



Spureinfluss beim Ermüdungsnachweis orthotroper Fahrbahnplatten von älteren Bestandsbrücken

Masterarbeit

verfasst von

Armin Grgic

eingereicht am

**Institut für Stahlbau
Technische Universität Graz**

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Unterweger

mitbetreuender Assistent

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Friedrich Novak

Graz, Juni 2017

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die in den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Danksagung

Ich bedanke mich bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Harald Unterweger und Univ. Ass. Dipl.-Ing Friedrich Novak zum einen für die Möglichkeit, dass ich am Institut für Stahlbau meine Masterarbeit verfassen durfte, und zum anderen für die Hilfestellung und Betreuung bei der Abfassung der Arbeit.

Weiterhin möchte ich mich bei meinen Eltern und meiner Freundin bedanken, denn ohne ihre Unterstützung wäre ich niemals fertig geworden.

Kurzfassung

Bei weitgespannten Brückentragwerken ist die Fahrbahnplatte häufig als stählerne orthotrope Platte ausgeführt, da diese ein geringes Eigengewicht im Vergleich zu einer Stahlbetonkonstruktion aufweist. Vor Allem in den 1960er und 1970er Jahren wurden im europäischen Raum viele Straßenbrücken mit orthotroper Fahrbahnplatte gebaut. Damals war bei der statischen Berechnung und konstruktiven Auslegung der Platten lediglich die Standsicherheit berücksichtigt worden. In den letzten Jahren wurden allerdings immer mehr Schäden an einigen Bestandsbrücken mit orthotroper Fahrbahnplatte entdeckt, welche auf mangelnde Ermüdungssicherheit zurückzuführen sind. Dieser Sachverhalt macht eine Beurteilung der Restlebensdauer von Bestandsbrücken bezüglich Ermüdung erforderlich. Der Eurocode stellt hierfür Ermüdungslastmodelle bereit, wobei davon ausgegangen wird, dass alle Fahrzeuge die Brücke mit zentrischer Spurlage überfahren. Die Fahrzeugtypen des Ermüdungslastmodells nach Eurocode stellen eine realitätsnahe Abbildung des tatsächlichen Schwerverkehrs dar. Die Geometrien der Einzelachsen der Fahrzeuge hingegen benötigen eine Anpassung, um die sehr lokalen Beanspruchungen in den Kerbdetails zutreffend abbilden zu können. Zur Berücksichtigung des Fahrspurverhaltens gibt der Eurocode in weiterer Folge eine Häufigkeitsverteilung in Brückenquerrichtung an.

Diese Masterarbeit liefert Aufschluss über den Einfluss des Fahrspurverhaltens, sowie Berücksichtigung realitätsnaher Achsgeometrien der Fahrzeuge, auf die Ermüdungswirkung zweier wesentlicher Kerbdetails an orthotropen Platten mit offenen Längsrippen. Hierfür wurden umfangreiche Berechnungen an einem FEM-Modell durchgeführt. Das FEM-Modell umfasst einen Brückenausschnitt einer Bestandsbrücke mit offenen Längsrippen zwischen 2 Hauptträgern. Zusammenfassend wird die Ermüdungsbeanspruchung, an der Anschlussnaht der Längsrippe zum Deckblech, durch Berücksichtigung des Fahrspurverhaltens und realitätsnaher Achsgeometrien, um 11% bis 13% reduziert. An der Anschlussnaht der Längsrippe an den Querträger konnte abschließend eine Erhöhung der Ermüdungswirkung, infolge dieser Effekte, um 3% bis 6% festgestellt werden.

Abstract

Wide-spanned bridges are often designed with orthotropic steel decks because they provide less dead load compared to reinforced concrete decks. Especially in the 1960s and 1970s many road bridges with orthotropic steel decks were built. Back then only the structural behaviour was taken into account of the steel bridge deck design. In the past few years an increasing number of damages at existing bridges with orthotropic decks have been detected. These damages are caused by insufficient fatigue life of these existing bridges. The Eurocode provides standard-fatigue load models, which presume that all vehicles are crossing the bridge in the center of the lane. The vehicle types of the standard-fatigue load models according to the Eurocode represent a realistic depiction of the real heavy traffic. On the contrary the geometries of the single axles of the vehicles need an adaption to depict the correct local stresses in the notch-details. To take the lateral shift of the vehicles into account, the Eurocode uses a frequency distribution in cross direction of the bridge.

This master thesis offers valuable clues to the influence of the lateral shift of the vehicles, as well as the consideration of realistic axle-geometries of the vehicles, to the fatigue effect of two essential notch-details of the orthotropic plate with open longitudinal ribs. Therefore extensive calculations on an FEM-Model were executed. The FEM-Model consists of a part of an existing bridge with open longitudinal ribs between two main girders. In summary the fatigue stress at the welded joint between the longitudinal rib and the deck plate can be reduced by 11 to 13 percent due to the consideration of the lateral shift and realistic axle geometries. At the welded joint of the longitudinal rib to the cross girder, the fatigue effect increases by 3 to 6 percent under consideration of the analyzed effects.

Inhaltsverzeichnis

0	EINLEITUNG.....	1
1	PROBLEMSTELLUNG.....	3
2	STAND DER TECHNIK.....	6
2.1	Ermüdungslastmodell 4.....	7
2.2	Nachweis auf Ermüdung.....	10
3	MOTIVATION DER ARBEIT	14
3.1	Berücksichtigung der realen Achsgeometrie.....	14
3.2	Berücksichtigung einer Häufigkeitsverteilung zum Fahrverhalten in der Spur	17
3.2.1	Häufigkeitsverteilung nach Blab	18
3.2.2	Häufigkeitsverteilung nach EN 1991-2.....	22
4	GRUNDKONZEPT DER ARBEIT	23
4.1	Beschreibung der Detailpunkte D1 und D2.....	27
4.2	Zentrische Überfahrt der Fahrzeuge nach ELM 4	30
4.3	Querverteilungseinflusslinie in Brückenquerrichtung.....	31
5	ERGEBNISSE BEZÜGLICH ZENTRISCHER ÜBERFAHRT UND BERÜCKSICHTIGUNG DER REALEN ACHSGEOMETRIE.....	34
5.1	Detail D1	35
5.1.1	Darstellung der Spannungseinflusslinien infolge zentrischer Überfahrt aller Achsen	35
5.1.2	Darstellung der Spannungs-Zeitverläufe für Detail D1 infolge zentrischer Überfahrt aller Fahrzeuge.....	37
5.1.3	Gesamtkollektiv für Detail D1 aus ELM 4- zentrische Überfahrt	42
5.1.4	Darstellung der Querverteilungseinflusslinie für Detail D1	44
5.1.5	Gesamtkollektiv für Detail D1 unter Berücksichtigung der realen Achsgeometrie	46
-Fall 1 – Achse A, C mittig und Achse B versetzt	48	
-Fall 2 – Achse B mittig und Achse A, C versetzt	52	
5.2	Detail D2	56
5.2.1	Darstellung der Spannungseinflusslinien infolge zentrischer Überfahrt aller Achsen	56
5.2.2	Darstellung der Spannungs-Zeitverläufe für Detail D2 infolge zentrischer Überfahrt aller Fahrzeuge.....	58
5.2.3	Gesamtkollektiv für Detail D2 aus ELM 4- zentrische Überfahrt	63
5.2.4	Darstellung der Querverteilungseinflusslinie für Detail D2	65
5.2.5	Gesamtkollektiv für Detail D2 unter Berücksichtigung der realen Achsgeometrie	67

