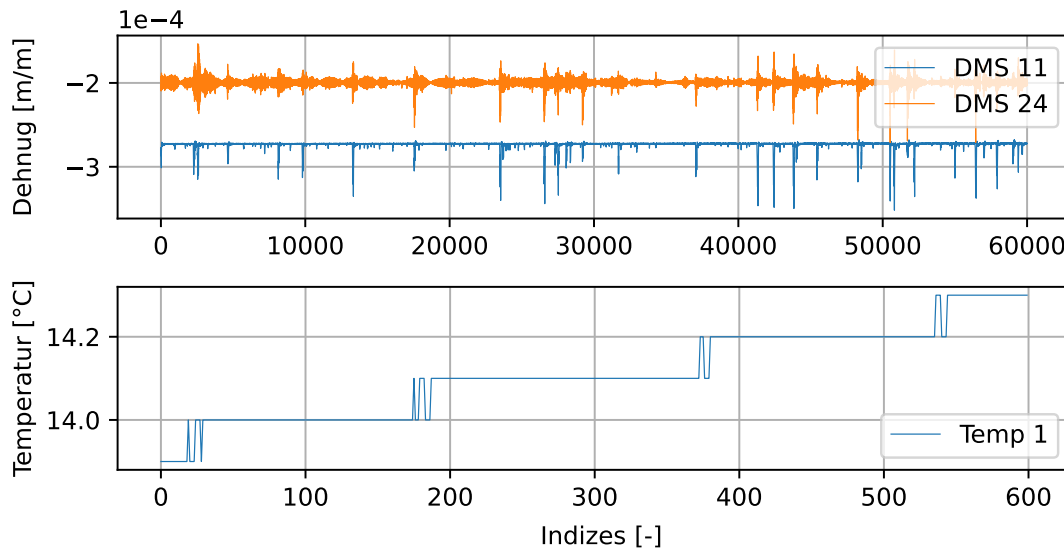


Abbildung 5.1.: Beispiel von DMS- und Temperatur-Rohdaten für 10 Minuten

die Dehnung in $\frac{m}{m}$ aufgetragen. Aus dem Datum, welches dem Dateinamen der eingeleiteten Datei entspricht und der Indexnummer, kann auf den Zeitstempel der Messdaten geschlossen werden.

Das untere Diagramm der Abbildung 5.1 bildet die Bauteiltemperatur in $^{\circ}C$ am Querträgersteg des MQS-1 über 10 min ab. Die Auflösung der Temperaturmessung beträgt ein Zehntel Kelvin und bei einer Messfrequenz von 1 Hz ergeben sich 600 Datenpunkte für den Zeitraum.

5.2. Datenaufbereitung

Es folgt die Betrachtung der Messwerte der Temperatur in der Abbildung 5.1. Die Bauteiltemperatur beträgt zu diesem Zeitpunkt etwa $14^{\circ}C$. Es ist auffällig, dass bei einem Übergang zwischen zwei verschiedenen Messwerten mehrere Sprünge auftreten, bevor der Wert auf die nächste Nachkommastelle annimmt. Um diese Fluktuationen zu vermeiden und einen scharfen Wechsel der Messdaten von einem Wert zum anderen zu erzwingen, wird eine Filterung der Messdaten vorgenommen. Dazu wird der Savitzky-Golay-Filter mit 20 Stützstellen und linearer Regression verwendet und das Ergebnis ebenfalls wie die Ausgangsdaten auf ein Zehntel Kelvin gerundet.

Die Datenaufbereitung der DMS-Messwerte beinhaltet zunächst die Durchführung einer Temperaturkompensation. Diese berücksichtigt die „scheinbare“ Dehnung ε_s des

Sensors infolge Temperaturänderung, also einer Dehnung ohne Verkehrsbelastung. Dazu muss die Temperaturganglinie von den Messwerten abgezogen werden.

$$\varepsilon_s(T) = -19.51 + 2.06 \cdot T - 6.05 \times 10^{-2} \cdot T^2 + 2.32 \times 10^{-4} \cdot T^3 \quad (5.1)$$

mit: ε_s = Materialausdehnung des Sensors („scheinbare Dehnung“) in $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$
 T = Bauteiltemperatur in °C

Das Polynom in der Gleichung 5.1 ist abhängig vom verwendeten DMS und kann dem Produktdatenblatt des Herstellers entnommen werden. Daher gilt die Gleichung nur für die in diesem Projekt verwendeten DMS. Es ist zu beachten, dass das Ergebnis in $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ berechnet wird, die Messdaten jedoch in der Einheit $\frac{\text{m}}{\text{m}}$ vorliegen. Die Temperatur entspricht der Bauteiltemperatur und nicht der Lufttemperatur.

Da die DMS einen 1D Spannungszustand messen, kann anschließend die Dehnung mit einem E-Modul von $210\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ multipliziert werden, ohne die Querdehnung zu berücksichtigen.

Im nächsten Schritt werden die Messwerte der DMS aus Abbildung 5.1 analysiert. Es ist zu erkennen, dass die DMS-Messdaten um einen bestimmten Wert schwingen. Bei DMS 11 liegt der Wert ungefähr bei $-2,72 \cdot 10^{-4}$ und für DMS 24 bei $-2,0 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{m}}$. Diese Werte ergeben sich aus Eigenspannungen, die während des Klebens des Sensors auf das Bauteil eingebracht werden. Da für die Ermüdungsberechnung keine Absolutwerte, sondern nur Spannungsschwingbreiten verwendet werden, ist daher der Eigenwert unproblematisch, wird aber zur besseren visuellen Vergleichbarkeit eliminiert. Dazu werden allen Datenpunkte eines Datensatzes dessen Median als Offsetwert abgezogen. Das führt dazu, dass der Wert der mittleren Dehnung bei $0 \frac{\text{m}}{\text{m}}$ liegt. Der Median wird aus dem Grund verwendet, da dieser stabil gegenüber Ausreißern ist.

Aus der groben Übersicht der Messdaten geht hervor, dass der DMS 24 sowohl im Zug- als auch im Druckbereich belastet wird. Dies ist dadurch gekennzeichnet, dass die Dehnungsspitzen oberhalb und unterhalb des Medians liegen. Es ist davon auszugehen, dass die Schwingungen durch das rollende Rad initiiert werden. Im Gegensatz dazu zeigen die Werte von DMS 11 nur eine Belastung in negativer Richtung. Dies lässt sich aus dem Anstieg der absoluten Dehnungen ableiten. Eine deutliche Zugbeanspruchung, d.h. positivere Werte als der Median, ist nicht zu erkennen.

5.3. Ereigniserfassung

Ziel der Ereigniserfassung ist es, die Datenmenge bereits vor Ort in Echtzeit zu reduzieren und nur ermüdungsrelevante Ereignisse zu erfassen. Dazu werden die Überfahrten des Schwerverkehrs und nicht die des PKW-Verkehrs berücksichtigt. Insbesondere nachts, wenn die Verkehrsbelastung geringer ist, können durch eine getriggerte Messwerterfassung erhebliche Datenmengen eingespart werden.

Zur Ermittlung einer Fahrzeugüberfahrt aus den Messwerten wird aus der Python-Bibliothek „Scipy“ die Funktion „find_peaks“ verwendet. Die beiden grundlegenden Parameter der Funktion sind zum einen ein Schwellenwert, ab dem lokale Maxima („Peaks“) ermittelt werden und zum anderen die Anzahl der Messwerte, die mindestens zwischen zwei benachbarten Peaks liegen müssen. Die Bestimmung des ersten Parameters wird im folgenden Unterabschnitt 5.3.1 erläutert.

5.3.1. Grenzwertermittlung

Für die Erfassung der LKW muss ein Grenzwert festgelegt werden, bei dessen Erreichen die Messungen ausgewertet werden. Eine Möglichkeit wäre, eine Testfahrt durchzuführen, bei der ein LKW mit bekanntem Gewicht die Brücke befährt. Aus den Messungen der Überfahrt könnte anschließend ein Grenzwert festgelegt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde keine Kalibrierfahrt durchgeführt, sodass zur Grenzwertbestimmung statistische Kennwerte herangezogen werden müssen.

Um einen geeigneten Schwellwert zu finden, ab dem Messwerte als Überfahrt gezählt werden, werden die Spannungen der Deckblech-DMS genutzt, da diese DMS eine Überfahrt am zuverlässigsten detektieren. Um nicht von den Daten eines Sensors abhängig zu sein, was bei einem Ausfall die Auswertung unmöglich machen würde, wird für die Deckblech-DMS am MQS-1 der betragsmäßig größte Wert verwendet. Es ergibt sich eine Einhüllende der Messwerte, welche in Abbildung 5.2 als blaue Kurve dargestellt ist.

Die horizontalen Linien stellen mögliche Grenzwerte dar, wobei die grüne Linie einen Wert von $2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ und die rote Linie einen Wert von $2,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ repräsentiert. Es ist anschließend visuell zu bestimmen, welcher Grenzwert alle signifikanten Überfahrten berücksichtigt und alle unbedeutenden Ereignisse ausschließt. Da für die Ermüdung nicht die absoluten Spitzenspannungen relevant sind, sondern die Spannungsschwingbreiten,

die an dieser Stelle noch nicht kalkulierbar sind, besteht die Schwierigkeit darin, die für die Bauteilermüdung relevanten Überfahrten zu bestimmen.

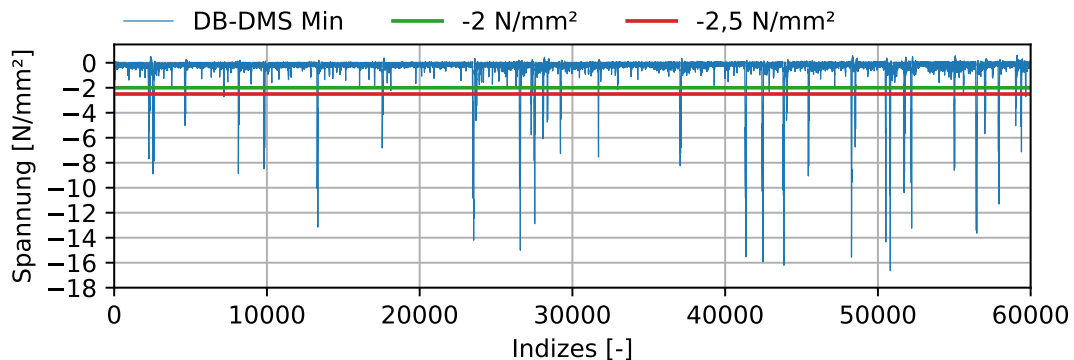


Abbildung 5.2.: Grenzwertermittlung zur ausschließlichen Erfassung des Schwerverkehrs

Um den Grenzwert besser abschätzen zu können, wird die Anzahl der Fahrzeuge im Auswertetool mit der Anzahl der Fahrzeuge, die die Brücke befahren haben, verglichen. Dazu wird als Bezugsgröße eine Dauerzählstelle der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) ausgewertet. Eine Zählstelle ermittelt die Anzahl der Achsen mit Hilfe von Induktionsschleifen, die in die Fahrbahn eingelassen sind. Es gibt verschiedene Ausführungen, die unterschiedliche Fahrzeuggruppen zählen können. Die hier untersuchte Zählstelle unterscheidet zwischen PKW und vier verschiedenen Schwerverkehrsfahrzeugen (Busse, LKW mit/ohne Anhänger und Sattelzugmaschinen).

Die Zählstelle befindet sich ca. 1 km vor dem Autobahnkreuz, sodass auch Fahrzeuge gezählt werden, die die Autobahn verlassen und nicht über das in dieser Arbeit untersuchte Teilbauwerk fahren. Zudem wird durch das Messkonzept nur der rechte Fahrstreifen erfasst und der Schwerverkehr, der sich zum Zeitpunkt der Überfahrt auf dem linken Fahrstreifen befindet, wird nicht registriert. Die an der Zählstelle ermittelte Anzahl stellt somit nur die maximale Anzahl an Schwerverkehrsfahrzeugen dar, die das Bauwerk in dieser Stunde passiert haben können. Der Anteil der durch das Messkonzept erfassten Fahrzeuge kann nur geschätzt werden.

Für die Fahrzeugzahlen werden die aktuellsten öffentlich verfügbaren Daten aus dem Jahr 2021 verwendet [19]. Es erfolgt eine Gruppierung der Schwerverkehrszahlen nach Wochentag und Uhrzeit mit anschließender Medianbildung. Daraus ergibt sich ein Wert der Überfahrten, der mit der Anzahl der am Messsystem erfassten Schwerverkehrsfahrzeuge verglichen werden kann.

Als Beispiel wird hier der Zeitraum am 29.10.2022 (Mittwoch) um 11:00 Uhr gewählt. Es wurden durchschnittlich 703 SV-Fahrzeuge **pro Stunde** und **vor** dem Autobahnkreuz an der Dauerzählstelle erfasst. Dieser Wert wird auch für das Jahr 2022 angenommen. Der Anteil, der die Messanlage passiert hat, ist nun abzuschätzen. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass es drei Möglichkeiten der Weiterfahrt gibt und der Anteil in jeder Richtung gleich ist. Zum einen ein Wechsel auf die A1 in Richtung Norden und Süden und zum anderen das Verbleiben auf der A44. Wird nun der Wert 703 durch drei geteilt und zusätzlich auf 10 min bezogen, ergeben sich 39 Fahrzeuge für den Zeitraum.

Zur Ermittlung eines Grenzwertes wird das obige Beispiel für alle 10-Minuten-Abschnitte eines Tages (19.10.2022) durchgeführt, um einen größeren Stichprobenumfang zu erhalten. Anschließend werden die gezählten Fahrzeuge der Dauerzählstelle und die detektierten Fahrzeuge des Auswertetools mit einem Grenzwert von $-2,5 \frac{N}{mm^2}$ und $-2 \frac{N}{mm^2}$ verglichen. Die Differenzen zwischen den Sollwerten (Dauerzählstelle) und den Istwerten (Auswertetool) werden in Histogrammen der Abbildung 5.3 dargestellt.

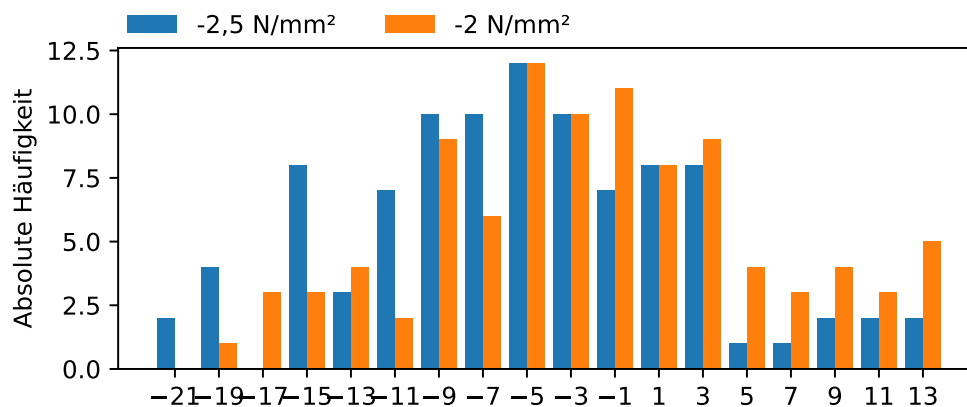


Abbildung 5.3.: Histogramm der Differenzen der FZ-Anzahl der BAST und des Auswertetools

Es ergeben sich Differenzen, die negativ sind, wenn mehr Fahrzeuge von der Dauerzählstelle erfasst wurden, und Werte, die positiv sind, wenn das Auswertetool mehr Fahrzeuge in den Zeitabschnitten erfasst hat. Es muss nun geprüft werden, bei welchem Grenzwert die Verteilung ausgeglichener ist, sodass der Mittelwert bestenfalls 0 ergibt.