-Fall 1 – Achse A, C mittig und Achse B versetzt	69
-Fall 2 – Achse B mittig und Achse A, C versetzt	73
5.3 Zusammenfassende Beurteilung	77
6 ERGEBNISSE BEZÜGLICH REALER ACHSGEOMETRIE UND EINER HÄUFIGKEITSVERTEILUNG IN BRÜCKENQUERRICHTUNG	78
6.1 Ergebnisse für Detail D1	78
6.1.1 Häufigkeitsverteilung nach Blab für Detail D1 und Achse C um 160mm versetzt	79
6.1.2 Häufigkeitsverteilung nach EN 1991-2 für Detail D1 und Achse C um 160mm versetzt.....	82
6.2 Ergebnisse für Detail D2	85
6.2.1 Häufigkeitsverteilung nach Blab für Detail D2 und Achse C um 160mm versetzt	86
6.2.2 Häufigkeitsverteilung nach EN 1991-2 für Detail D2 und Achse C um 160mm versetzt.....	89
6.3 Zusammenfassende Beurteilung	92
A ANHANG A : FEM- MODELL AUS ABAQUS.....	95
A.1 Brückendeck der Straßenbrücke.....	95
A.2 Modellierung der Fahrbahnplatte	98
A.2.1 Materialeigenschaften der Brückendecke	98
A.2.2 Bauteile der Brückendecke	98
A.2.3 Schalenelemente	98
A.2.4 Stabelemente.....	99
A.2.5 Volumenelemente	99
A.2.6 Netzaufstellung.....	100
A.2.7 Verbindung der Bauteile-Kopplungsbedingungen.....	102
A.2.8 Darstellung der Lagerung.....	103
B LITERATURVERZEICHNIS	104

0 Einleitung

Anfang des 20. Jahrhunderts war das größte Problem bei weitgespannten Brücken die Lastabtragung des Eigengewichtes. Weiteres nahmen die Achslasten der Schwerfahrzeuge und deren Häufigkeit in Laufe der Zeit immer mehr zu. Das führte zur Entwicklung und Ausarbeitung der orthotropen Platten, welche hohe statische Tragreserven bei geringerem Eigengewicht aufweisen. In den 60-er Jahren wurden besonders viele Fahrbahnplatten von Straßenbrücken als orthotrope Platten gebaut. Unter einer orthotropen Platte versteht man ein Fahrbahnblech, das durch angeschweißte Längsrippen und Querträger orthogonal ausgesteift ist. Das Wort orthotrop kommt von "orthogonal anisotrop". In der Vergangenheit wurde nur der Nachweis der statischen Tragsicherheit für diese Tragwerke ausgeführt und das Ermüdungsverhalten wurde nicht betrachtet.

Nach der EN 1993-2 [10] wird aktuell eine Deckblechschlankheit von $\frac{e_{LR}}{t_{DB}} \leq 25$ im Fahrbereich vorgeschlagen. Dieses Verhältnis ist bei den meisten älteren Brücken berücksichtigt. Für diese Arbeit wurde eine Brücke betrachtet, deren Deckblechschlankheit über 25 ist. Es wurden die geometrischen Abmessungen der Fahrbahnplatte der Praterbrücke gewählt mit einer Deckblechschlankheit von $\frac{e_{LR}}{t_{DB}} = 36$ um ältere Bestandsbrücken abzudecken, wo das empfohlene Verhältnis $\frac{e_{LR}}{t_{DB}} \leq 25$ nicht eingehalten ist (siehe Abbildung 1).

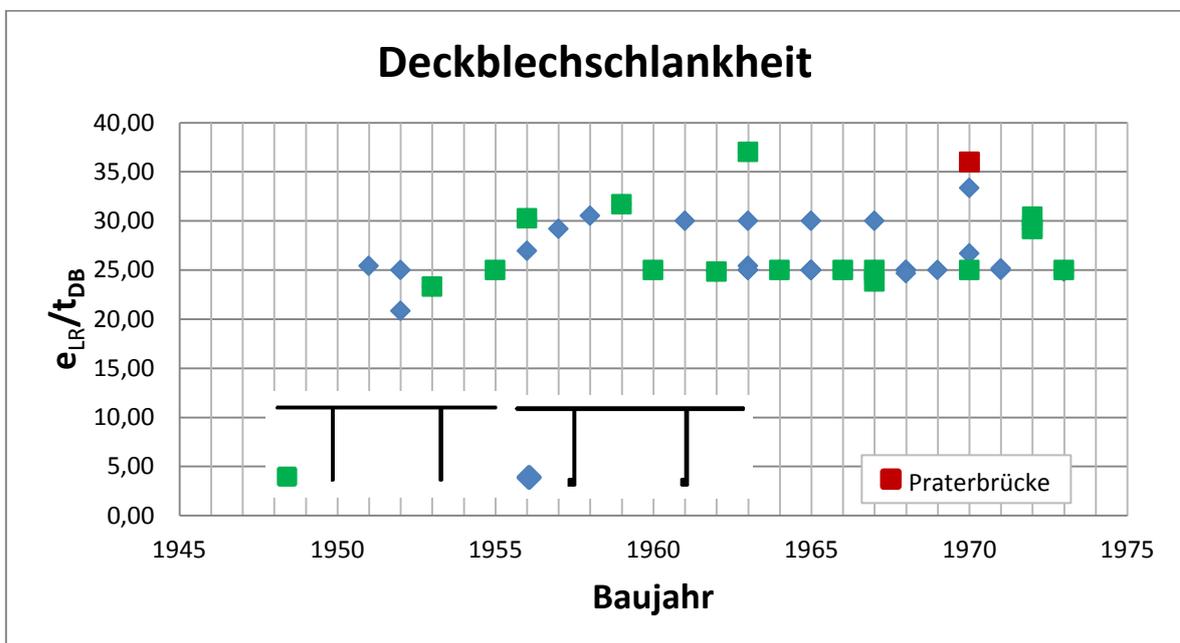


Abbildung 1: Deckblechschlankheit durch die Geschichte [5]

Abbildung 1 zeigt die Deckblechschlankheit von Bestandsbrücken mit orthotroper Fahrbahnplatte und offenen Längsrippen. Die gewählte Bestandsbrücke (Praterbrücke) stellt mit ihrer Deckblechschlankheit einen oberen Grenzwert dar, womit der Großteil der Fahrbahnplatten dieser Bauweise, mit offenen Längsrippen, abgedeckt ist.

Mit der Zeit ist die Anwendung der orthotroper Platten größer geworden und die Verkehrslasten bei den Straßenbrücken haben sich um einiges vergrößert. Die Lastspiele haben sich um ein Vielfaches erhöht und das führte zu einer Anforderung von Ermüdungsbetrachtungen und Ermüdungsnachweisen.

Heute gibt es im Eurocode EN 1993-2 [10] Vorgaben für die Berechnung des Ermüdungsverhaltens von Stahlbrücken. In der Norm EN 1991-2 [7] gibt es Angaben wesentlicher Ermüdungslastmodelle zur Durchführung von Ermüdungsnachweisen an Stahlbrücken. Bei den Straßenbrücken gibt es fünf verschiedene Ermüdungslastmodelle und in dieser Arbeit wurde das Ermüdungslastmodell 4 (ELM 4) angewendet um die sehr lokalen Spannungen an den Kerbstellen der Stahlkonstruktion realitätsnah ermitteln zu können. Ermüdungslastmodell 3 (ELM 3) ist dafür nicht geeignet.

1 Problemstellung

Es gibt in Europa noch immer viele stählerne Straßenbrücken mit großen Spannweiten, deren orthotrope Platten noch immer der Bauweise der 60er Jahren entsprechen. Diese ortotropen Platten wurden nur der statischen Tragsicherheit nachgewiesen. Ermüdungsnachweise waren in den nationalen Normen nicht vorgesehen. Durch den Anstieg des Schwerverkehrs wurden in Österreich und in anderen europäischen Ländern an orthotropen Fahrbahnplatten bereits Ermüdungsschäden festgestellt. Die Ermüdungsschäden an den Platten wurden in Formen von Rissen festgestellt.

In dieser Arbeit wurde das Modell mit den geometrischen Abmessungen der Praterbrücke aus dem FFG-Forschungsprojekt [1] für die Berechnungen verwendet (siehe Abbildung 2). Das Modell und die Berechnungen wurden mit dem Finite-Elemente Softwarepaket ABAQUS 6.10 durchgeführt.

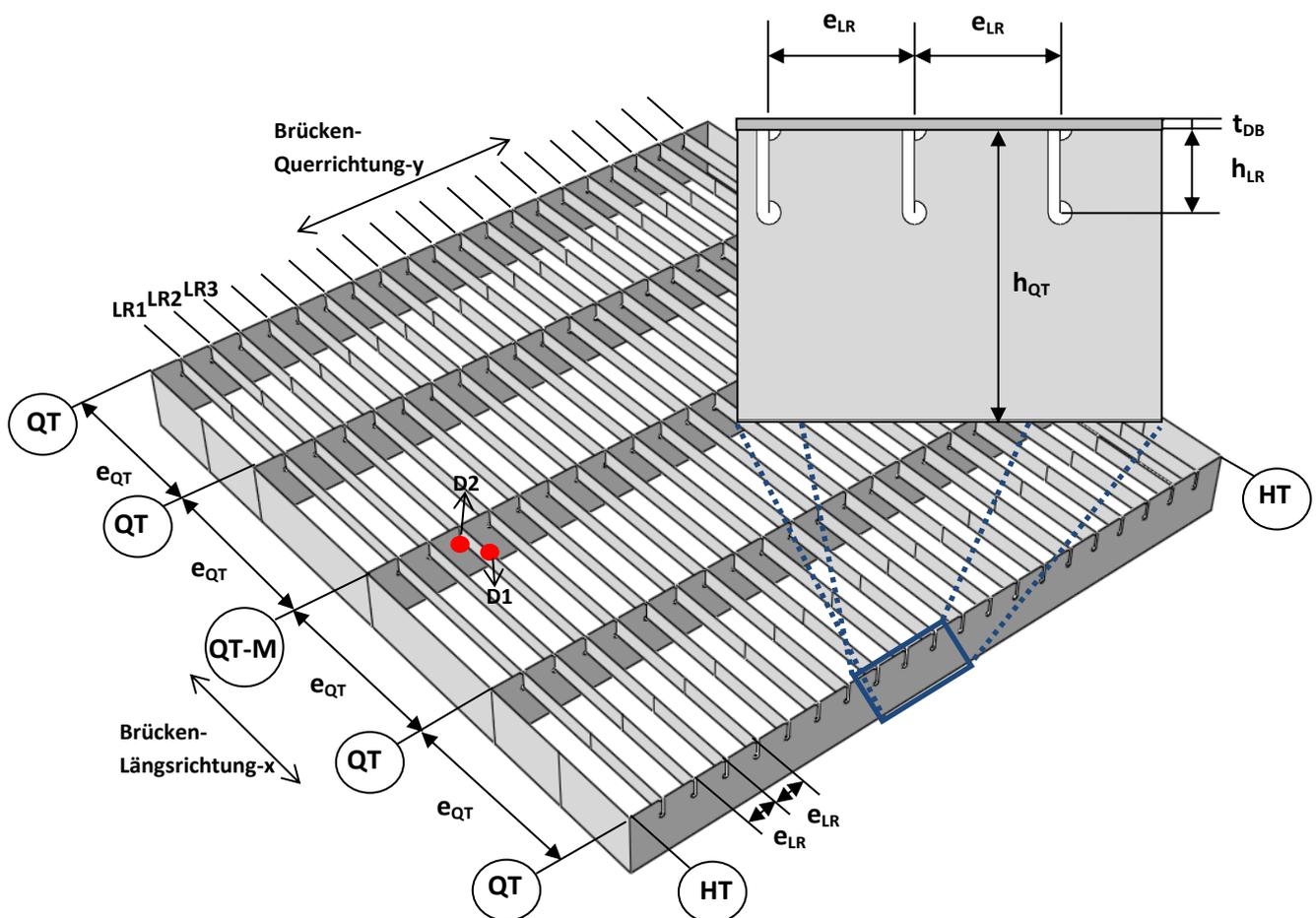


Abbildung 2: Angewendetes Modell mit transparent dargestellten Deckblech [1]

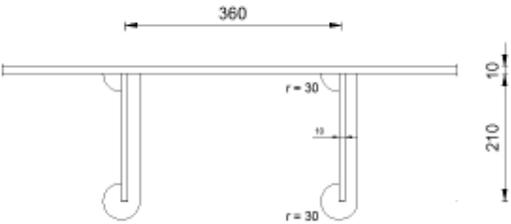
Profil	h_{LR} [mm]	e_{QT} [mm]	e_{LR} [mm]	t_{DB} [mm]
	210	2000	360	10

Tabelle 1: Geometrische Abmessungen

Viele der orthotropen Platten bei Straßenbrücken sind zwischen 1950 und 1975 gebaut wurden und sind in der Literatur [2] zu finden. Die orthotropen Platten wurden anhand ihrer Längsrippen kategorisiert. Es wurden Längsrippen als I-Profile, Wulstprofile und Trapezprofile gebaut. Die ersten zwei Profile (I-Profile und Wulstprofile) gehören zu den offenen Längsrippen und die Trapezprofile gehören zu den geschlossenen Längsrippen [2]. Bei dieser Kategorisierung wurden die Sonderformen wie z.B. Kelchprofile nicht betrachtet. Die Modellierung der ausgewählten Praterbrücke ist mit den offenen Längsrippen ausgeführt. In der ganzen Arbeit wird nur die orthotrope Platte mit offenen Längsrippen betrachtet.

Nach EN 1993-2 9.1.2 [10] sollte man für jedes Bauteil einer Straßenbrücke das Kerbstellen aufweist einen Ermüdungsnachweis durchführen. In dieser Arbeit wurden zwei wesentliche Detailpunkte eines Fahrbahndecks mit orthotroper Plattenbauweise und offenen Längsrippen bearbeitet. Das erste Detail ist der Anschluss der Längsrippe an das Deckblech-Detail D1 und das zweite ist der Anschluss der Längsrippe an die Querrippe-Detail D2 (siehe Abbildung 3).