Der Vergleich der beiden Annahmen zeigt, dass bei der Berechnung mit dem Grenzwert von $-2 \frac{N}{mm^2}$ die Werte weiter nach rechts verschoben und somit ausgeglichener sind. Da der Mittelwert beider Histogramme kleiner als 0 ist, wäre der Grenzwert prinzipiell

weiterhin iterativ zu bestimmen und würde zwischen $0 \frac{N}{mm^2}$ bis $-2 \frac{N}{mm^2}$ liegen. Auf eine Reduzierung des Grenzwertes wird an dieser Stelle verzichtet, da für die Ermüdung hauptsächlich Sattelzüge relevant sind, die 40 t und mehr wiegen können [8] und bei einer Reduzierung des Grenzwertes auch Fahrzeuge erfasst werden, die deutlich weniger Gewicht aufweisen. Daher wird für die Ermüdungsanalyse ein Grenzwert von $-2 \frac{N}{mm^2}$ verwendet, um die relevanten Fahrzeugereignisse zu erfassen.

Die iterative Abschätzung unterliegt zudem mehreren Annahmen. Zum einen basieren die Sollwerte auf dem statistischen Mittel des Vorjahres, sodass für einen genaueren Grenzwert ein Vergleich mit den Daten der Dauerzählstelle aus dem Jahr 2022 anzustreben wäre, die jedoch zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch nicht veröffentlicht sind. Zum anderen ist der genaue Anteil der über das Teilbauwerk fahrenden Fahrzeuge nicht bekannt und wird mit einem Drittel am Gesamtverkehr angenommen. Da die A44 nach Westen in die B1 übergeht und lediglich als Zubringer für die Dortmunder Innenstadt dient, ist davon auszugehen, dass der Großteil auf die A1 wechselt und nicht auf der A44 bleibt. Somit kann der Anteil, der die Messanlage durchfährt, unter einem Drittel liegen.

5.3.2. Zeitliche Abgrenzung der Fahrzeugereignisse

Bisher wurde ein Schwellenwert festgelegt, ab dem eine Durchfahrt als relevant betrachtet wird. Im nächsten Schritt wird der zeitliche Abstand bestimmt, in dem ein Fahrzeugereignis liegen kann und damit der zweite Parameter für die Übergabe an die Funktion „find_peaks“.

Der minimale zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Ereignissen kann durch folgendes Beispiel verdeutlicht werden. In der StVO ist die maximale Länge eines Sattelzuges mit 16,5 m und der einzuhaltende Sicherheitsabstand mit 50 m festgelegt. Aktuelle Entwicklungen zeigen, dass durch die Möglichkeit des „Platooning“ mehrere in Kolonne fahrende LKW gemeinsam gesteuert werden können, wodurch der Abstand auf 15 m bis 21 m reduziert werden kann [20].

Daraus ergibt sich ein Mindestabstand von 31,5 m. Der Längenabstand muss anschließend in ein Zeitintervall umgerechnet werden. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit für Lastkraftwagen auf Autobahnen beträgt in Deutschland $80 \frac{km}{h}$. Unter der konservativen Annahme, dass diese Geschwindigkeit um ca. $10 \frac{km}{h}$ überschritten wird, kann die Dauer

für ein Fahrzeugereignis nach Gleichung 5.2 ermittelt werden.

$$\begin{aligned}
 t_{Event} &= \frac{l_{SV} + l_{SA}}{v} \cdot 3.6 \\
 &= \frac{16,5 \text{ m} + 15 \text{ m}}{90 \frac{\text{km}}{\text{h}}} \cdot \frac{3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}}{1000 \frac{\text{m}}{\text{km}}} = 1,26 \text{ s}
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

mit: t_{Event} = Ereignisdauer in s
 l_{LKW} = Länge des Schwerverkehrfahrzeugs in m
 l_{SA} = Sicherheitsabstand in m
 v = Fahrzeuggeschwindigkeit in $\frac{\text{km}}{\text{h}}$

Bei einer Messfrequenz von 100 Hz beträgt die Anzahl der Messpunkte zwischen zwei Ereignismaxima 126. Dieser Wert wird der Peakfinding Funktion übergeben.

Die Berechnung ist mit dem Fehler behaftet, dass bei Stau die Fahrzeuge deutlich langsamer fahren und der angenommene zeitliche Abstand zwischen zwei Ereignissen überschätzt wird. Es kann dazu führen, dass eine reale Überfahrt in zwei berechnete Ereignisse aufgeteilt wird.

Die mit der Peakfinding Funktion berechneten Ereignisse enthalten bisher nur den Zeitpunkt des Maximalwertes pro Ereignis. Im Folgenden wird die Bestimmung des Zeitintervalls eines Ereignisses beschrieben.

Zur Bestimmung des Startindex wird der Zeitpunkt überprüft, an dem der Deckblech DMS des MQS-1 (vorderer Messquerschnitt) zum letzten Mal einen Wert ≥ 0 aufweist. Analog wird der Endzeitpunkt bestimmt, sobald für den hinteren Messquerschnitt nach dem Ereignis wieder ein Wert ≥ 0 vorliegt. In Abbildung 5.4 ist die Umhüllende der Messwerte der DMS am Deckblech in einem Zeitraum von etwa 30 s zwischen den Indizes 26400 bis 29400 dargestellt. Hier ist ein Zeitraum dargestellt, in dem viele Schwerverfahrzeuge in relativ kurzer Zeit die Messstelle passiert haben. Die roten Abschnitte zeigen die berechneten Zeitintervalle für die Ereignisse.

In einem weiteren Schritt können nun alle nicht markierten Bereiche, die keine Ereignisse enthalten, aus den aufgezeichneten Messdaten gelöscht und somit der Speicherbedarf reduziert werden.

Als Resultat wird eine Eventtabelle erzeugt, welche in Tabelle 5.1 auszugsweise (vgl. Abbildung 5.4) dargestellt ist. Die erste und letzte Zeile entsprechen dem ersten und letztem Ereignis aus dem hier untersuchten 10 min-Abschnitt. Neben den ermittelten

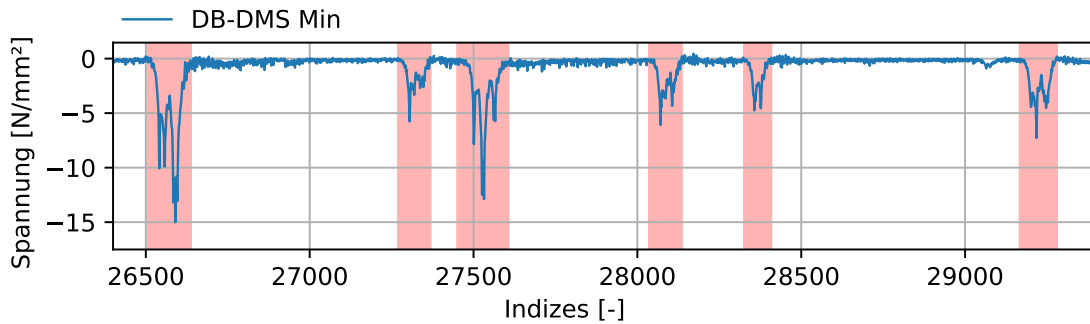


Abbildung 5.4.: Ereignisse mit Start und Endpunkt

Indizes, welche nur für die aktuelle Datei gültig sind, enthält die Tabelle auch den Zeitstempel, sodass mehrere Tabellen aus verschiedenen Dateien miteinander verknüpft werden können.

Tabelle 5.1.: Auszug der Fahrzeugetablelle

Index	Date	start_index	end_index
26	2022-10-19 11:00:00.260	0	51
⋮	⋮	⋮	⋮
26590	2022-10-19 11:04:25.900	26506	26637
27305	2022-10-19 11:04:33.050	27270	27368
27532	2022-10-19 11:04:35.320	27451	27606
28071	2022-10-19 11:04:40.710	28036	28135
28357	2022-10-19 11:04:43.570	28326	28408
29218	2022-10-19 11:04:52.180	29167	29280
⋮	⋮	⋮	⋮
59677	2022-10-19 11:09:56.770	59631	59705

5.3.3. Beschreibung eines Fahrzeugereignisses

Nachdem im vorherigen Abschnitt alle Events für ein 10-min Intervall detektiert sind, wird im Folgenden ein Ereignis näher erläutert. In Abbildung 5.5 ist das Fahrzeuget mit der Indexnummer 26590 dargestellt. Der Graph entspricht der Umhüllenden, also die Minimalwerte der Dehnungsmessstreifen am Deckblech des MQS-1. Auf der x-Achse ist der jeweilige Index aufgetragen. Daher ist ersichtlich, dass das Ereignis etwa 1,3 s dauert. Die Messwerte auf der y-Achse weisen die Einheit $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ auf.

Es ist eindeutig zu erkennen, dass bei Überfahrt einer Achse über die DMS die Messwerte stark zunehmen. Da davon auszugehen ist, dass das Fahrzeug mit konstanter Ge-

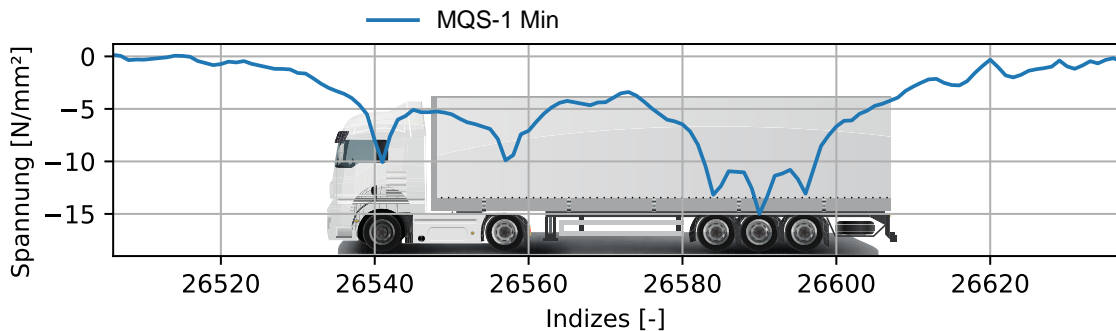


Abbildung 5.5.: Sattelzug und Messdaten (Hintergrund: [21])

schwindigkeit über die Brücke fährt und nicht zwischendurch stark beschleunigt oder abbremst, liegt ein linearer Zusammenhang zwischen Weg und Zeit vor. Daraus ergibt sich, dass die Zeitdifferenz zwischen zwei Maxima in einen geometrischen Abstand überführt werden kann und somit der Fahrzeugtyp, der die Brücke passiert hat, identifiziert werden kann.

Bei der Überfahrt in dem hier vorliegenden Beispiel handelt es sich um einen Sattelzug mit zwei Achsen am Zugfahrzeug und drei direkt hintereinander liegende Achsen des Sattelauftriebs (sog. Tridemachse oder Dreifachachse). Die Seitenansicht eines Sattelzuges ist im Hintergrund dargestellt. Die Radabstände werden in [18] üblicherweise mit 3,2 m, 5,2 m, 1,3 m und 1,3 m angegeben.

Werden die Fahrzeugevents manuell durchgesehen, sind einige solcher Ereignisse mit zwei Achsen vorne und drei eng liegenden Achsen hinten zu erkennen. Diese Art von Fahrzeugen ist in Deutschland mit einem Anteil im Schwerverkehr von 50 % für Strecken großer Entfernung weit verbreitet [18].

Bei Sattelzügen befindet sich die Ladung im Auflieger und damit auf den hinteren Achsen. Das zulässige Gesamtgewicht beträgt für die vorderen Achsen 11 t und für die hintere Dreifachachse 24 t. Der Gewichtsunterschied lässt sich ebenfalls aus den Messdaten ableiten, da die Spannungen am Deckblech beim Anhänger wesentlich höher sind als beim Zugfahrzeug. Eine aussagekräftiges Verhältnis zwischen Fahrzeuggewicht und Maximalwert der Messdaten kann lediglich eine Kalibrierfahrt liefern.

5.3.4. Positionsbestimmung des Fahrzeuges in Querrichtung

In diesem Kapitel wird die Radposition in Querrichtung basierend auf den FE-Ergebnissen aus Unterabschnitt 4.3.3 bestimmt. Dazu zeigt Abbildung 5.6 die Einflusslinie in Querrichtung der Deckblechsensoren sowohl für die an der Brücke gemessenen

Daten als auch für die Daten aus der FE-Simulation. Für dieses Beispiel werden die Messdaten der Sensoren am Deckblech für die maximale Achslast aus dem im Unterabschnitt 5.3.3 genannten Überfahrt zum Zeitpunkt des Index 26590 des MQS-1 verwendet. Der Grund für die Wahl dieses Zeitpunkts liegt darin, dass bei der Untersuchung verschiedener Achsen festgestellt wurde, dass der Verlauf der Einflusslinie am häufigsten vorkommt.

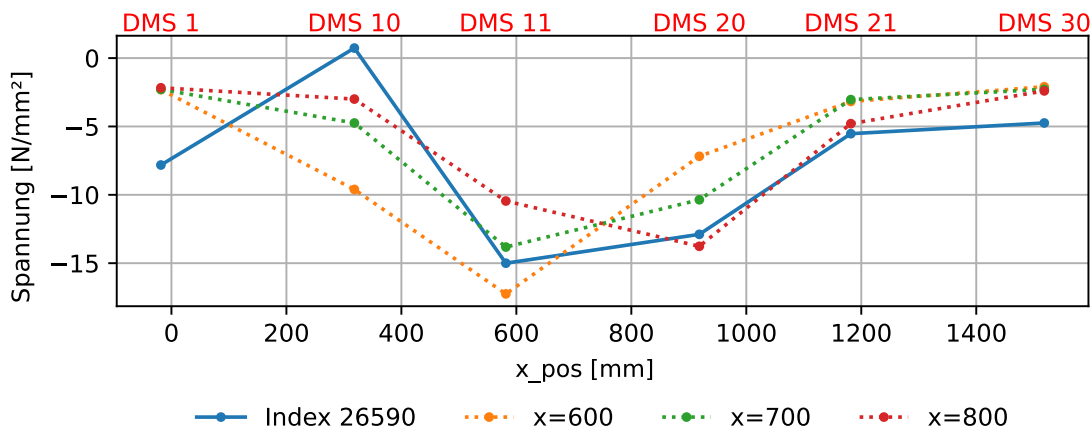


Abbildung 5.6.: Vergleich der Einflusslinie in Querrichtung für Index 26690

Die Werte auf der y-Achse geben die Spannung in $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ und die Werte auf der x-Achse geben den Abstand in Querrichtung beginnend ab dem 1. Steg in mm an. Die blaue Linie stellt die gemessenen Sensordaten dar, während die gestrichelten Linien die berechneten Spannungen an den Sensorpositionen aus der FE-Simulation darstellen. An dieser Stelle ist zu ergänzen, dass die Spannungswerte auf der Berechnung des Submodells basieren und daher geringfügig von den Werten in Abbildung 4.15 aus Unterabschnitt 4.3.3 abweichen. Da diese Werte mit den Messwerten verglichen werden und daher eine möglichst hohe Genauigkeit aufweisen müssen, werden diese aus dem Submodell entnommen.

Zunächst werden die gemessenen Spannungen an der Brücke untersucht. Die höchste Belastung erfährt DMS 11 an der Stelle $x = 581,8$ mit einer Spannung von $-15,00 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$. Nach rechts nehmen die Spannungen mit zunehmendem Abstand kontinuierlich ab. Der zweithöchste Wert liegt bei DMS 20 bei $-12,89 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ und damit 14% unter dem Maximum. Die beiden rechten Sensoren weisen mit $-5,53 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ bei DMS 21 und $-4,75 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ bei DMS 30 etwa gleich hohe Spannungen auf. Es ist jedoch trotzdem eine Abnahme um 14% nach außen vorhanden. Zur linken Seite des Maximums sinkt der Wert des DMS 10 sehr stark auf $0,74 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ ab. Es ist bemerkenswert, dass es sich hier um eine Zugspannung und nicht um eine Druckspannung handelt. Die Spannung am äußersten linken

Sensor mit der Bezeichnung DMS Nr. 1 beträgt $-7,82 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ und weist damit den dritthöchsten Wert der Deckblechsensoren auf. Da davon ausgegangen wird, dass die Werte nach außen hin abnehmen, sollte DMS 1 grundsätzlich einen niedrigeren Wert als DMS 10 aufweisen.