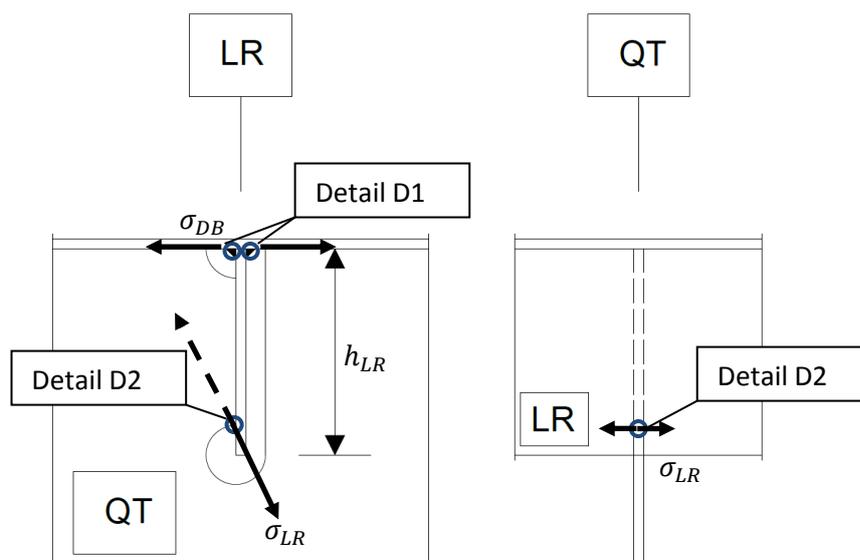


Abbildung 3: Detail D1 und Detail D2 bei der orthotropen Platte [1]

Bei Detail D1, mit der Deckblechschlankheit $e_{DB}/t_{DB}=36$, sind die Normalspannungen σ in Brückenquerrichtung maßgebend. Das Detail D2 hat die maßgebenden Normalspannungen an der Deckblechunterseite in der Längsrippe am Querrippenausschnitt, nahe der Längsrippenunterkante. Die zwei untersuchten Detailpunkte kommen naturgemäß am stählernen Fahrbahndeck sehr oft vor.

Die größten Spannungen bezüglich Detail D1 (siehe Abbildung 2) treten bei dieser Konstruktion an der Längsrippe LR1, nahe dem Hauptträger HT, im Abstand von $e=360\text{mm}$ vom mittleren Querträger QT-M, auf. Da in dieser Arbeit die Lage Radlasten aus dem Lastmodell in Brückenquerrichtung $\pm 50\text{cm}$ variiert wurde, musste aus Platzgründen Längsrippe LR3 gewählt werden. Die Ergebnisse können auf andere Längsrippen nahe dem Hauptträger übertragen werden.

Die größten Spannungen bezüglich Detail D2 treten bei dieser Konstruktion (siehe Abbildung 2) ebenfalls an der Längsrippe LR1, nahe dem Hauptträger, auf. Auch für dieses Detail wurde aus Platzgründen Längsrippe LR3 gewählt (siehe Abbildung 2).

Das Spannungsspektrum hängt im Wesentlichen von folgenden Faktoren ab:

- Abmessungen der Fahrzeuge
- Achslasten
- Fahrzeugabstand
- Verkehrszusammensetzung
- dynamische Wirkung. [7]

In der EN 1991-2 [7] sind fünf Ermüdungslastmodelle mit vertikalen Lasten definiert. Es ist nicht erforderlich Horizontallasten zu berücksichtigen. Für die Berechnungen in dieser Arbeit wurde das Ermüdungslastmodell 4 (ELM 4) herangezogen, welches nachfolgend näher erläutert wird.

2.1 Ermüdungslastmodell 4

Das Ermüdungslastmodell 4 (ELM 4) besteht aus einer Gruppe von Standardlastkraftwagen die an typischen europäischen Straßen sehr oft vorkommen. Die verschiedenen Schwerfahrzeuge sind in der Tabelle 2 nach EN 1991-2 [7] angegeben und sollen die prognostizierte idealisierte Schwerfahrzeugbelastung für die jeweilige Strecke (Fern- und Nahverkehrsrouten) darstellen. Die Schwerfahrzeuge unterscheiden sich in ihrem Achsabstand, Achslast, Schwerverkehrsanteil und der Reifenart, wie in der nachfolgenden Tabelle zu sehen ist (siehe Tabelle 2).

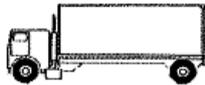
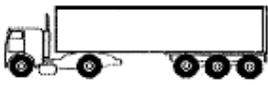
Typ	Schwerfahrzeug	Achsabstand [m]	Achslast [kN]	Schwerverkehrsanteil [%]	Reifenart
T1		4,5	70 130	20	A B
T2		4,20 1,30	70 120 120	5	A B B
T3		3,20 5,20 1,30 1,30	70 150 90 90 90	50	A B C C C
T4		3,40 6,00 1,80	70 140 90 90	15	A B B B
T5		4,80 3,60 4,40 1,30	70 130 90 80 80	10	A B C C C

Tabelle 2: Ermüdungslastmodell ELM 4 nach EN 1991-2 4.6.5 Tabelle 4.7 [7]

Jeder Fahrzeugtyp wird in Tabelle 2 einer Reifenart zugewiesen. Nach EN 1991-2 [7] sind für das Ermüdungslastmodell 4 drei Achsarten angegeben mit verschiedenen geometrischen Abmessungen. Eine Definition der Achsarten A, B und C mit den genauen Abmessungen sind in der nachfolgenden Abbildung 5 zu sehen.

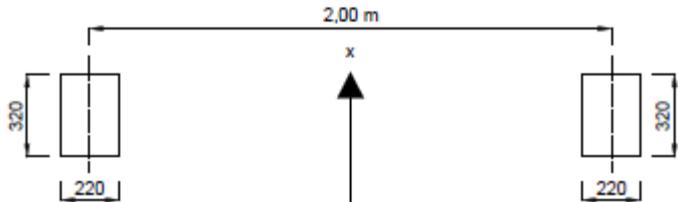
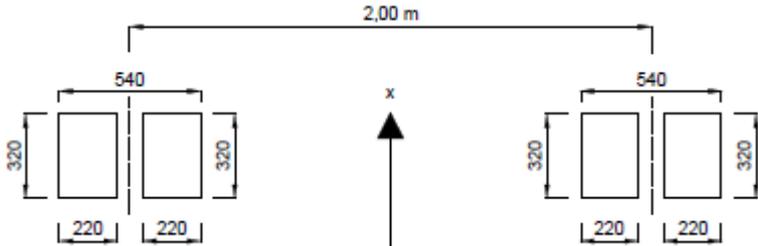
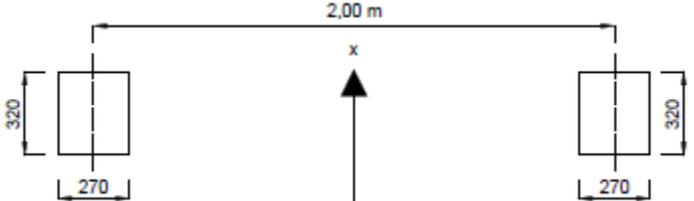
Definition der Reifenarten/Achsabstände	
Reifen/Achsart	Geometrische Abmessungen
A	
B	
C	

Abbildung 5: Definition der Reifenarten nach EN 1991-2 4.6.5 Tabelle 4.8 [7]

Der Abstand zwischen den Achsen der Räder ist für alle drei Achsen gleich und beträgt 2,00m. Alle Reifenarten haben die gleiche Höhe von 360 mm und die Breite variiert, wie es in Abbildung 5 zu erkennen ist. Die Flächenpressung der Räder auf dem Belag, infolge der Achslast des Fahrzeuges wurde gemäß EN 1991-2 [7] ermittelt, wobei eine lastverteilende Wirkung des Belags über dessen Dicke, berücksichtigt wurde (siehe Abbildung 6).

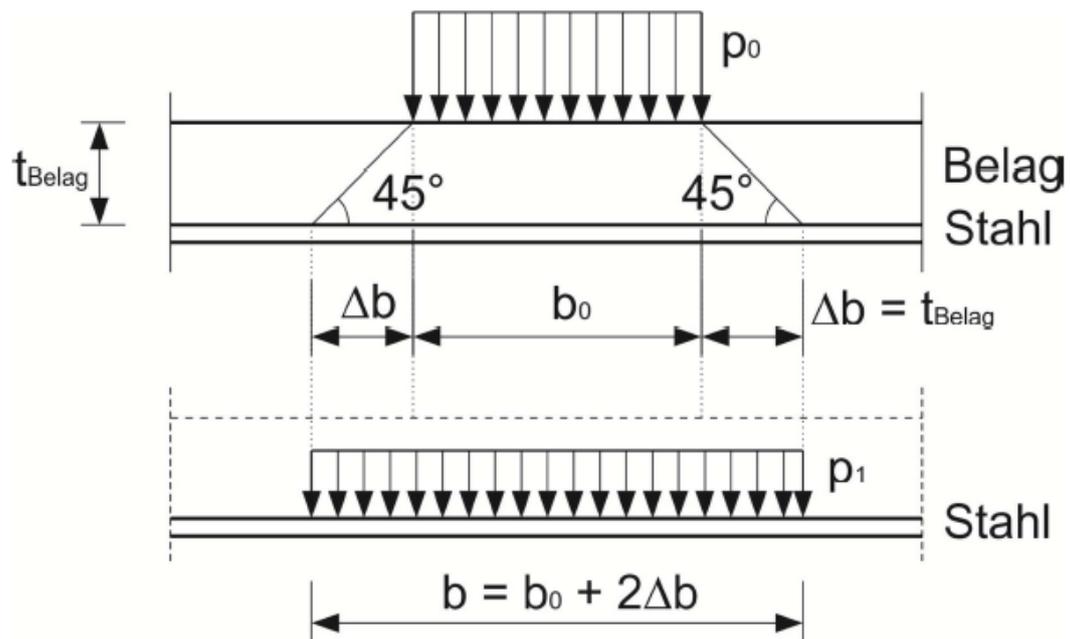


Abbildung 6: Lastausbreitung nach EN 1991-2, Abschnitt 4.3.6 [7]

Nach Norm EN 1991-2 [7] darf eine Lastausbreitung von 45° über die Dicke des Belages angesetzt werden. In dieser Arbeit wurde mit verbreiteter Lastaufstandsfläche $b=b_0+2\Delta b$, sowie mit der daraus resultierenden reduzierten Flächenpressung p_1 ($p_1 < p_0$) gerechnet (siehe Abbildung 6).

2.2 Nachweis auf Ermüdung

Eine Überfahrt der Fahrzeuge, nach ELM 4, über das betrachtete Brückendeck muss durchgeführt werden, wobei jedes Fahrzeug separat das Brückenmodell überfährt. Aus der Überfahrt jedes Fahrzeuges erhält man einen Spannungs-Zeitverlauf bezogen auf das betrachtete Kerbdetail. Für die Durchführung des Ermüdungsnachweises müssen, die aus der Fahrzeugüberfahrt erzeugten, Spannungs-Schwingspiele mithilfe der Reservoir oder Rainflow Zählmethode ausgezählt werden (siehe Abbildung 7).

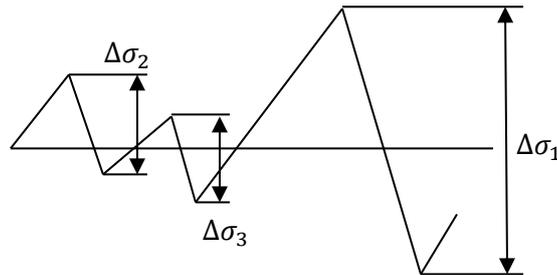


Abbildung 7: Reservoir-Zählmethode lt. EN 1993-1-9 Bild A.1 [9]

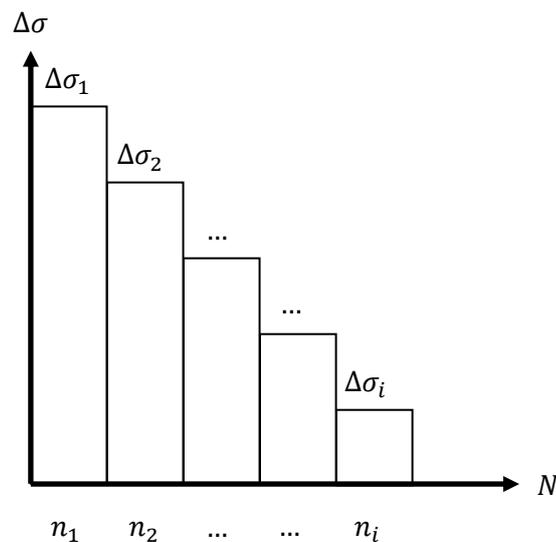


Abbildung 8: Lastkollektiv (Spektrum der Spannungsschwingbreiten) lt. EN 1993-1-9 Bild A.1 [9]

Das durch die Fahrzeugüberfahrt entstehende Kollektiv (siehe Abbildung 8) wird in EN 1993-1-9 [9] auch Spektrum genannt. Die Spannungen werden nach der Größe absteigend sortiert. Das Spektrum kann auf ein schadensäquivalentes Einstufenkollektiv $\Delta\sigma_{e,simu}$ in Berücksichtigung auf n_{LKW} umgerechnet werden (siehe Abbildung 9).

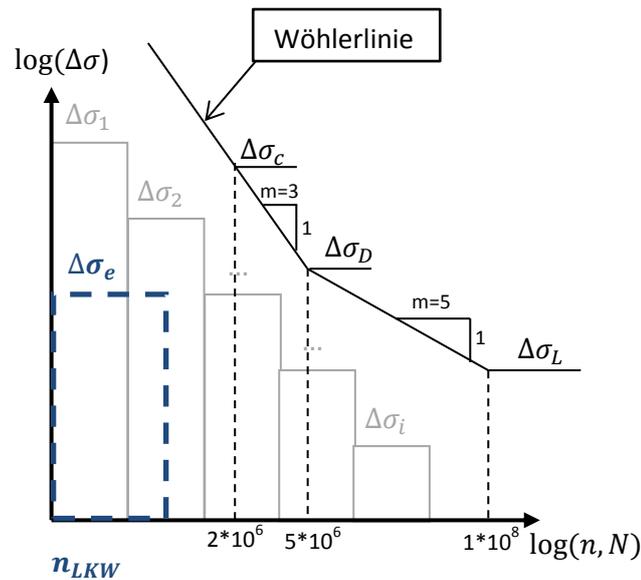


Abbildung 9: Umrechnung des Lastkollektivs in ein schädigungsäquivalentes Einstufungskollektiv

- $\Delta\sigma_c$ Bezugswert für die Ermüdungsfestigkeit bei $N_c = 2 * 10^6$ Lastwechsel (Schwingspiele)
 $\Delta\sigma_D$ Dauerfestigkeit bei $N_D = 5 * 10^6$ Schwingspielen
 $\Delta\sigma_L$ Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit bei $N_L = 1 * 10^8$ Schwingspielen

Zur Darstellung des schädigungsäquivalenten Einstufungskollektivs $\Delta\sigma_e$ werden die Formeln der EN 1993-1-9 7.1 [9] verwendet:

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_c^m * 10^6 \quad \{1\}$$

mit: $m = 3$ für $\Delta\sigma_R \geq \Delta\sigma_D$ ($\Delta\sigma_D \cong 0,74 * \Delta\sigma_c$)

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_D^m * 10^6 \quad \{2\}$$

mit: $m = 5$ für $\Delta\sigma_L \leq \Delta\sigma_R \leq \Delta\sigma_D$ ($\Delta\sigma_L \cong 0,40 * \Delta\sigma_c$)

Abbildung 9 zeigt die Darstellung der Wöhlerlinie im allgemeiner Form und logarithmischer Achsenskalierung.

Nach EN 1993-1-9 A.5 [9] wird die Schadensakkumulation mit der Formel:

$$D = \sum_i^n \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} \quad \{3\}$$

- n_{Ei} Anzahl der einwirkenden Spannungsschwingspiele
 N_{Ri} Anzahl der maximalen aufnehmbaren Spannungsschwingspiele, bezogen auf die Bemessungs-Wöhlerlinie

durchgeführt.