Die Untersuchung der Spannungseinflusslinien aus der FE-Simulation wurde bereits in Unterabschnitt 4.3.3 behandelt. Im Folgenden werden nur die Kurven aufgeführt, welche die beste visuelle Übereinstimmung mit den Sensorwerten aufweisen. Der Fokus liegt sowohl auf dem Maximum als auch auf dem zweithöchsten Wert. Alle Einflusslinien zeigen mit zunehmendem Abstand vom Maximum eine Abnahme der Spannungen nach außen. Für die Kurve, bei der die Last an der Position $x = 600$ wirkt, liegt das Maximum trivialerweise nahe bei DMS 11 und zeigt eine Spannung von $-17,25 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ auf. Die zweithöchste Ausnutzung liegt bei DMS 10 links vom Maximum mit einer Spannung von $-9,60 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$. Der Graph $x = 700$ zeigt ebenfalls bei DMS 11 ein Maximum. Bei dieser Belastung ist jedoch DMS 20, also rechts vom Maximum, am zweithöchsten belastet. Die Spannungen liegen für DMS 11 bei $-13,82 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ und für DMS 20 bei $-10,36 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$. Wird die Last um weitere 100 mm nach rechts auf $x = 800$ verschoben, so zeigt sich, dass die maximale Beanspruchung bei DMS 20 und die nächsthöhere Beanspruchung bei DMS 11 auftritt.

Die Bestimmung der Radposition erfolgt durch den Vergleich der Verläufe der Einflusslinien und der Spannungswerte an den DMS-Positionen. Ein visueller Vergleich zeigt eine hohe Übereinstimmung der maximalen Sensorwerte für Index 26590 und der Einflusslinie aus der FE-Simulation mit der Lastposition $x = 700$. Es ist daher davon auszugehen, dass das Rad in diesem Bereich in Querrichtung über den Querträger MQS-1 gefahren sein muss. Beim Vergleich der Spannungswerte an DMS 1 und DMS 10 mit der Simulation ist eine deutliche Abweichung erkennbar. Der DMS 10 weist im Vergleich zur Kurve $x = 700$ einen deutlich niedrigeren Wert auf, während DMS 1 einen zu hohen Wert liefert. Die Ursache für die Anomalie der Messdaten kann nicht abschließend geklärt werden.

Für die automatische Auswertung der Messdaten ist ein Verfahren anzuwenden, das die Einflusslinie mit der besten Übereinstimmung mit den Messwerten ermittelt. Dazu wird im Auswertetool das Bestimmtheitsmaß R^2 des Pearson-Korrelationskoeffizienten (PCC) ermittelt. Der PCC stellt eine einfache Möglichkeit dar, den Zusammenhang zwischen zwei Vektoren zu bestimmen. Der Koeffizient ist ein Maßzahl für die Übereinstimmung und kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen. Das Bestimmtheitsmaß ergibt sich durch Quadrieren des Koeffizienten, wodurch positive Werte zwischen -1 und 1 resultieren und eine Bewertung der Korrelation zwischen den verschiedenen Kurven

vorgenommen werden kann. Der Vorteil liegt darin, dass die Python-Bibliothek „Scipy“ die Funktion „pearsonr“ zur Berechnung des Korrelationskoeffizienten bereitstellt. In Tabelle 5.2 sind die Bestimmtheitsmaße der Korrelation zwischen den Kurven aus der Abbildung 5.6 aufgelistet.

Tabelle 5.2.: Bestimmtheitsmaße für Einflusslinien in Querrichtung

Pos. [mm]	R^2 [-]
$x = 800$	0,658
$x = 700$	0,604
$x = 600$	0,174

Nach der Berechnung der Bestimmtheitsmaße ist die Korrelation mit der Einflusslinie für die Last bei $x = 800$ mit 0,658 am höchsten. Danach folgt die Einflusslinie $x = 700$ mit 0,604. Die Abweichung beträgt nur 9%, sodass davon auszugehen ist, dass das Rad zwischen $x = 700$ und $x = 800$ gerollt ist. Problematisch an der Methode ist, dass der PCC eine lineare Korrelation der Spannungsdifferenzen ergibt. Dies bedeutet, dass große Abweichungen der Einzelwerte zu Fehleinschätzungen führen können, insbesondere bei einer kleinen Stichprobengröße von sechs Datenpunkten. Daher können bei der Bestimmung der Radposition die Abweichungen von DMS 1 und DMS 10 die Korrelation verfälschen. Eine bessere Methode wäre, den Maximalwerten, die einen aussagekräftigeren Hinweis auf die Radposition geben, eine höhere Wichtung zuzuweisen. Dies wird jedoch vom PCC nicht berücksichtigt.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Auflösung und damit die Genauigkeit zu erhöhen. Daher wird als Grundlage für das Auswertetool eine FE-Simulation verwendet, bei der die Lastintervalle in Querrichtung 50 mm betragen. Nach dieser Berechnung ergibt sich als Ergebnis für diese Überfahrt mit dem Index 26590 an der Lastposition $x = 750$ ein Bestimmtheitsmaß von 0,691 und damit eine höhere Korrelation als bei den bisherigen Ergebnissen. Diese Position wird in der Fahrzeugeventtabelle des Auswertetools gespeichert und das Vorgehen für alle Fahrzeugereignisse wiederholt.

Als Fazit der Methode zur Bestimmung der Fahrzeugposition in Querrichtung kann festgehalten werden, dass durch den Vergleich der Einflusslinien und der Sensorwerte am Deckblech die Radposition mit einer gewissen Genauigkeit bestimmt werden kann. Eine abschließende Validierung kann nur durch eine Kalibrierfahrt erfolgen.

5.4. Vergleich der Messdaten unterschiedlicher Messquerschnitte

Das Messkonzept sieht vor, dass die Sensoren nicht nur an einem Messquerschnitt (MQS), sondern an zwei weiteren Querträgern jeweils vor und hinter dem Hauptmessquerschnitt montiert werden. Im Folgenden werden die Messdaten der einzelnen MQS im Hinblick auf die Redundanz miteinander verglichen.

In der Abbildung 5.7 sind die Messwerte für das Fahrzeugereignis mit dem Index 26590 dargestellt. Die Grafik stellt eine Erweiterung der Abbildung 5.5 in Unterabschnitt 5.3.3 mit den anderen beiden Messquerschnitten dar. Zur Übersichtlichkeit sind in der Legende die MQS in der Reihenfolge aufgeführt, in der die von einem Fahrzeug bei einer Überfahrt befahren werden. Der MQS-2 ist der vordere, MQS-1 die mittlere und MQS-3 der hintere Messquerschnitt.

Hierbei ist zu beachten, dass die Umhüllende, d.h. der zu jedem Zeitpunkt kleinste Wert der Deckblech-DMS, nachgebildet wird. Dies hat den Vorteil, dass alle Achsen dargestellt werden, auch wenn das Fahrzeug schräg über die Messstelle fährt. Würden nur hintereinander liegende DMS miteinander verglichen werden, könnte bei einem DMS die Achsen erkennbar sein und bei einem anderen nicht.

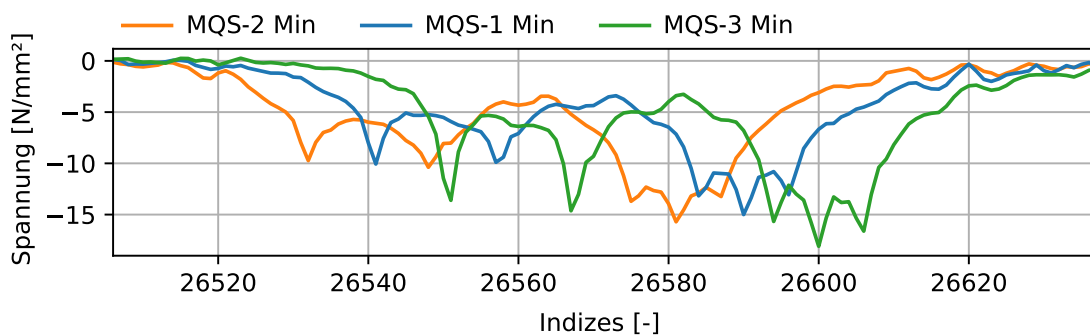


Abbildung 5.7.: Vergleich der DB-DMS für die 3 Messquerschnitte

Der qualitative Verlauf ist bei allen drei MQS sehr ähnlich. Die lokalen Maxima der 5 Achsen, sowie deren Radstände des Sattelzuges sind in allen Aufzeichnungen ersichtlich. Es wird ebenfalls deutlich, dass die Kurven jeweils einen zeitlichen Versatz aufweisen, auf welchen in für die Geschwindigkeitsermittlung später näher eingegangen wird.

Generell weist MQS-3 bei jedem Achsereignis die höchsten Spannungsspitzen auf. Die Maximalwerte von MQS-1 und MQS-2 liegen auf einem ähnlichen Niveau. Die höchste Belastung mit $-18,10 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ wird am mittleren Rad der Dreifachachse des Anhängers

am hinteren Messquerschnitt gemessen. An den anderen Querschnitten liefert dieselbe Achse bei diesem Ereignis ebenfalls die maximale Belastung, jedoch mit $-15,00 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ und $-15,70 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ etwas niedriger.

Die Achsereignisse dieser Überfahrt sind in Tabelle 5.3 mit Index und Spannung aufgelistet. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Spannungswerte manuell aus den Messdaten ausgelesen wurden und nicht automatisch durch das Auswertetool ermittelt.

Tabelle 5.3.: Achsevents für das Fahrzeug Ereignis 26590

Achse-Nr.	MQS-2		MQS-1		MQS-3	
	Index	Spannung $[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}]$	Index	Spannung $[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}]$	Index	Spannung $[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}]$
1	26532	-9,37	26541	-10,07	26551	-13,61
2	26548	-10,38	26557	-9,90	26567	-14,63
3	26575	-13,70	26584	-13,17	26594	-15,67
4	26581	-15,70	26590	-15,00	26600	-18,10
5	26587	-13,24	26596	-13,07	26606	-16,62

Geschwindigkeitsermittlung

Aufgrund des vorliegenden Versatzes zwischen den Messwerten der Querschnitte, kann der zeitliche Abstand ermittelt werden, in dem die Messquerschnitte nacheinander von derselben Achse befahren werden. Da der Abstand zwischen den Querschnitten mit 2,02 m bekannt ist, kann so auf die Geschwindigkeit geschlossen werden. Die Bestimmung der Geschwindigkeit ist notwendig, um fehlerhafte Ereignisse herauszufiltern. Wird eine unrealistische Geschwindigkeit ermittelt, so wird davon ausgegangen, dass das Ereignis ungültig ist. Dies kann z. B. durch Messfehler verursacht werden, die bei der Grenzwertermittlung der Fahrzeugdetektion ein Ereignis auslösen würden. Durch solche Messfehler werden bei der Geschwindigkeitsermittlung sehr hohe Werte berechnet, sodass alle Ereignisse mit einer Geschwindigkeit $> 200 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ herausgefiltert werden. Zur Geschwindigkeitsermittlung eignen sich drei Methoden, welche im Folgenden nacheinander erläutert werden.

Bei der ersten Möglichkeit werden die Indizes der Spannungsspitzen miteinander verglichen. Wird der Abstand der Indizes zwischen dem MQS-2 und MQS-1 aus Tabelle 5.3 ermittelt, so zeigt sich, dass die Maximalwerte von MQS-1 immer 9 Indizes später auftreten. Ebenso liegen die Peaks von MQS-3 jeweils 10 Indizes hinter denen von MQS-1.

Es können so die Geschwindigkeiten berechnet und anschließend der Mittelwert gebildet werden (siehe Gleichung 5.3). Da die Abstände zwischen den MQS jeweils gleich sind, kann zu der Gleichung 5.4 vereinfacht werden. Der Wert 100 dient zur Umrechnung der Indizes (i) in Sekunden und der Wert 3,6 zur Umrechnung von $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ in $\frac{\text{km}}{\text{h}}$.

$$v_{mean} = \frac{\frac{S_{MQS2-1}}{\Delta n_{MQS2-1}/100} + \frac{S_{MQS1-3}}{\Delta n_{MQS1-3}/100}}{2} \cdot 3,6 \quad (5.3)$$

$$= \frac{2 \cdot S}{\Delta n_{MQS2-1} + \Delta n_{MQS1-3}} \cdot 100 \cdot 3,6 \quad (5.4)$$

$$= \frac{2 \cdot 2,02 \text{ m}}{9i + 10i} \cdot 100 \frac{i}{s} \cdot \frac{3600 \frac{s}{h}}{1000 \frac{m}{km}} = 76,5 \text{ km/h}$$

mit: v_{mean} = Geschwindigkeit in $\frac{\text{km}}{\text{h}}$

S_{MQS2-1} = Abstand zwischen MQS-2 und MQS-1 in m

S_{MQS1-3} = Abstand zwischen MQS-1 und MQS-3 in m

S = Abstände der Messquerschnitte in m

Δn_{MQS2-1} = Differenz der Indizes zwischen MQS-2 und MQS-1 in i

Δn_{MQS1-3} = Differenz der Indizes zwischen MQS-1 und MQS-3 in i

Das Problem bei dieser Methode ist die Notwendigkeit, die Achsereignisse zu bestimmen, die vom Algorithmus jedoch nicht automatisch erkannt werden.

Eine einfachere Variante und automatisch durchführbare Methode ist der Vergleich der absoluten Maxima für jeden Querträger. Das bedeutet, dass nicht alle Achsen miteinander verglichen werden, sondern nur die Achse, die den maximalen Spannungswert verursacht. Dieser Vergleich führte jedoch häufig zu Fehlern, da die Maxima von unterschiedlichen Achsen stammten und die falschen Achsenereignisse miteinander verglichen wurden.

Die dritte und zuverlässigste Methode, die jedoch einen höheren Rechenaufwand erfordert, ist die Bildung einer Kreuzkorrelation zwischen den Kurven. Diese kann automatisch durchgeführt werden und wird in dem Auswertetool verwendet. Die Kreuzkorrelation beschreibt die statistische Ähnlichkeit zweier Signale, die zeitlich gegeneinander verschoben werden. Das bedeutet, dass mit einer Kreuzkorrelation der zeitliche Versatz zwischen zwei Kurven bestimmt werden kann. Durch Einsetzen des Versatzes der Kurven in Gleichung 5.4 kann wie bei der ersten Methode die Geschwindigkeit ermittelt werden. Zur genaueren Bestimmung der Geschwindigkeiten werden zusätzlich die Versätze zwischen dem vorderem und mittlerem MQS sowie zwischen dem mittlerem und hinterem MQS ermittelt und daraus der Mittelwert der berechneten Geschwindigkeiten gebildet. Das Ergebnis wird der Fahrzeugeventtabelle hinzugefügt. Für den

oben untersuchten Abschnitt mit dem Index 26590 ergibt sich eine Geschwindigkeit von $76,5 \frac{\text{km}}{\text{h}}$.

Darüber hinaus ist das Verfahren robust gegenüber dem Ausfall einzelner DMS, da die Korrelation zwischen der Umhüllenden der Messwerte der Deckblech-DMS durchgeführt wird. Fällt ein DMS aus, so verringert sich zwar der Korrelationsgrad, die Berechnung ist jedoch weiterhin möglich.

5.5. Analyse der Messergebnisse der QT-DMS

In den bisherigen Unterkapiteln wurden nur die Sensoren am Deckblech betrachtet. In diesem Kapitel werden die Messergebnisse der DMS am Querträger näher untersucht und mit denen der DMS am Deckblech verglichen.