Daraus ergibt sich die schädigungsäquivalente Spannungsschwingbreite je nach Neigung der Ermüdungsfestigkeitskurve (Wöhlerlinien) zu

$$\Delta\sigma_e = \left(\sum D * \Delta\sigma_D^m * \frac{5*10^6}{n_{LKW}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad \{4\}$$

$\Delta\sigma_e$ Schadensäquivalentes Einstufungskollektiv aus Simulationsberechnung bezogen auf n_{LKW}

n_{LKW} Anzahl der bezogenen einwirkenden Lastwechsel

m Neigung der Ermüdungsfestigkeitskurve (Wöhlerlinie)

Mit einem hier für die weitere Berechnung angenommenen Bezug auf $n_{LKW} = 100$ Lastwechsel ergibt sich Formel {4} zu

$$\Delta\sigma_e = \left(\sum D_i * \Delta\sigma_D^m * \frac{5*10^6}{100} \right)^{\frac{1}{m}} \quad \{5\}$$

Danach erfolgt die Umrechnung der schädigungsäquivalenten Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_e$ von 100 auf $2 * 10^6$ Lastwechsel für einen Bezugszeitraum von 100 Jahren (siehe Abbildung 10).

$$\Delta\sigma_{e,2} = \Delta\sigma_e * \left(\frac{n_{ges}}{2*10^6} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \{6\}$$

$$n_{ges} = 100 * f_{Anzahl} \quad \{7\}$$

$$f_{Anzahl} = \frac{N_{Obs} * 100}{100} \quad \{8\}$$

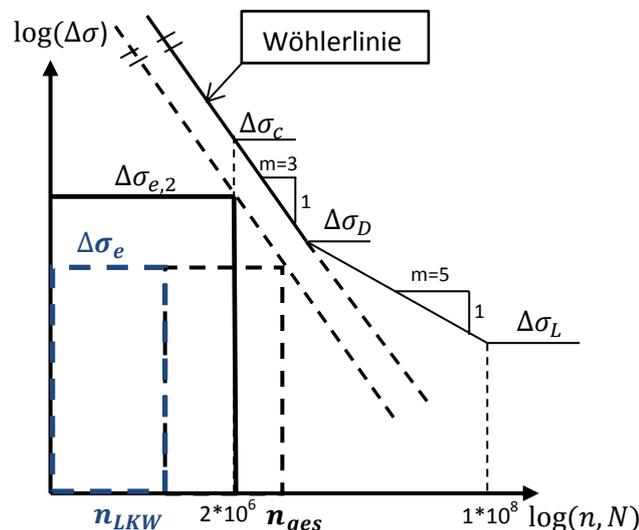


Abbildung 10: Umrechnung der schädigungsäquivalenten Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_e$ von 100 auf $2*10^6$

$\Delta\sigma_{e,2}$ Schadensäquivalentes Einstufungskollektiv aus der Simulationsberechnung bezogen auf $2 * 10^6$ Lastwechsel

n_{ges} Gesamtanzahl der Fahrzeuge im Bezugszeitraum

N_{Obs} Anzahl erwarteter Lastkraftwagen je Jahr für einen LKW-Fahrstreifen

Der Ermüdungsnachweis kann mit der Formel:

$$\gamma_{Ff} * \Delta\sigma_{e,2} \leq \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}}$$

geführt werden. Alternativ kann der Ermüdungsnachweis durch Schadensakkumulation erbracht werden. Hierzu wird auf die EN 1993-1-9 A.5 [9] verwiesen.

$$D \leq 1,0$$

3 Motivation der Arbeit

Das Ermüdungslastmodell 4 geht davon aus, dass alle Fahrzeuge genau zentrisch an der Fahrspur, damit am ungünstigsten, über die Fahrbahnplatte fahren. Weiteres ist zu erkennen, dass die Achsgeometrien der Achsen A bis C nach ELM 4 nicht realitätsgetreu sind, da die Radaußenseite wie in Abbildung 11 erkennbar, nicht fluchten. In dieser Arbeit wurden die beiden günstigsten Einflüsse auf die Ermüdungswirkung zweier lokaler Kerbdetails ausgearbeitet und der rein zentrischen Überfahrt aller Fahrzeuge gegenübergestellt.

Folgende günstigen Effekte wurden bei den Simulationen berücksichtigt:

- reale Achsgeometrie der Fahrzeuge (alle Radaußenseiten sind fluchtend)
- Häufigkeitsverteilung in Brückenquerrichtung zur Berücksichtigung des Fahrverhaltens in der Fahrspur

3.1 Berücksichtigung der realen Achsgeometrie

Nach der Norm EN 1991-2 [7] ist die Achsgeometrie der Fahrzeuge genau angegeben. Wie schon im Abschnitt 2.1 bereits erwähnt sind drei verschiedene Achsen an den Schwerfahrzeugen angegeben. Die Achsen A, B und C haben den gleichen Abstand hinsichtlich des Flächenschwerpunktes der Radaufstandsflächen ($e_A=e_B=e_C=2,00$ m). Dies bedeutet zwangsläufig, dass die Außenseiten der Räder innerhalb eines Fahrzeuges nicht in einer Linie fluchtend sind (siehe Abbildung 11), was keine realgetraue Abbildung tatsächlich vorkommender Schwerfahrzeuge darstellt. Abbildung 11 zeigt eine Draufsicht eines Zugfahrzeugs von einem Sattelschlepper. Hierbei ist zu erkennen, dass die Räder der Lenkachse an deren Außenseite fluchtend sind mit den Außenseiten der Räder der Antriebsachse ($e_A \neq e_B$). In dieser Arbeit wurde die Achsgeometrie der Achse B ($e_B \neq 2,00$ m) dementsprechend angepasst und in den numerischen Simulationen berücksichtigt. Im Kapitel 5 werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen in Hinsicht der realen Achsgeometrie dargestellt.

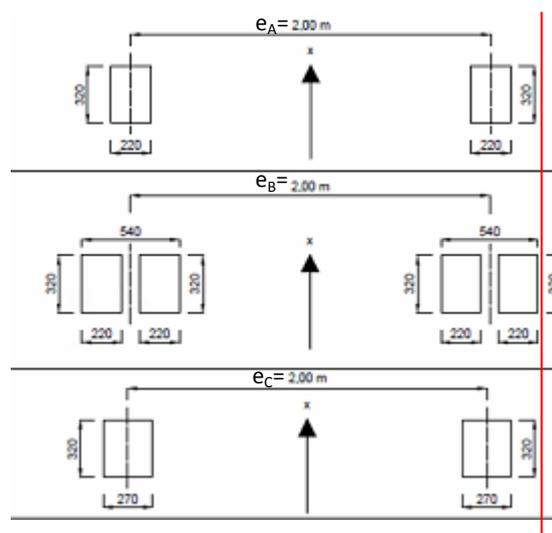


Abbildung 11: Achse A, B und C mit den Geometrien

Abbildung 12 zeigt die Draufsicht einer Zugmaschine der Marke Mercedes Benz.