Für eine vereinfachte Orientierung der DMS-Nummern ist in Abbildung 5.8 das in Abschnitt 3.3 vorgestellte Messkonzept für den MQS-1 erneut dargestellt.

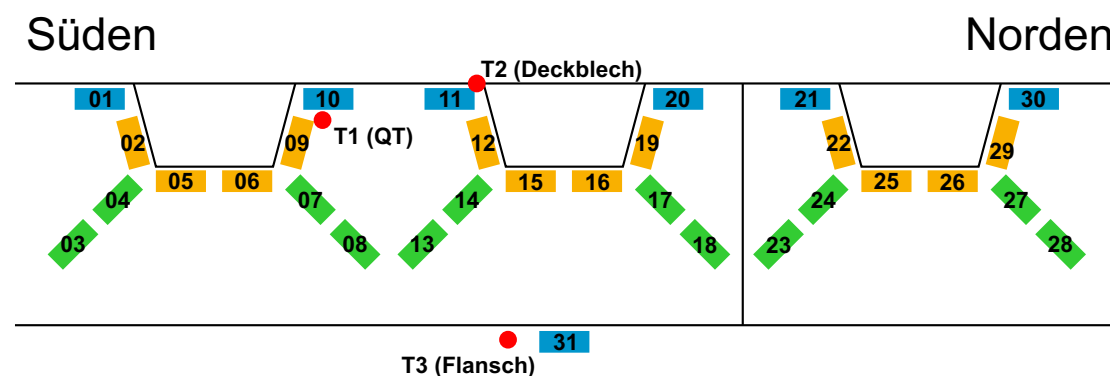


Abbildung 5.8.: Messkonzept an MQS-1

Als Beispiel für die Fahrzeugevents ist das Ereignis mit dem Index 26590 aus dem vorherigen Kapitel gewählt. Der obere Graph in der Abbildung 5.9 zeigt die Messwerte für die minimalen Messergebnisse (Umhüllende) der Dehnungsmessstreifen am Deckblech des MQS-1, welche äquivalent zu den Abbildungen aus dem vorherigen Unterabschnitt 5.3.3 ist. Der MQS-1 wird hier als Referenz herangezogen, da an diesem die meisten DMS montiert sind und die Analyse am umfangreichsten durchgeführt werden kann.

Der untere Graph zeigt die Messergebnisse der inneren grünen DMS des MQS-1. Mit „inneren“ sind die DMS gemeint, die näher an der Längssteife montiert sind (vgl. Abbildung 5.8) und daher quantitativ höhere Messwerte aufweisen. Zusätzlich sind für die

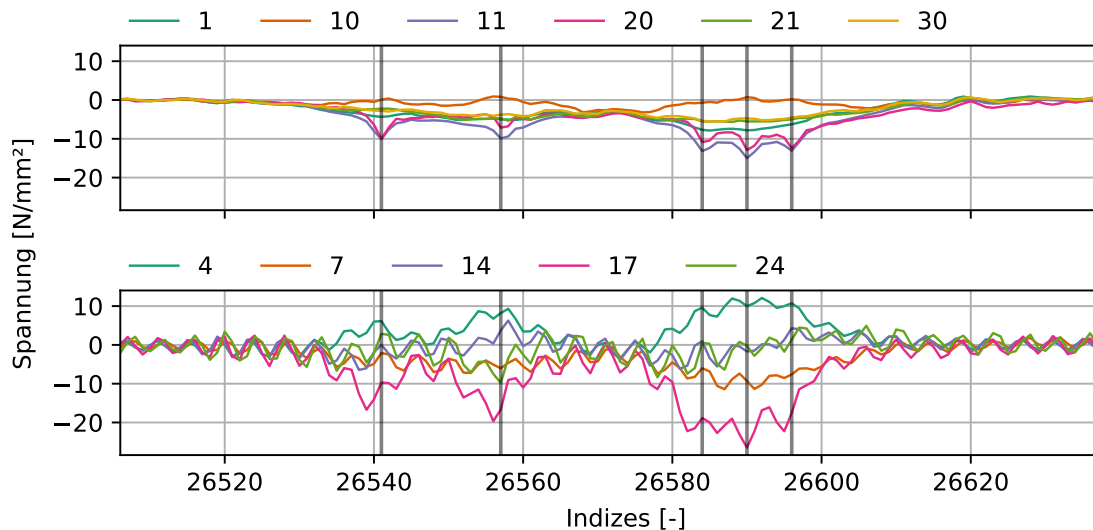


Abbildung 5.9.: Vergleich des QT- und Deckblech-DMS für Index 26590

manuell erfassten Achsevents aus Tabelle 5.3 senkrechte Linien in das Diagramm eingefügt, um die Zeitpunkte zu verdeutlichen. Um die Messwerte besser gegenüber stellen zu können, sind für beide Diagramme die gleichen y-Achsenabstände und Indizes auf der x-Achse gewählt.

Beim Vergleich der Kurven ist auffällig, dass die Sensoren am Querträger permanent Schwingungen aufzeichnen. Die Kurven ergeben sich qualitativ aus der Überlagerung einer sinusförmigen Schwingung und der Auslenkung durch die Belastung. Am Anfang und am Ende eines Events liegen die erfasste Schwingungen der DMS am Querträger mit einer Schwingbreite von etwa $6,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ synchron übereinander. Die Schwingbreite nimmt zu, je näher sich das erste Rad am Messquerschnitt befindet. Durch eine diskrete Fourier-Transformation kann die Eigenfrequenz der orthotropen Fahrbahnplatte mit 24,3 Hz bestimmt werden. Im Anhang A.2 sind die Frequenzspektren für verschiedene QT-DMS einsehbar.

Aus den Messwerten der Dehnungsmessstreifen am Deckblech sind vor dem Ereignis keine Schwingungen erkennbar. Nach dem Event liegen leichte Schwingungen vor, welche jedoch zügig abflachen und sich den Wert $0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ annähern. Es ist davon auszugehen, dass die Schwingungen nicht aktiv durch eine Last, sondern durch die Vibrationen des fahrenden Fahrzeugs verursacht werden. Es ist nicht auszuschließen, dass auch Schwingungen erfasst werden, die nicht mit einem Fahrzeug in der Spur des Messsystems zusammenhängen, sondern von Fahrzeugen auf der linken Fahrspur erzeugt werden. Interferenzen können konstruktive oder destruktive Auswirkungen auf die Messwerte haben, sodass der Einfluss von Schwingungen auf die Ermüdungsberechnung zu ermit-

teln ist. Da das Messsystem jedoch die tatsächliche Ermüdungsbelastung berechnet, werden Interferenzen in dieser Arbeit vernachlässigt.

Eine weitere Besonderheit der Messwerte ergibt sich für die DMS 4 und 10. Diese weisen im Gegensatz zu den anderen Sensoren während des Ereignisses positive Werte auf und deuten somit auf eine Streckung in diesem Zeitbereich hin. Für die Ermüdungsberechnung ist dies jedoch unerheblich, da lediglich die Spannungsschwingbreite von Bedeutung ist.

Werden die Zeitpunkte der Achsevents zwischen den Sensoren am Deckblech und Querträger verglichen, so kann festgehalten werden, dass der maximale Wert des QT-DMS bei allen Achsen, außer beim Index 26590, zeitlich früher detektiert wird. Nachrechnungen ergeben, dass der Maximalwert am Querträger etwa 2 Indizes früher auftritt (0,02 s). Durch Berechnung der Geschwindigkeit in Abschnitt 5.4 mit $76,5 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ lässt sich die geometrische Entfernung zwischen den beiden Positionen, an denen jeweils die Maximalwerte für die Sensoren am Deckblech und Querträger ausgelöst werden, bestimmen. Die Position des Rades liegt 42,5 cm vor der Position, an der das Maximum des Deckblech-DMS erfasst wird. Dieser Wert kann für Analysezwecke in der FE-Berechnung berücksichtigt werden, um die genaue Radposition in Längsrichtung für die Überfahrt des Fahrzeugs zu bestimmen. Nach der FE-Simulation aus Unterabschnitt 4.3.2 beträgt der horizontale Abstand der ungünstigsten Lastpositionen 600 mm.

Im Folgenden werden die Graphen quantitativ untersucht und ein Ansatz zur Bestimmung der Radposition in Querrichtung durchgeführt. Dabei wird der Fokus auf die DMS Nr. 11 und 17 gelegt, da diese jeweils für ihre Gruppe die höchsten Beanspruchungen in diesem Ereignis erfahren.

Die maximale Beanspruchung des DMS 11 mit $-15,0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ wird durch das 2. Rad der Dreifachachse des Anhängers hervorgerufen (vgl. Tabelle 5.3). Dies lässt sich anhand des DMS 17 bestätigen, welcher ebenfalls zu diesem Zeitpunkt den Maximalwert aufweist. Dieser ist mit $-26,48 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ quantitativ höher, als der des Sensors am Deckblech. Aus der Verteilung der Messwerte kann auf die Position des Rades in Querrichtung geschlossen werden. Nach den Messwerten von DMS 11 und DMS 20 zu urteilen, welche diese die höchsten Spannungen aufweisen, muss das Rad über die mittlere Längssteife gefahren sein. Dies bestätigt ebenfalls der am meisten ausgelasteter DMS 17 am Querträger, welcher unterhalb dieser Steife liegt. Im vorhergehenden Unterabschnitt 5.3.4 wurde das Verfahren zur Bestimmung der Position in Querrichtung erläutert und berechnet.

5.6. Erweiterung der Fahrzeugeventintervalle

Bisher wurde der Zeitpunkt des Beginns und des Endes eines Fahrzeugereignisses mit Hilfe der Deckblechsensoren bestimmt. Das Intervall wird durch die Erfassung des ersten Rades durch das Messsystem an dem vorderen MQS und die Erfassung des letzten Rades durch das Messsystem an dem hinteren MQS bestimmt. Für die Ermüdungsberechnung werden für jedes Ereignis nur die Messwerte zwischen diesen Zeitpunkten verwendet. Daher ist es notwendig, die Ereignisse zu erfassen und zeitlich korrekt abzugrenzen.

Wie bereits im vorherigen Abschnitt und aus der Abbildung 5.9 ersichtlich, treten sowohl während, als auch vor und nach der Überfahrt Schwingungen am Querträger auf. In diesem Stadium der Analyse kann noch nicht beurteilt werden, ob die Schwingungen einen Einfluss auf die Ermüdung der Schweißnaht haben. Die Spannungsschwingbreite von $6,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ ergibt sich lediglich aus den Messwerten an den Sensorpositionen. Bei Anwendung des Strukturspannungskonzeptes werden die Spannungen an der Schweißnaht extrapoliert. Daraus ergeben sich größere Spannungsschwingbreiten, die einen Einfluss auf die verursachten Schäden haben können.

Um auch Schwingungen in die Ermüdungsberechnung mit einzubeziehen, wird das Zeitintervall jedes Fahrzeugereignisses um 2 s vor und nach dem Ereignis erweitert. Im Folgenden wird der zusätzliche Zeitraum als „erweitertes Fahrzeugereignis“ bezeichnet. Die Zeit ist eine Annahme und steht unter dem Vorbehalt, dass Schwingungen außerhalb des Zeitintervalls entweder keinem bestimmten Ereignis zugeordnet werden können oder die Schwingungsamplitude trotz Vergrößerung durch einen Spannungsfaktor vernachlässigbar klein ist.

Das Auswertetool ist so konzipiert, dass eine Doppelberechnung von kurz aufeinander folgenden Ereignissen durch eine Anpassung der Zeitpunkte vermieden wird.

6. Ermüdungsberechnung - Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise bei der Ermüdungsberechnung erläutert und mit realen Bedingungen verglichen. Das Vorgehen erfolgt in mehreren Schritten, wobei das Ziel eine Berechnung über die gesamte Laufzeit (11 Monate) ist. Die Schädigung wird zunächst für einen Monat und anschließend für den gesamten Zeitraum untersucht. Es wird zudem darauf eingegangen, welche Rolle unterschiedliche Kerbfallannahmen, sowie die Wahl der verschiedenen ermüdungskritischen Stellen auf den Schädigungsgrad haben.

6.1. Allgemeiner Ablauf

Das allgemeine Vorgehen zur Ermüdungsberechnung ist in Unterabschnitt 2.1.4 erläutert und richtet sich nach [4] und [22]. Die Schädigungsberechnung des Auswertetools kann grob in folgende fünf Schritte unterteilt werden:

1. Ermittlung der Spannungen an ermüdungskritischen Details
 - Anwendung des Strukturspannungskonzeptes über Extrapolation der Spannungen mittels zwei Stützstellen
2. Counting: Anzahl der Schwingbreiten in einem Zeitintervall mittels Rainflow-Algorithmus und einer Schwingbreitenklasse von $1 \frac{N}{\text{mm}^2}$
3. Wöhlerlinie: für jede Klasse die zu erwartende Lastspielzahl getrennt nach Kerbfallklasse berechnen
4. Palmgren-Miner: Schädigungsakkumulation durch Summierung des Quotienten der tatsächlichen Anzahl und Grenzlastspielzahl für jede Schwingbreitenklasse
5. Lebensdauer: Extrapolation der Schädigung auf ein Jahr zur Berechnung der Schweißnahtlebensdauer

Für die Berechnung sind verschiedene Parameter zu berücksichtigen. In der Bewertungsstudie werden diese mit verschiedenen Annahmen verglichen, um Referenzwerte für die endgültige Ermüdungsberechnung zu erhalten. Bei der Auswertung der Messergebnisse kann zwischen folgenden Parametern unterschieden werden, auf die in den nachfolgenden Kapiteln näher eingegangen wird.

- Bezugsgröße der Ermüdungsfestigkeit (Kerbfallklasse)
- Spannungsgröße
 - Sensordaten der inneren DMS
 - Extrapolation anhand SSK
- Position
 - grüne DMS in Querrichtung
 - Vergleich gleicher Positionen auf unterschiedlichen MQS
- Zeitintervall
 - 1 Ereignis
 - 1 Monat
 - 11 Monate (Gesamtzeitraum)

6.2. Wahl der Kerbfallklasse

Die Wahl der Kerbfallklasse hat einen wesentlichen Einfluss auf die ermittelte Lebensdauererwartung. Die Kerbfallklasse gibt an, wie ermüdungsempfindlich das Schweißnahtdetail ist und geht so in die Berechnung ein, dass 1. auch kleine Schwingbreiten einen Einfluss auf die Ermüdung haben und 2. größeren Schwingbreiten ein höherer Einfluss zugeordnet wird. Es gibt zwei Möglichkeiten, ein geschweißtes Bauteil einer Kerbfallklasse zuzuordnen. Zum einen können Versuche durchgeführt werden, um die Lebensdauer eines Details zu bestimmen. Diese Möglichkeit scheidet in diesem Fall aus, da es sich um die Ermittlung der Ermüdung eines realen Bauwerks handelt und keine zerstörende in situ Versuche möglich sind. Zum zweiten sind in der europäischen Norm des Eurocodes 3 für verschiedene Schweißdetails und Bauteilgeometrien Kerbfallklassen angegeben. Damit wird dem Detail eine Ermüdungsanfälligkeit zugeordnet.

Unter Verwendung der Nennspannung zur Ermüdungsberechnung sind in der Entwurfsfassung des Eurocode 1993 Teil 1-9 [22] zwei Arten von Versagensfällen für geschlossene Trapezprofilsteifen aufgeführt. In der ersten Variante wird das Versagen des Grundwerkstoffes im Eckbereich der Längssteife und in der zweiten Variante das Versagen der Schweißnaht selbst dargestellt. Da die Kerbfälle für das Nennspannungskonzept nicht auf die Strukturspannungen übertragen werden können, ist die Kerbfalltabelle B.1 [22] zu verwenden.

Bezüglich den in der Zustandsanalyse unter Abbildung 3.3a aufgeführten Rissen ist zu prüfen, auf welche Rissursache der Schaden zurückzuführen ist. Es treten sowohl Risse an der Verbindungsstelle zwischen Schweißnaht und Längssteife, als auch Risse am

Schweißnahtübergang zum Querträger auf. Nach den in Unterabschnitt 4.3.4 dargestellten von-Mises-Spannungen ist die Entstehung eines Risses im Übergang von der Schweißnaht zur Längssteife wahrscheinlicher als der durch das Messkonzept erfasste Hotspot im Übergang von der Schweißnaht zum Querträger. Darüber hinaus kann nicht abschließend geklärt werden, ob der Rissursprung im Wurzelbereich der Schweißnaht liegt oder ob ein Versagen in der Wärmeübergangszone vorliegt. Da jedoch die von-Mises-Spannungen (siehe Unterabschnitt 4.3.4) in der Schweißnahtwurzel 12,5 % höher sind als am Schweißnahtübergang zum Querträger, kann von einem Rissursprung in der Schweißnahtwurzel ausgegangen werden. Eine Bewertung des Versagens der Schweißnahtwurzel ist jedoch mit der Spannungsberechnung auf Basis des Strukturspannungskonzeptes durch das Messkonzept [23] nicht möglich.

In der oben genannten Kerbfalltabelle für die Strukturspannungen liegt kein Kerbdetail vor, welches die vorliegende Geometrie und Belastungssituation abbildet. Hinsichtlich der Geometrie und der Rissinitiierung kann näherungsweise der in Abbildung 6.1 dargestellte Fall 5 angewendet werden. In diesem Fall stellt das waagerechte Blech den Querträger und das senkrechte Blech die Längssteife dar. Nach der Kerbfalltabelle wäre die Längssteife unbelastet, was jedoch nicht der Belastungssituation entspricht. Der Bezugswert der Ermüdungsfestigkeitskurve $\Delta\sigma_c$ beträgt für diesen Kerbfall $100 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$.

100	0,3		Ⓢ Non load-carrying fillet welds Weld flank angle $\geq 120^\circ$.
-----	-----	--	---

Abbildung 6.1.: Auszug aus Kerbfalltabelle B.1 [22]

Um die Eignung der Kerbfallklasse 100 zu überprüfen, ist die Schädigung über einen Zeitraum zu berechnen, die zu erwartende Lebensdauer des Schweißdetails zu ermitteln und mit dem Rissinitiierungsalter zu vergleichen. Die Lebensdauer entspricht dem Kehrwert der Schädigung und nimmt daher bei größerer Schädigung ab.

Die mit dem Auswertetool festgestellte Schädigung bezieht sich auf die während der Messperiode eingetretene Ermüdung. Für die Berechnung der Lebensdauer eines Bauteils ist es erforderlich, die Werte auf einen längeren Zeitraum zu extrapolieren. Aufgrund der Tatsache, dass der Anteil des Schwerverkehrs in den letzten Jahren zugenommen hat und in den nächsten Jahren weiter zunehmen wird [11], kann eine genauere Aussage getroffen werden, indem die Verkehrsentwicklung in die Ermüdungsberechnung einbezogen wird [8]. Für die folgende Betrachtung wird jedoch von einem über die

Zeit konstanten Schwerverkehrsaufkommen ausgegangen, da die Messstelle vor dem Autobahnkreuz in Fahrtrichtung Dortmund nur den Schwerverkehr der letzten sieben Jahre erfasst und somit keine weitreichende Rückrechnung der Verkehrszahlen in die Vergangenheit möglich ist. Zudem ist die alleinige Betrachtung der Verkehrsmengen nicht ausreichend, da neben der Anzahl der Fahrzeuge auch die in den letzten Jahren gestiegenen Achslasten berücksichtigt werden müssen [8]. Für eine ausreichende Analyse müssen sowohl die Anzahl der Fahrzeuge, als auch die Achslast in Kombination zur Hochrechnung herangezogen werden.

In der Tabelle 6.1 ist die Lebensdauer für ausgewählte Schweißnähte aufgeführt. Die Auswahl basiert auf den maximal geschädigten Schweißnähten jedes Querträgers HS_{18_17}, HS_{40_39}, HS_{53_52}. Auf den Vergleich der Schädigungen der übrigen Schweißnähte untereinander wird in Abschnitt 6.4 eingegangen. Als Hinweis für die Bezeichnung der Hotspots ist zu beachten, dass die Nummer der äußeren DMS an erster Stelle steht, gefolgt von der Nummer der inneren DMS im Bogen der Längssteife. Die berechneten Lebensdauern basieren auf dem zu diesem Zeitpunkt zur Verfügungen stehenden Datensatz über 11 Monate und werden in der Tabelle für die Annahme der Bezugswerte von $50 \frac{N}{mm^2}$, $56 \frac{N}{mm^2}$ und $100 \frac{N}{mm^2}$ aufgeführt.

Tabelle 6.1.: Lebensdauern für ausgewählte Schweißnähte unter verschiedenen Kerbfallannahmen

MQS	Hotspot	Kerbfall		
		50 [a]	56 [a]	100 [a]
MQS-1	18_17 (SSK)	38,4	66,6	3742,9
MQS-2	40_39 (SSK)	17,6	28,9	866,5
MQS-3	53_52 (SSK)	10,5	16,6	357,5
	Mittelwert:	22,2	37,4	1655,6

Als Vorbemerkung zur Interpretation der Tabelle kann gesagt werden, dass die Schweißnähte an den Messquerschnitten unterschiedlich stark geschädigt werden. Die Schädigung wird für MQS-1 etwa halb so groß prognostiziert, als an MQS-2 und MQS-3. Daher ist in der 4. Zeile der Tabelle der Mittelwert der Lebensdauern für alle Messquerschnitte aufgeführt.

Bei Anwendung der Kerbfallklasse 100 würde die Lebensdauer der Schweißnähte als viel zu hoch eingestuft werden. Selbst die höchstbelastete Schweißnaht erreicht eine erwartete Lebensdauer von $357,5 a$, welche deutlich über dem Brückenalter liegt. Würde die Kerbfallklasse 100 zur Zustandsbeurteilung herangezogen, würden rechnerisch keine Risse in den Schweißnähten auftreten. Es ist daher ein bauwerksspezifischer

Kerbfall zu wählen, der das zeitliche Auftreten eines Risses mit der prognostizierten Lebensdauer verknüpft. Der Kerbfall wird also nicht aufgrund der Geometrie und der Belastungssituation gewählt, sondern an die Ermüdungsanfälligkeit zur Rissbildung angepasst.

Nach den Bestandsunterlagen besteht das Bauwerk seit 1972 und ist somit zum Zeitpunkt dieser Arbeit 50 a alt. Der erste sichtbare Riss wurde im Prüfbericht 2002, also bei einem Alter der Brücke von 30 a, festgestellt, wobei frühere Prüfberichte für die Brücke nicht vorliegen. Es ist daher möglich, dass der Riss bereits früher aufgetreten ist. Zudem liegt die Rissinitiation bereits einige Zeit zurück, sodass von einer Schweißnahtlebensdauer von weniger als 30 a ausgegangen werden kann. Im Prüfbericht 2014 ist eine hohe Rissanzahl mit sichtbaren Schäden an 125 Stellen vermerkt (vgl. Abschnitt 3.2). Es ist zu prüfen, nach welcher Zeit der erste Riss aufgetreten und mit welcher rechnerische Lebensdauer der Schweißnähte in Beziehung zu setzen ist. Unter Berücksichtigung einerseits, dass der Riss auch früher entstanden sein könnte und andererseits, dass der Verkehr damals geringer als heute war, wird angenommen, dass der erste Riss an der maximal belasteten Stelle nach 30 a entstanden ist.

Der Mittelwert der Lebensdauer unter Berücksichtigung des Bezugswertes der Ermüdungsfestigkeit beträgt für $50 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ 22,2 a und für $56 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ 37,4 a. Dies bedeutet, dass für die folgenden Untersuchungen zur Auswahl eines geeigneten Bezugswertes die erwartete Lebensdauer zwischen den Kerbfallzahlen 50 und 56 iterativ zu ermitteln ist. Für den Mittelwert der Lebensdauer unter Berücksichtigung der Schädigung der Schweißnähte über den Messzeitraum von 11 Monaten ergibt sich bei einem Bezugswert von $53 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ eine Lebensdauer von 28 Jahren. Dieser Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit wird für die nachfolgenden Auswertungen verwendet, um die Schädigung der übrigen Schweißnähte zu ermitteln und eine Zustandsbewertung durchführen zu können.

6.3. Messdatenbasierte Strukturspannungen an ermüdungskritischen Schweißnähten

In der Tatsache, dass die inneren DMS nicht auf die Schweißnaht geklebt werden können, sind diese in einem gewissen Abstand zur Ausrundung der Längstrapezsteife montiert. Der Abstand des inneren DMS beträgt 15,47 mm, der äußere DMS liegt 14 mm weiter außen, also in einen Abstand von 29,47 mm zum Schweißnahtübergang. Im Folgenden werden zunächst die Spannungen an einer ausgewählten Fahrzeugüberfahrt verglichen und anschließend die Ermüdung bestimmt.

In der Auswertung des FE-Modells in Unterabschnitt 4.3.5 ist der qualitative Verlauf der Strukturspannung und Kerbspannung dargestellt. Da das Messkonzept auf die Anwendung des Strukturspannungskonzeptes ausgelegt ist und die quantitativen Kerbspannungen des FE-Modells aufgrund der auftretenden Singularitäten nicht hinreichend genau sind, werden in der Ermüdungsanalyse ausschließlich die Strukturspannungen σ_{HS} verwendet. Die Strukturspannung am „Hotspot“ kann mittels der Gleichung 6.1 aus den Messdaten ermittelt werden:

$$\sigma_{HS} = \sigma_i - \frac{\sigma_a - \sigma_i}{l_a - l_i} \cdot l_i \quad (6.1)$$

mit: σ_{HS} = Hotspot-Stress in $\frac{N}{mm^2}$
 σ_a = Spannung am äußeren DMS $\frac{N}{mm^2}$
 σ_i = Spannung am inneren DMS $\frac{N}{mm^2}$
 l_a = Abstand des äußeren DMS zum Schweißnahtübergang mm
 l_i = Abstand des inneren DMS zum Schweißnahtübergang mm

Für das Ereignis 26590 zeigt Abbildung 6.2 beispielhaft für die DMS Nr. 17 und 18 die Spannungen am Hotspot auf Basis des Strukturspannungskonzeptes. Die gestrichelten Linien stellen die gemessene Spannung der Sensoren dar und die Kurve der berechneten Spannung σ_{HS} ist durchgezogen.

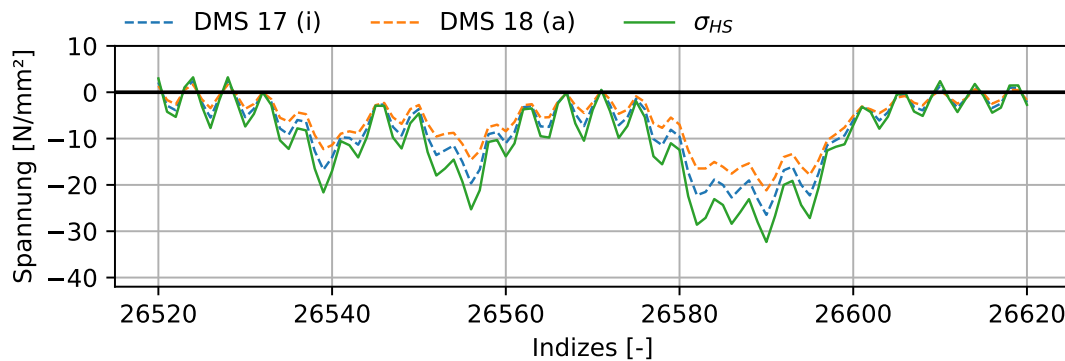


Abbildung 6.2.: Vergleich des inneren und äußeren DMS zur Anwendung des Struktur- und Kerbspannungskonzeptes

Der qualitative Verlauf zeigt, dass die Spannungen am inneren DMS aufgrund des geringeren Abstandes zur Schweißnaht zu jedem Zeitpunkt absolut größer sind als die Spannungswerte am Dehnungsmessstreifens. Daher sind auch die extrapolierten Spannungswerte höher als die der Stützstellen, was eine Voraussetzung für die Anwendung des Strukturspannungskonzeptes ist, da sonst die Spannungen am Hotspot durch die Extrapolation reduziert würden. Vor allem in den Bereichen hoher Beanspruchung ist

eine Abstufung zwischen der äußeren, inneren und Hotspot-Spannung gut erkennbar. σ_{HS} stellt zu jedem Zeitpunkt die betragsmäßig größte Spannung dar.

In der Tabelle 6.2 werden die ausgelösten Spannungen für jede Achse der Fahrzeugüberfahrt tabellarisch aufgelistet, um einen quantitativen Vergleich der Werte zu ermöglichen. In den ersten beiden Spalten sind die an den DMS gemessenen Spannungen angegeben. Die 3. Spalte enthält die berechneten Strukturspannungen, wobei die Werte σ_{HS} aus den DMS Nr. 17 und 18 extrapoliert sind. Spalte vier zeigt das Verhältnis zwischen σ_{HS} und σ_i , um die Zunahme der Strukturspannungen zu veranschaulichen. Alle Spannungen haben die Einheit $\frac{N}{mm^2}$.

Tabelle 6.2.: Vergleich der Sensorwerte und der berechneten Strukturspannungen

Achs-Nr.	18 (a) [$\frac{N}{mm^2}$]	17 (i) [$\frac{N}{mm^2}$]	18_17 (σ_{HS}) [$\frac{N}{mm^2}$]	$V_{HS/i}$ [%]
1	-12,28	-16,72	-21,62	129,3
2	-14,59	-19,67	-25,28	128,5
3	-16,46	-22,23	-28,60	128,7
4	-21,19	-26,48	-32,32	122,1
5	-17,84	-22,27	-27,17	122,0
			Mittelwert:	126,1

Die maximale Spannung wird von der 4. Achse erreicht. Diese beträgt für DMS Nr. 18 (außen) $-21,19 \frac{N}{mm^2}$ und für DMS Nr. 17 (innen) $-26,48 \frac{N}{mm^2}$. Daraus ergibt sich am Hotspot eine Spannung von $-32,32 \frac{N}{mm^2}$, was einer Steigerung von 22,1 % gegenüber der Spannung des inneren DMS entspricht. Für alle 5 Achsen sind die Strukturspannungen am Hotspot im Durchschnitt um 26,1 % höher als die Spannungen an den inneren DMS. Die höheren Spannungen führen zu größeren Spannungsschwingbreiten und damit zu stärkeren Schädigungen, als wenn die Spannungswerte des inneren DMS für die Ermüdungsberechnung verwendet würden.

6.4. Vergleich der Schweißnahtschädigung an unterschiedlichen Messquerschnitten

In diesem Kapitel wird die Schädigung sowohl für die DMS in Querrichtung als auch zwischen den Messquerschnitten unter der Annahme des Bezugswertes für die Ermüdungsfestigkeit von $53 \frac{N}{mm^2}$ und der Spannungsschwingbreiten auf Basis des Strukturspannungskonzeptes untersucht. Es ist zu beachten, dass die Sensoren bei den MQS-2

und MQS-3 in einem größeren Abstand von der Schweißnaht als bei dem MQS-1 angebracht sind. Die Abstände des inneren DMS zur Schweißnaht betragen für den MQS-1 15,47 mm und für MQS-2 und MQS-3 21,96 mm. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass der unterschiedliche Abstand der Sensoren zum Hotspot einen Einfluss auf die Ermüdungsergebnisse hat. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Messwerte für den DMS Nr. 37 und DMS Nr. 36 vertauscht sind, sodass entgegen der Angabe im Messkonzept der DMS Nr. 37 innen und DMS Nr. 36 außen liegt. Die Messwerte der Sensoren 27 und 28 des MQS-1 sind ungültig und werden aus dem Vergleich ausgeschlossen.