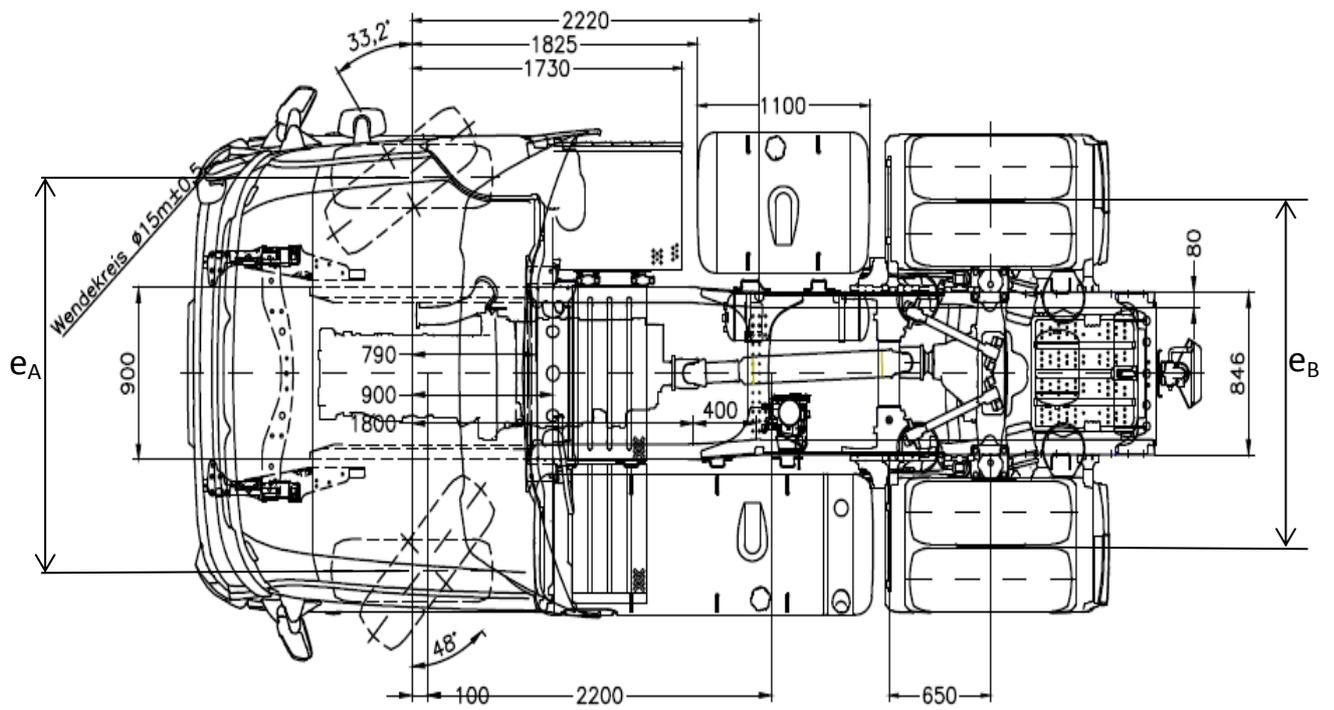


Abbildung 12: Mercedes-Benz Abtlg. (dept.) TE/SOD Stuttgart [4]

In der nachfolgenden Abbildung 13 ist ein Foto zu sehen, dass an einer Straßenbrücke gemacht wurde, wo deutlich zu erkennen ist, dass alle Reifen innerhalb des Fahrzeugs an ihrer Außenseite entlang einer Linie bündig sind.



Abbildung 13: Schwerfahrzeug an einer Straßenbrücke

3.2 Berücksichtigung einer Häufigkeitsverteilung zum Fahrverhalten in der Spur

Es ist unrealistisch, dass 100% der Fahrzeuge mittig in der Fahrspur die Brücke überfahren. Das Spurverhalten von Fahrzeugen im Fahrstreifen ist sehr unterschiedlich. Die Position der Fahrzeuge im Fahrstreifen ist schwer zu definieren, deshalb wurden Untersuchungen durchgeführt worin zwei Häufigkeitsverteilungen in der Spur festgelegt wurden.



Abbildung 14: Schwerfahrzeugtyp auf verschiedenen Positionen an einer Straßenbrücke

An der Abbildung 14 ist zu erkennen, dass zwei Schwerfahrzeuge, welche im selben Fahrstreifen fahren, unterschiedliches Spurverhalten aufweisen.

In dieser Arbeit wurden zwei Häufigkeitsverteilungen bezüglich Position der Schwerfahrzeuge in der Fahrspur untersucht:

- Häufigkeitsverteilung nach Blab [3]
- Häufigkeitsverteilung nach EN 1991-2 [7].

3.2.1 Häufigkeitsverteilung nach Blab

Ronald Blab beschäftigte sich innerhalb seiner Dissertation [2] aus 1995. mit dem Fahrspurverhalten von Fahrzeugen auf Österreichs Straßen. Es wurden umfangreiche Messungen an Bundesstraßen sowie Autobahnen durchgeführt. Nähere Informationen zum angewendeten Messsystem befinden sich in [3]. Es wurden am Messquerschnitt der jeweiligen Straße die Lage des Fahrzeuges in der Spur, die Fahrstreifenbreite, Fahrbahnunebenheiten (Spurrinnen) und Geschwindigkeiten der Fahrzeuge gemessen.

Die Fahrstreifenbreite, Spurrinnentiefe und Fahrzeuggeschwindigkeit werden durch die Standardabweichung σ der Verteilungsfunktion wiedergegeben. Wie in Abbildung 15 dargestellt wird zwischen einzelbereifter und zwillingsbereifter Achse unterschieden. In dieser Abbildung sind die Diagramme für die Standardabweichungen σ der Laplace Verteilung angegeben. Für die Untersuchungen in dieser Arbeit wurden die Standardabweichungen σ für eine Fahrstreifenbreite von 3,50 m, Fahrzeuggeschwindigkeit von 80 km/h bis 100 km/h und Spurrinnentiefe <10mm ausgelesen.

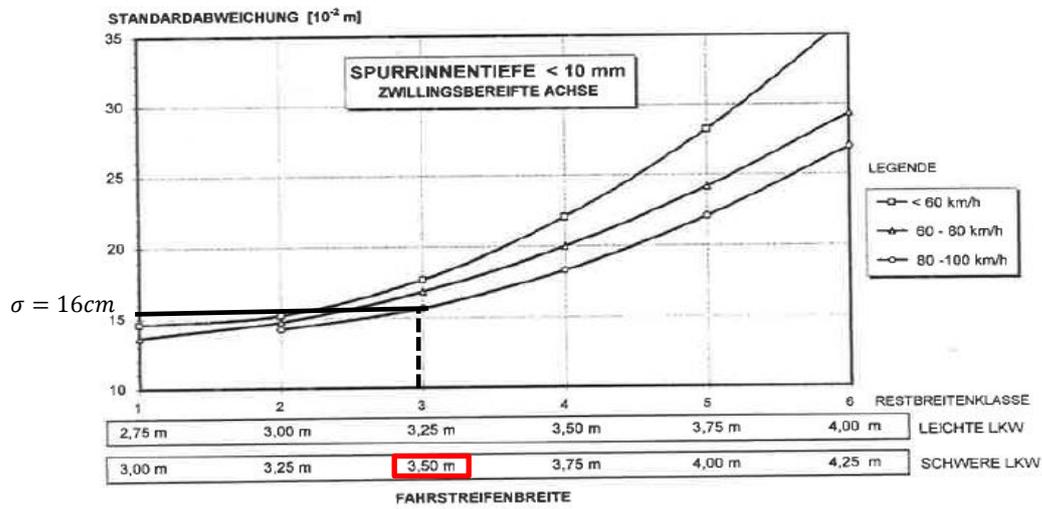
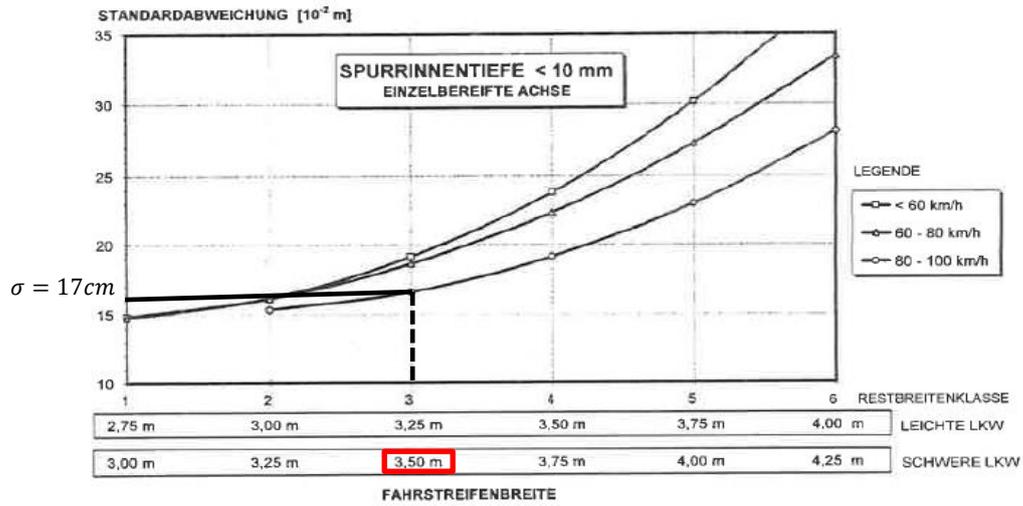