Tabelle 6.3.: Vergleich der Schädigung in Querrichtung je MQS im Oktober 2022

		MQS-1 [$\times 10^{-5} \frac{N}{mm^2}$]				
$\Delta\sigma_c$ (SSK)	3_4	8_7	13_14	18_17	23_24	28_27
53	1,52	18,69	9,52	111,73	15,65	
	1 %	17 %	9 %	100 %	14 %	
		MQS-2 [$\times 10^{-5} \frac{N}{mm^2}$]				
$\Delta\sigma_c$ (SSK)	34_33	36_37	40_39		43_42	
53	0,01	51,07	268,01		13,76	
	0 %	19 %	100 %		5 %	
		MQS-3 [$\times 10^{-5} \frac{N}{mm^2}$]				
$\Delta\sigma_c$ (SSK)	47_46	50_49	53_52		56_55	
53	215,70	49,06	402,13		11,74	
	54 %	12 %	100 %		3 %	

Um eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen den Schweißnähten zu gewährleisten, werden in dieser Analyse die Gesamtschäden aller Fahrzeugereignisse für einen Monat, in diesem Fall für den Monat Oktober 2022, berechnet. Wird ein zu kurzer Zeitraum betrachtet (z. B.: 10 Minuten), kann der Anteil der Fahrzeuge, die nicht in der Spur fahren, einen größeren Einfluss haben und somit die Ergebnisse verfälschen. In Tabelle 6.3 sind die Werte für die Hotspot-Spannung der DMS-Paare im Bogen der Längssteife (grüne Farbkodierung nach Abbildung 5.8) aufgeführt. Des Weiteren ist die Tabelle nach Messquerschnitten gegliedert, wobei für jeden MQS in der oberen Zeile die Schädigung am Hotspot und in der unteren Zeile das Verhältnis der Schädigung zum Maximum des jeweiligen MQS angegeben ist. Die Spalten der Einzeltabellen sind so angeordnet, dass hintereinander liegende DMS untereinander stehen.

Zunächst werden die Ergebnisse für MQS-1 in Querrichtung erläutert. Die durch die DMS Nr. 17 und 18 extrapolierten Spannungen am Hotspot, im Folgenden als HS_{18_17} be-

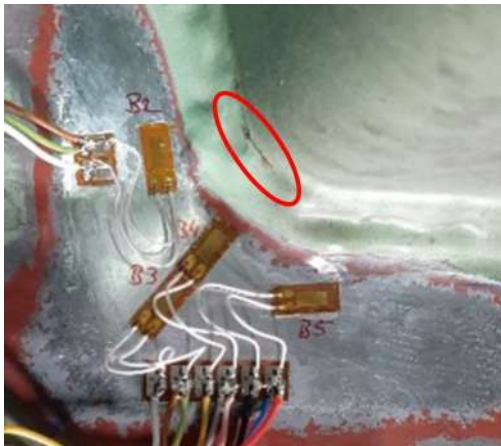
zeichnet, weisen im Vergleich zu den anderen Hotspot-Spannungen an diesem Querträger die maximale Schädigung auf. Unter Annahme des Bezugswertes von $53 \frac{N}{mm^2}$ wird im Oktober 2022 eine Schädigung von $111,73 \cdot 10^{-5}$ erreicht. Die anderen Hotspots weisen Schädigungen zwischen $1,52 \cdot 10^{-5}$ und $18,69 \cdot 10^{-5}$ auf. Die untere Zeile zeigt das relative Verhältnis der Spannungen zu HS_{18_17} . Es ist zu erkennen, dass die am zweitstärksten geschädigte Schweißnaht an Position zwei bei HS_{8_7} liegt und mit 17 % die Schädigung mehr als fünfmal kleiner als bei HS_{18_17} ist. Eine Gaußsche Verteilung und damit eine Abnahme der Schädigung nach außen kann nicht angenommen werden, da HS_{13_14} weniger geschädigt wird als HS_{8_7} . Die Schädigung an der 1. Schweißnaht von links am HS_{3_4} ist bei MQS-1 mit $1,52 \cdot 10^{-5}$ am geringsten und weicht mit einem relativen Verhältnis von nur 1 % deutlich von der maximalen Schädigung ab.

Für MQS-2 weist die Schweißnaht am HS_{40_39} die höchste Schädigung auf. Die Schädigung ist mit $268,01 \cdot 10^{-5}$ etwa fünfmal so hoch wie die zweithöchste Schädigung des HS_{36_37} mit $51,07 \cdot 10^{-5}$. An HS_{34_33} beträgt die Schädigung $0,01 \cdot 10^{-5}$, wobei der auf zwei Dezimalstellen gerundete relative Anteil 0 % der Schädigung des HS_{40_39} entspricht. Die Schädigung an der rechten Schweißnaht ist mit $13,76 \cdot 10^{-5}$ um ein Vielfaches kleiner als der höchst beanspruchte Bereich.

Auch bei MQS-3 ist die Schädigung $402,13 \cdot 10^{-5}$ an der mittleren Längssteife im rechten Bogen des Messsystems am größten. Links davon liegt die Schädigung an HS_{50_49} bei 12 % des Maximums und rechts davon beträgt das relative Verhältnis nur 3 %. Die zweithöchste Schädigung tritt bei MQS-3 bei HS_{47_46} am linken Rand des Messsystems auf und ist mit $215,70 \cdot 10^{-5}$ etwa halb so groß wie bei der Position HS_{53_52} .

Bevor die Schädigung in Querrichtung und für die Messquerschnitte miteinander verglichen werden können, ist zu prüfen, welche Schädigungen an den vom Messsystem überwachten Schweißnähten bereits vorhanden sind und die Spannungen bzw. die ermittelte Schädigung beeinflussen. Bei der Montage des Messsystems wurden Schäden an HS_{3_4} und HS_{33_34} festgestellt, die in Abbildung 6.3 nach dem Aufbringen der Sensoren dargestellt sind. Bei den DMS 3 und 4 ist ein Schaden am Übergang der Schweißnaht zum Längssteifenprofil zu erkennen. Der Riss befindet sich auf der vertikalen Seite des Trapezprofils und nicht, wie bei den anderen bisher gezeigten Rissen, auf der horizontalen Seite unterhalb der Steife. In Abbildung 6.3b ist an zwei Stellen ein Schweißnahtbruch, zum einen an der Unterseite des Trapezprofils und zum anderen im Bereich des HS_{34_33} , zu verzeichnen.

Der Vergleich der Messquerschnitte zeigt, dass überwiegend ähnliche Schädigungsverhältnisse der Schweißnähte an der gleichen Position am Querträger auftreten. Die ma-

(a) Schweißnaht HS_{3_4}(b) Schweißnaht HS_{34_33}**Abbildung 6.3.:** Schweißnahtschäden im Bereich des Messsystems

ximale Schädigung tritt bei allen MQS gleichermaßen an den Positionen HS_{18_17}, HS_{40_39} und HS_{53_52} auf. Ebenso liegen bei allen MQS die Verhältnisse zwischen der maximalen Stelle und der Schweißnaht links davon für MQS-1 und MQS-3 mit 9 % und 12 % bei etwa einem Zehntel. Das Verhältnis zwischen Maximum und Hotspot an dieser Stelle von MQS-2 beträgt ein Fünftel. Damit ist HS_{36_37} im Vergleich zu den Verhältnissen von MQS-1 und MQS-3 stärker geschädigt. Zudem weist die rechte Schweißnaht bei MQS-2 und MQS-3 mit 3 % bzw. 5 % eine sehr geringe Schädigung auf, die jedoch für MQS-1 an dieser Stelle nicht bestätigt werden kann, da die Sensorwerte nicht vorliegen.

Hinsichtlich der Schweißnahttrisse am HS_{3_4} und HS_{34_33} zeigt sich ein deutlicher Unterschied in der ermittelten Schädigung im Vergleich zu MQS-3, wo an dieser Stelle keine Risse auftreten. An den fehlerhaften Schweißnähten wird eine Schädigung ermittelt, die mit $0,01 \cdot 10^{-5}$ und $1,52 \cdot 10^{-5}$ sehr gering ist. Dagegen weist HS_{3_4} an der gleichen Stelle am Querträger eine relativ hohe Schädigung auf. Eine mögliche Erklärung ist, dass die Spannungen aufgrund der Risse nicht weitergeleitet werden können und daher von den Dehnungsmessstreifen nicht gemessen werden, was zu einer geringen ermittelten Schädigung führt. Zusätzlich deuten die Risse an den in Fahrtrichtung hintereinander liegenden Schweißnähten auf eine hohe Belastung in der Vergangenheit hin. Es ist daher davon auszugehen, dass der Steg der linken Längssteife durch die darüber rollenden Räder stark beansprucht wird, was durch die ermittelten Radpositionen in Querrichtung validiert werden kann. Außerdem kann die hohe ermittelte Schädigung der Schweißnaht HS_{47_46} auch darauf zurückzuführen sein, dass bereits nicht sichtbare Schäden in der Schweißnaht vorhanden sind. Beispielsweise könnte ein Riss auf der anderen Seite des Querträgersteges vorliegen, was zu einer Spannungsumlagerung und einer höheren Beanspruchung der Schweißnaht auf der Seite des DMS führt. Welche

Auswirkungen ein Riss auf der anderen Seite des Querträgersteges auf die Beanspruchung des DMS hat, ist durch eine weitere FE-Simulation zu überprüfen und kann im Rahmen dieser Arbeit nicht abschließend beantwortet werden. Die hohe Schädigung an der Position HS_{47_46} lässt jedoch auf eine zeitnahe Rissbildung der Schweißnaht schließen. Zukünftige Bauwerksbegehungen könnten diese Annahme verifizieren.

Beim quantitativen Vergleich der Schäden der MQS untereinander ist ein deutlicher Unterschied zwischen MQS-1 und MQS-2 bzw. MQS-3 erkennbar. Anhand der mittleren Schweißnähte HS_{18_17}, HS_{40_39} und HS_{53_52} ergibt sich ein Unterschied zwischen MQS-1 und MQS-2 von 239 %, sodass die Schädigung an MQS-2 mehr als doppelt so groß ist wie an MQS-1. Im Vergleich des MQS-3 zu MQS-1 ist die Schädigung mehr als dreieinhalbmal so groß. An der Schweißnaht links ist die Schädigung bei MQS-2 und MQS-3 mit $51,07 \cdot 10^{-5}$ und $49,06 \cdot 10^{-5}$ etwa gleich groß, aber immer noch mehr als fünfmal so groß wie bei MQS-1. Theoretisch sollten die in Fahrtrichtung hintereinander liegenden Schweißnähte ähnlich geschädigt sein. Die Ursache für die wesentlich unterschiedliche Schädigung zwischen den Messquerschnitten kann nicht abschließend geklärt werden. Eine denkbare Ursache ist, dass die DMS in unterschiedlichen Abständen zur Längssteife von MQS-1 und MQS-2 montiert sind. Auch wenn der Abstand durch die Extrapolation kompensiert wird, kann er dennoch einen Einfluss auf die unterschiedlichen berechneten Schädigungen haben. Außerdem kann eine unterschiedliche Ausführung der Schweißnähte die Qualität beeinflussen und sich in unterschiedlichen Ermüdungsfestigkeiten und Schädigungsgraden widerspiegeln.

Zusammenfassend kann für die Schädigungsverteilung an den Messquerschnitten festgehalten werden, dass das Schweißnahtdetail an der Stelle des HS_{18_17} von allen Querträgern mit Abstand am stärksten geschädigt wird. Die Schädigung ist mindestens um den Faktor fünf höher als an benachbarten Positionen. Unabhängig von der Anzahl der Fahrzeuge werden die Schweißnähte an dieser Position langfristig deutlich früher versagen. Zusätzlich zeigt die Analyse der ermittelten Schädigungen an HS_{3_4} und HS_{34_33} in Kombination mit den vorhandenen Schäden, dass bestehende Risse die Schadensberechnung beeinflussen und hohe rechnerische Schädigungen auf eine zeitnahe Rissentwicklung hindeuten können.

6.4.1. Vergleich zwischen Schädigungsrate und Radposition in Querrichtung

In diesem Kapitel wird die Überlagerung der Schäden an den Schweißnähten und der ermittelten Radposition in Querrichtung für den Zeitraum eines Monats (Oktober 2022) dargestellt, wobei in diesem Zeitraum insgesamt 73 558 Fahrzeuge über das Messsystem gefahren sind und deren Position bestimmt wird. Abbildung 6.4 zeigt den Schaden und Anzahl der Fahrzeuge in Abhängigkeit der Position auf der lokalen x-Achse. Der Nullpunkt der x-Achse beginnt bei dem linken Steg der linken Längssteife. Das grüne Balkendiagramm gibt den Schaden an dem Schweißnahtübergang im Bogen der Längssteife für MQS-1 an, da an diesem Querträger die meisten Sensoren montiert sind und die relative Querverteilung daher am besten dargestellt werden kann. Für die rechte Schweißnaht HS_{28_27} bei $x = 1476\text{mm}$ liegen keine Schädigungsdaten vor. Die blaue Kurve stellt die Anzahl an Fahrzeuge in Abhängigkeit der jeweiligen Radposition in Querrichtung dar.

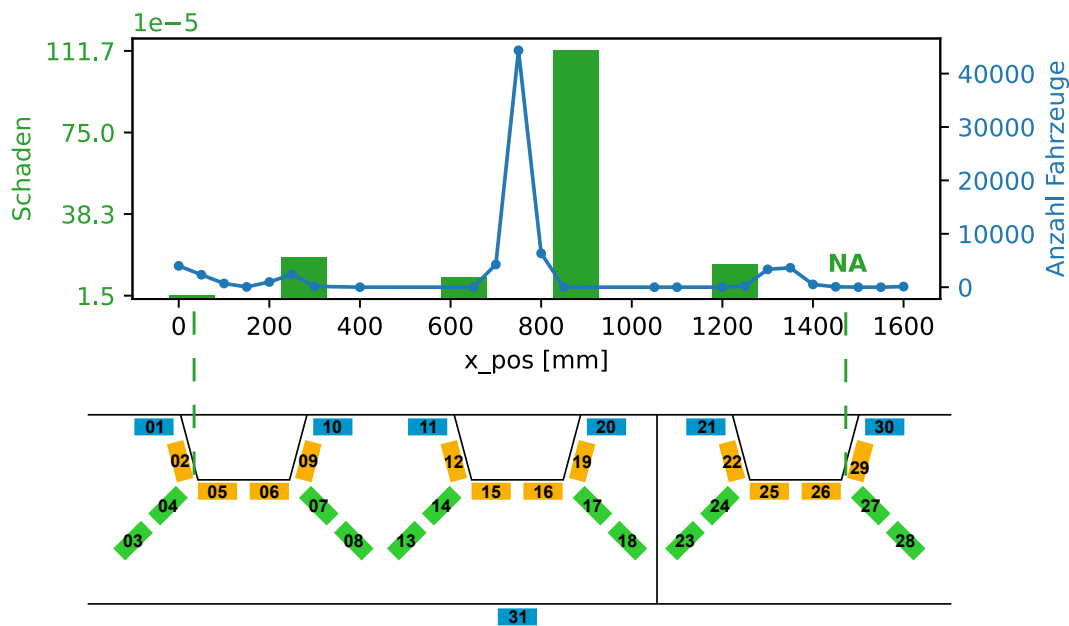


Abbildung 6.4.: Vergleich der Schädigung am MQS-1 und der Radposition in Querrichtung

Die Querverteilung kann qualitativ in vier Bereiche unterteilt werden. Der erste Hochpunkt liegt bei $x = 0$ mit einer Anzahl von 4000 Fahrzeugen, wohingegen der zweite Hochpunkt bei $x = 250$ liegt und eine Fahrzeuganzahl von 2421 aufweist. Der vierte Bereich liegt bei $x = 1350$ und hat eine Anzahl von 3637 Fahrzeugen. Der mit Abstand markanteste Bereich liegt bei $x = 750$ und weist mit 60,3 % der Gesamtzahl der Fahr-

zeuge den höchsten Anteil an Radüberfahrten auf. In der Mitte des Messsystems zwischen $x = 650$ und $x = 850$, die in Querrichtung der Spurrille des linken Reifens auf der Fahrbahn entspricht, liegt eine Gaußverteilung der Radüberfahrten vor. In diesem Bereich werden insgesamt 54957 Belastungen ermittelt.

Die relative Verteilung der Schädigung der einzelnen Schweißnähte wurde bereits im vorhergehenden Abschnitt 6.4 erläutert. Die maximale Schädigung wird am HS_{18_17} erreicht, der im lokalen Koordinatensystem bei $x = 876$ liegt und damit 126 mm von der Position mit der höchsten Anzahl an Radüberfahrten entfernt ist. Die mittlere Längssteife liegt direkt unterhalb der Spurrille der Fahrbahn, was die hohe Beanspruchung der Schweißnaht an dieser Längssteife bestätigt. Unter der Annahme, dass die Bogenbereiche der mittleren Längssteife symmetrisch beansprucht werden, wenn ein Rad mittig über die Längssteife rollt, wäre eine höhere Schädigung des HS_{13_14} zu erwarten, welche jedoch verhältnismäßig gering ausfällt.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Positionsbestimmung aufgrund der geringen Anzahl an Stützstellen bei der Korrelation Ungenauigkeiten unterliegt, sodass eine Verschiebung der Positionsverteilung nicht ausgeschlossen werden kann. Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Schweißnaht am HS_{3_4} eine Schädigung aufweist und daher mit geringeren gemessenen Spannungen am DMS ermittelt werden. Hinsichtlich des Vorliegens des Schadens ist festzustellen, dass in der Vergangenheit eine hohe Belastung durch Fahrzeuge stattgefunden hat und somit der im Diagramm dargestellte Balken bei $x = 29$ zu niedrig. Das lokale Maximum der Fahrzeugverteilung an dieser Stelle deutet auf eine weiterhin erhöhte Beanspruchung der Schweißnähte an dieser Stelle hin.

Eine weitere Übereinstimmung der Schädigung und des vermehrten Auftretens von Radüberfahrten tritt an der Stelle $x = 250$ auf. Hier liegt eine Anzahl von 2421 Fahrzeugen und die zweithöchste Schädigung der Schweißnähte am MQS-1 vor.

Beim Vergleich der Schädigung mit der Häufigkeitsverteilung der Radpositionen kann zusammengefasst werden, dass eine Äquivalenz zwischen der Schweißnaht mit der maximalen Schädigung und der Position in Querrichtung mit der höchsten Anzahl von Fahrzeugen besteht. Die meisten Fahrzeuge mit einem Anteil von mehr als 60 % fahren mittig über das Messsystem, sodass die Schweißnaht der mittleren Längssteife am stärksten beansprucht wird. Ebenso kann an der Position in Querrichtung bei $x = 250$ sowohl eine Zunahme der Anzahl der Fahrzeuge als auch der Beschädigung festgestellt werden. An der Position $x = 0$ kann aufgrund des Schadens an der Schweißnaht eine Äquivalenz zwischen Beschädigung und Fahrzeuganzahl bestehen, welche jedoch nicht im Diagramm dargestellt werden kann.

6.5. Lebensdauerbestimmung und Zustandsprognose für den Gesamtzeitraum

In den bisherigen Untersuchungen wurde die Schädigung nur für den Zeitraum Oktober 2022 ermittelt. Um die Schweißnahtlebensdauer und damit den Zustand des Bauwerks vorherzusagen, muss mit der in dieser Arbeit zur Ermüdungsberechnung verwendeten Palmgren-Miner-Akkumulation untersucht werden, zu welchem Zeitpunkt die Schädigung D den Wert 1 erreicht. In dieser Arbeit sind die gesamten Messdaten des Zeitraumes von 338 Tagen vom 24.06.2022 bis 27.05.2023 ausgewertet. Einige Dateien sind nicht vorhanden, sodass insgesamt 39806 von 48672 Dateien aus diesem Zeitraum vorliegen. Die Rechenzeit beträgt ca. 12 Stunden bei Verwendung des Multiprocessing-Moduls in Python und Aufteilung der Dateien in Arbeitspakete auf 20 logische Prozessoren.

Wie in Abschnitt 6.2 erwähnt, wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass die Anzahl der Fahrzeuge und die Achslast über die Lebensdauer der Brücke in der Vergangenheit und in der Zukunft konstant sind. Die Lebensdauer wird ermittelt, indem die Schädigung des oben genannten Zeitraums von 39806 10-Minuten-Abschnitten auf ein Jahr extrapoliert wird. Anschließend ergibt der Kehrwert der Schädigung die Lebensdauer in Jahren.

In Tabelle 6.4 wird in der 1. Spalte die Lebensdauer der geschweißten Details auf Grundlage der Ermüdungsberechnung für den oben genannten Zeitraum und unter Verwendung des Bezugswertes für die Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c$ von $53 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ dargestellt. Die Lebensdauer wird für die Spannungsschwingbreiten unter Anwendung des Strukturspannungskonzeptes berechnet. Aufgrund der vorhandenen Schweißnahttrisse und der daraus resultierenden geringen Spannungen und berechneten Ermüdung ist die Lebensdauer der Schweißnähte HS_{3_4} und HS_{34_33} in der Tabelle grau markiert. In der 2. Spalte ist die Restlebensdauer unter der Annahme dargestellt, dass das Bauwerk zum Zeitpunkt der Auswertung 50 Jahre alt ist, da die Fertigstellung im Jahr 1972 erfolgte.

Die Schweißnähte weisen je nach Lage unterschiedliche Gesamtlebensdauern auf, die zwischen 13 a für HS_{53_52} und 492 a für HS_{56_55} liegen. Drei Hotspots weisen eine Gesamtlebensdauer auf, die geringer ist als das derzeitige Alter der Brücke, was zu einer negativen Restlebensdauer führt. Nach den quantitativen Werten müssten an den Schweißnähten HS_{53_52} , HS_{40_39} , HS_{47_46} bereits Risse vorhanden sein, die aber noch nicht sichtbar sind. Insbesondere sind die Schweißnähte unterhalb der mittleren Steife

Tabelle 6.4.: Lebensdauer des Schweißnahtdetails

MQS	Hotspot	Lebensdauer [a]	Restlebensdauer [a]
MQS-1	3_4	3549	3499
	8_7	419	369
	13_14	348	298
	18_17	51	1
	23_24	290	240
MQS-2	34_33	456897	456847
	36_37	85	35
	40_39	23	-27
	43_42	462	412
	47_46	33	-17
MQS-3	50_49	100	50
	53_52	13	-37
	56_55	492	442

deutlich gefährdet, weisen aber derzeit noch keine Schäden auf. Weitere Schweißnähte, die in Zukunft Risse aufweisen könnten, sind HS_{18_17}, HS_{36_37} und HS_{50_49}, da diese in Relation zum Bauwerkalter im Vergleich zu den anderen Schweißnähten ebenfalls eine geringe Restlebensdauer von weniger als 50 Jahren haben. HS_{8_7}, HS_{13_14}, HS_{23_24}, HS_{43_42} und HS_{56_55} weisen hohe Restlebensdauern auf, sodass davon ausgegangen werden kann, dass an diese Schweißnähten in Zukunft keine Schäden auftreten werden.

Es ist zu beachten, dass die quantitativen Werte der Restlebensdauerberechnung aus folgenden Gründen anfällig sind. Zum einen wird davon ausgegangen, dass die erste Schweißnaht nach 30 Jahren auftritt und der Referenzwert für die Ermüdungsfestigkeit von $53 \frac{N}{mm^2}$ darauf basiert. Zum anderen werden für die Abstände der Sensoren die Nennmaße zur Extrapolation der Strukturspannung verwendet und nicht zur Berücksichtigung von Klebeungenauigkeiten für jeden Sensor im Einzelfall. Beide Annahmen wirken sich generell auf die Lebensdauerermittlung aus, sodass alle Werte gleichermaßen beeinflusst werden. Darüber hinaus sind bereits sichtbare und unsichtbare Schäden an den Schweißnähten vorhanden, die die Ermüdungsergebnisse durch Spannungsumlagerungen an den Schweißnähten individuell beeinflussen. Außerdem sind die Schweißnähte aufgrund der damals weniger guten Ausführung der Schweißnähte von unterschiedlicher Qualität, wodurch die Ermüdungsanfälligkeit unterschiedlich ist. Eine Zustandsaussage auf der Basis quantitativer Lebensdauern ist daher nicht möglich, jedoch kann eine Versagenswahrscheinlichkeit durch den Vergleich der Schädigung der Schweißnähte getroffen werden. Das bedeutet, dass die Zustandsanalyse nicht pro-

gnostiziert, in welchem Zeitraum eine Schweißnaht reißt, sondern eine Aussage darüber trifft, welche Stellen mit welcher Wahrscheinlichkeit als nächste versagen.

Um dennoch eine zeitliche Vorhersage treffen zu können, ist die Kenntnis die Rissinitiation für die Kalibrierung einer Zeitkomponente relevant. In der Vergangenheit wurde die Zeitkomponente in der Lebensdauerberechnung mit einbezogen, indem das Auftreten des ersten Risses als Maßstab für den Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit verwendet wurde, jedoch ist der Zeithorizont sehr ungenau. Um eine genauere Aussage treffen zu können, muss innerhalb des Messzeitraumes ein Schaden auftreten, sodass die Zeit mit der vorher prognostizierten Lebensdauer verglichen werden kann. Daraus ergibt sich ein Prognose-Ist-Verhältnis, das auch für andere Schweißnähte zur Zustandsbewertung herangezogen werden kann. Wenn beispielsweise HS_{52_53} nach einem Jahr einen Riss aufweist, kann die Prognose für die anderen Schweißnähte neu kalibriert werden, indem das Verhältnis zwischen der berechneten Lebensdauer von HS_{52_53} und der Lebensdauer der anderen Schweißnähte angepasst wird. Eine Möglichkeit, neu auftretende Schäden zu erkennen, ist einerseits die kontinuierliche Bauwerksinspektion und Schadensdokumentation oder andererseits das Messsystem, bei dem die gemessenen Spannungen in Intervallen gemittelt werden und eine abweichende Spannungsdifferenz auf einen Schaden hinweist.

Die Positionen der gefährdeten Schweißnähte müssen mit den vorhandenen Rissen auf der Brücke verglichen werden, um die Zustandsberechnung zu validieren. Eine genaue Dokumentation der Schweißnähte und der Positionen, an denen bereits Schäden festgestellt wurden, ist derzeit nicht verfügbar. Darüber hinaus ist zu beachten, dass das Messsystem die Spurrillen des linken Rades der rechten Fahrspur erfasst und auch unter den anderen Spurrillen mit Schäden zu rechnen ist. Die Schweißnähte unter dem linken Fahrstreifen sollten ab 2015 nicht mehr beansprucht werden, da als Kompensationsmaßnahme zur Einhaltung der Restnutzungsdauer ein Überholverbot für LKW empfohlen worden ist. Ob diese Empfehlung umgesetzt wurde, ist derzeit nicht bekannt. An der Brücke werden defekte Schweißnähte visuell markiert, sodass eine grobe Analyse des Schadensbildes möglich ist. Eine Identifizierung der Markierungen zeigt, dass die Schäden an verschiedenen Stellen der Querträger auftreten, was auf eine unterschiedliche Ausführung der Schweißnähte schließen lässt und eine Zustandsberechnung erschwert. Es müssten sich sonst Pfade unterhalb der Spurrillen ergeben, an denen überproportional viele Schäden auftreten.

Für eine automatische Zustandsbewertung in Form eines Key Performance Indicators lässt sich zusammenfassend festhalten, dass die quantitative Lebenserwartung basierend auf der Schadensakkumulation im Messzeitraum aufgrund verschiedener Einfluss-

parameter eine geringere Aussagekraft hat. Stattdessen ist die prognostizierte Lebensdauer der Schweißnähte miteinander zu vergleichen, um die Versagenswahrscheinlichkeit der Schweißnähte abzuschätzen. Abweichungen in der Qualität der Schweißnahtausführung können jedoch zu Unterschieden in der Lebensdauer führen, die einen Vergleich erschweren. Um ein zeitabhängiges Versagen besser abschätzen zu können, ist zu prüfen, ob während der Messdauer ein Riss auftritt, um dann die berechnete Lebensdauer mit der tatsächlichen Lebensdauer in Zusammenhang zu bringen. Es ist zu beachten, dass der aktuelle, aber nicht sichtbare Zustand der Schweißnaht die gemessenen Spannungen und die daraus abgeleitete Schädigung beeinflussen kann. Nicht sichtbare Risse können zu Spannungsumlagerungen führen und die berechnete Lebensdauer beeinträchtigen. Das Messsystem ermöglicht die Identifizierung gefährdeter Schweißnähte, die sich vorwiegend im rechten Bogen der mittleren Längssteife befinden.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Zunächst erfolgte eine Bestandsanalyse des Bauwerks durch Beschreibung der Tragkonstruktion und der Schäden. Bei dem Überbau handelt es sich um eine orthotrope Fahrbahnplatte mit eingepassten Längssteifen, die mit dem Querträger verschweißt sind, was zu einer Vielzahl ermüdungskritischer Schweißnähte führt. Die Schäden befinden sich insbesondere in den abgerundeten Eckbereichen der Längssteifen, welche Risse in den Schweißnähten am Übergang zum Querträger aufweisen. Um die Ermüdung der Schweißnähte anhand der Spannungen quantifizieren zu können, wurde in früheren Untersuchungen ein Messsystem an der Brücke montiert. Insgesamt sind drei Querträger mit insgesamt 57 Sensoren ausgestattet, wobei insbesondere zwei DMS-Gruppen zum einen der Erfassung und Lokalisierung der Fahrzeuge und zum anderen zur Ermittlung der Spannungen an den Schweißnähten im Bogenbereich der Längssteifen unter Anwendung des Strukturspannungskonzeptes dienen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zunächst eine FE-Simulation der Brücke durchgeführt. Für die Erstellung eines umfassenden Gesamtmodells der Brücke wurden die vorhandenen Bestandsunterlagen als Vorlage verwendet. Um den Bereich, in dem die Messsensoren montiert sind, genauer betrachten zu können, wurde aus dem Gesamtmodell ein Submodell mit feinmaschigen Volumenelementen abgeleitet. Anschließend hat der Vergleich der Belastungssituation mit einem Rad und mit zwei Rädern gezeigt, dass die Anordnung eines einzelnen Rades ausreichend genau ist, um die ungünstigste Position der Last in Längs- und Querrichtung sowie die Position des Fahrzeugs zu bestimmen. Weiterhin wurde festgestellt, dass mit zunehmendem Abstand des Rades vom Querträger die Spannungen an den zu untersuchenden Schweißnähten ansteigen, da die Last in diesem Fall vollständig über die Längssteife abgeleitet wird und kein Lastanteil vom Querträger aufgenommen wird. Durch die Untersuchung eines rollenden Rades konnte festgestellt werden, dass eine Positionierung des Rades 0,8 m vor dem Querträger zu maximalen Spannungen in den kritischen Bereichen führt. Um die Position des Fahrzeugs in Querrichtung zu bestimmen, wurde ein Rad an mehreren Positionen in Querrichtung positioniert, wodurch Einflusslinien generiert wurden, um diese mit den Messergebnissen korrelieren zu können.

Die Auswertung der Messergebnisse erfolgt durch die Analyse eines Messzeitraumes von 11 Monaten. Wichtiger Bestandteil dieser Arbeit ist ein Softwaretool zu entwickeln, um die Daten effizient auszuwerten. In einem ersten Schritt werden die Rohdaten

der Dehnungsmessstreifen durch eine Temperaturkompensation aufbereitet. Anschließend wurden statistische Triggerwerte verwendet, um eine Ereignisprotokollierung zu implementieren, die die Überfahrten von Fahrzeugen des Schwerverkehrs zeitlich abgrenzt. Das Ziel der Ergebniserfassung ist die Reduzierung der auszuwertenden Datenmenge und die Erfassung der Schäden an jedem einzelnen Fahrzeug. Durch die Anordnung der Sensoren an drei hintereinander liegenden Messquerschnitten kann durch eine Kreuzkorrelation der Messergebnisse auf die Fahrzeuggeschwindigkeit geschlossen werden. Dies dient der nachträglichen Bestimmung der Längsposition des Fahrzeuges.

Das Hauptziel ist die messdatenbasierte Zustandsbewertung der Schweißnahtermüdung an ausgewählten Stellen, wobei die extrapolierten Spannungen unter Anwendung des Strukturspannungskonzeptes verwendet werden. Ein Vergleich der prognostizierten Lebensdauern mit den tatsächlichen Schäden an der Brücke zeigt, dass die Tabellen der aktuellen Normung das ermüdungskritische Detail nicht realistisch abbilden und daher nicht angewendet werden können. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher ein bauwerksspezifischer Kerbfall ermittelt, um die Schädigung und Lebensdauer der einzelnen Schweißnähte zu berechnen und die Ergebnisse zu kalibrieren. Für die Positionsbestimmung wurde festgestellt, dass die häufigste Radposition in Querrichtung mit der Ermüdung der Schweißnähte übereinstimmt und eine Korrelation zwischen Lasteinleitung und Schädigungsrate aufweist. Da mehr als 60 % der Fahrzeuge über die mittlere Längssteife des Messsystems fahren, sind die darunter liegenden Schweißnähte einer hohen Ermüdungsbelastung ausgesetzt. Aufgrund der unterschiedlichen Ausführungsqualität der Schweißnähte ist eine zeitliche Angabe der Lebensdauer eingeschränkt. Die zeitliche Prognose eines Schadens ist nur unter Annahmen möglich, weshalb die Zustandsprognose durch eine Versagenswahrscheinlichkeit der Schweißnähte im Vergleich zu anderen Positionen ausgedrückt wird. Ein erhöhtes Ermüdungsrisiko weisen in der Analyse Schweißnähte auf, an denen an gleicher Lage bereits Schäden aufgetreten sind.

Weitere Untersuchungen können sich auf die Erkennung von Schäden durch kontinuierliche Analyse der Messdaten konzentrieren. Beispielsweise würde eine zeitliche Mittelung der Spannungsschwingbreiten und die Feststellung eines Spannungsabfalls auf Schäden hinweisen. Ebenso kann das FE-Modell mit den quantitativen Spannungen durch eine Kalibrierfahrt validiert werden, da die Position und die Laststellung bei der Überfahrt bekannt sind und mit dem FE-Modell nachgebildet werden können. Mit Hilfe eines neuronalen Netzes könnten effizient Rückschlüsse auf das Fahrzeuggewicht und die daraus resultierenden Ermüdungsschäden gezogen werden. Darüber hinaus

kann die Analyse der Eigenfrequenzen fortgesetzt werden, woraufhin in einer Langzeitstudie die kontinuierliche Frequenzänderung untersucht werden kann, um mögliche Rückschlüsse auf schadensbedingte Strukturveränderungen ziehen zu können.

In dieser Arbeit wurde ein Auswertetool entwickelt, das eine effiziente Ermüdungsrechnung ermöglicht und als Grundlage für weiterführende Untersuchungen dienen kann. Insgesamt werden wichtige Erkenntnisse über den Ermüdungszustand der kritischen Schweißnähte der Brücke gewonnen, die eine Abschätzung der Lebensdauer und möglicher Schädigungen ermöglichen.

Literatur

- [1] M. Feldmann, B. Eichler und S. Schaffrath, *Umdruck zur Vorlesung Stahlbau II*, Aachen, 2012.
- [2] W. Lohse, J. Laumann und C. Wolf, *Stahlbau 2*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. DOI: 10.1007/978-3-8348-2116-4.
- [3] J. Laumann u. a., *Petersen Stahlbau*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022. DOI: 10.1007/978-3-658-20510-2.
- [4] *DIN EN 1993-1-9:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung; Deutsche Fassung EN 1993-1-9:2005 + AC:2009*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2010. DOI: 10.31030/1722660.
- [5] A. F. Hobbacher, *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*. Paris: International Institute of Welding, 2008.
- [6] M. Mensinger und A. Hahn. „Zur Anwendung des Strukturspannungskonzeptes beim Ermüdungsnachweis nach EN 1993-1-9,“ Lehrstuhl für Metallbau, Technische Universität München. (2014).
- [7] FVA Forschungsvereinigung Antriebstechnik, *Zählverfahren zur Bildung von Kollektiven und Matrizen aus Zeitfunktionen, FVA-Richtlinie*, 2010.
- [8] M. Fechner, *Zur Berechnung der orthotropen Fahrbahnplatte unter Radlasten und der nachträglichen Verstärkung mit kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff*, de, 2017. DOI: 10.18453/ROSDOK_ID00002321.
- [9] *DIN EN 1993-2:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 2: Stahlbrücken; Deutsche Fassung EN 1993-2:2006 + AC:2009*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2010. DOI: 10.31030/1719422.
- [10] G. Sedlacek und Paschen Michael, „Untersuchung zur nachhaltigen Instandsetzung von orthotropen Fahrbahnplatten,“ in *Expertengespräch Instandsetzung orthotroper Fahrbahnplatten*, BAST, Hrsg., Bergisch Gladbach, 2005, S. 18–35.
- [11] U. Kuhlmann, S. Bove und M. Hubmann, „Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-2-Schäden,“ *Stahlbau*, Jg. 86, Nr. 7, S. 574–586, 2017. DOI: 10.1002/stab.201710507.
- [12] Gert Albrecht, „Entwicklungsgeschichte der orthotropen Fahrbahnplatte,“ in *Expertengespräch Instandsetzung orthotroper Fahrbahnplatten*, BAST, Hrsg., Bergisch Gladbach, 2005, S. 3–9.

-
- [13] K. Geißler, *Handbuch Brückenbau: Entwurf, Konstruktion, Berechnung, Bewertung und Ertüchtigung*. John Wiley & Sons, 2014.
- [14] Regionalverband Ruhr, Hrsg., *Luftbild Autobahnkreuz Dortmund Unna*, 2022. Adresse: <https://luftbilder.geoportal.ruhr/> (besucht am 30. 05. 2023).
- [15] *Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil: Querschnitt (kurz RAS-Q)*, Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 1996 (außer Kraft seit 2013).
- [16] Google Earth, Hrsg., *Satellitenbild Autobahnkreuz Dortmund Unna*, 2020. Adresse: <https://earth.google.com/> (besucht am 30. 05. 2023).
- [17] SIMULIA. „Abaqus/CAE User’s Guide.“ (2016), Adresse: <http://62.108.178.35:2080/v2016/books/usi/default.htm> (besucht am 30. 05. 2023).
- [18] *DIN EN 1991-2:2010-12, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken; Deutsche Fassung EN 1991-2:2003 + AC:2010*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2010. DOI: 10.31030/1723953.
- [19] BAST. „Automatische Zählstellen 2021, Dauerzählstelle: Unna-Süd.“ (2021), Adresse: https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Aktuell/zaehl_aktuell_node.html?nn=1819516&cms_detail=5135&cms_map=0 (besucht am 07. 06. 2023).
- [20] A. Brandt, G. Jentzsch und A. Pradka, *EDDI - Elektronische Deichsel - Digitale Innovation, Kurzbericht mit Ergebnispräsentation*, 2019.
- [21] vectorpocket. „Cargo sattelschlepper mit anhängen realistische vektor.“ (o.D.), Adresse: https://de.freepik.com/vektoren-kostenlos/cargo-sattelschlepper-mit-anhaenger-realistische-vektor_1371857.htm (besucht am 08. 06. 2023).
- [22] *DIN EN 1993-1-9:2023-03-00, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung; Deutsche und Englische Fassung prEN 1993-1-9:2023*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2023. DOI: 10.31030/3412135.
- [23] Stefan Einbock. „Übersicht über die wichtigsten Methoden zur Berechnung von Schweißnähten nach dem Strukturspannungskonzept.“ (o.D.), Adresse: <https://www.einbock-akademie.de/die-wichtigsten-methoden-zur-berechnung-von-schweissnaehten-nach-dem-strukturspannungskonzept/> (besucht am 01. 06. 2023).

A. Anhang

A.1. Programmablaufplan Analysetool

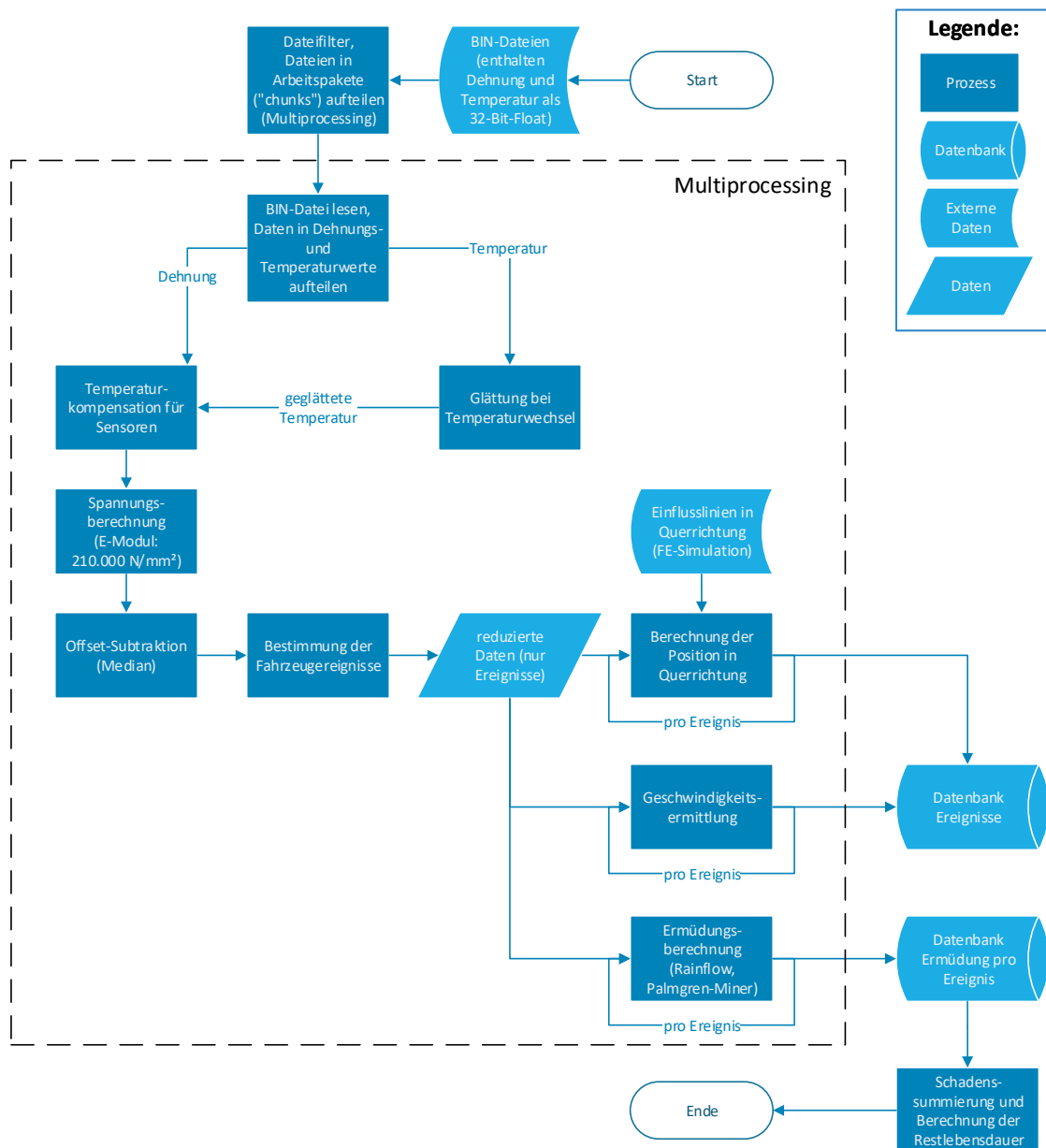


Abbildung A.1.: Grobes Ablaufdiagramm des Analysetools

A.2. Fourier Transformation

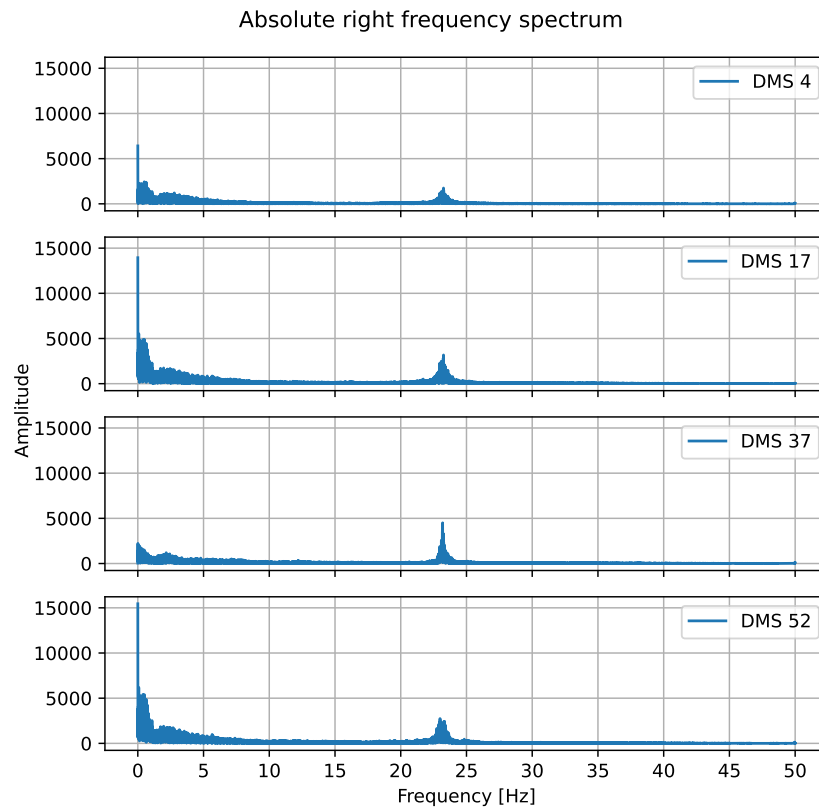


Abbildung A.2.: Frequenzspektren für maximal belastete QT-DMS innerhalb eines 10-Minuten-Abschnitts

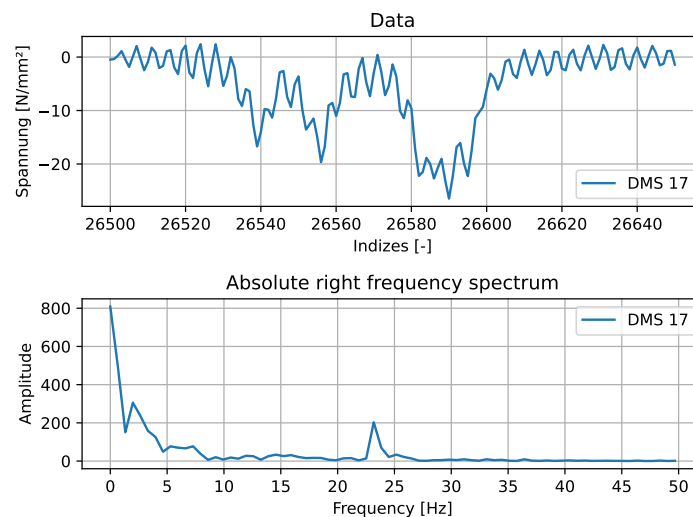


Abbildung A.3.: Frequenzspektrum für DMS 17 während eines Fahrzeugereignisses