Abbildung 15: Regressionskurven-Zusammenhang zwischen Einflussgrößen und der Fahrspurverteilung [3]

Abbildung 16 zeigt die Dichtefunktion für einzel- und zwillingsbereifte Achsen mit den aus Abbildung 15 ausgelesenen Standardabweichungen σ . Unter Berücksichtigung einer Schrittweite von $\Delta y=10\text{cm}$ können die relativen Häufigkeiten bezüglich der Position der Achse in der Spur angegeben werden.

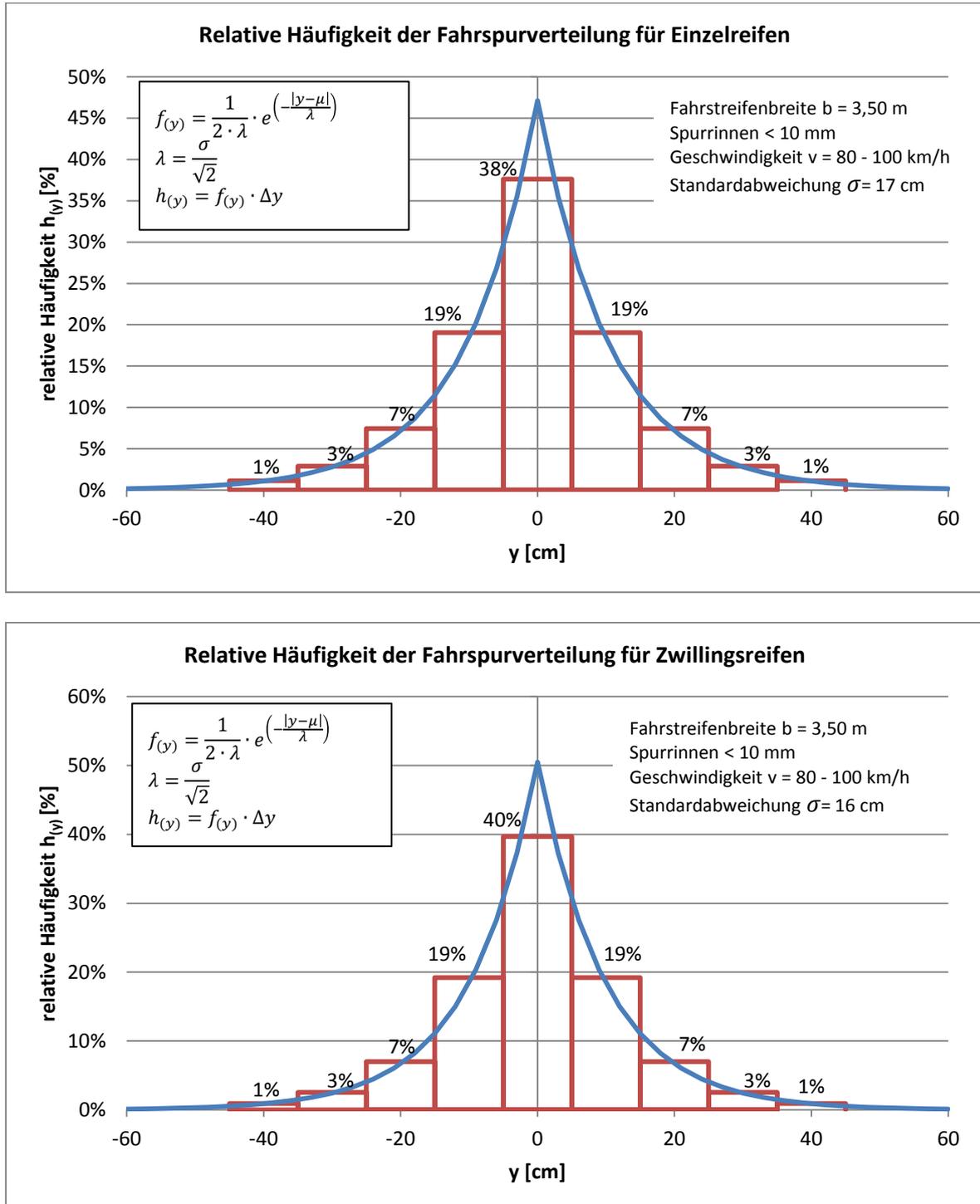


Abbildung 16: Relative Häufigkeit der Fahrspurverteilung

In der Abbildung 15 sind nur geringfügige Unterschiede der relativen Häufigkeiten zwischen einzel- und zwillingsbereiften Achsen festzustellen. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit nur die Häufigkeitsverteilung für zwillingsbereifte Achsen für die weiteren Analysen herangezogen.

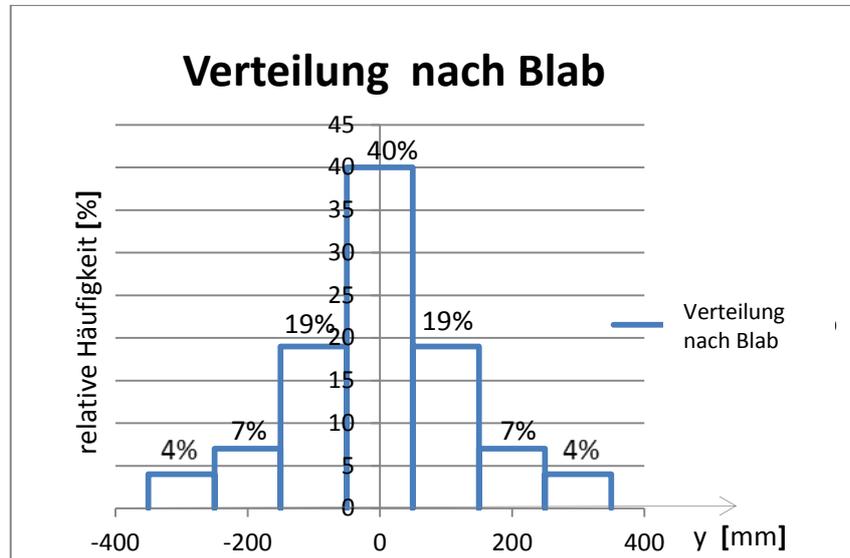


Abbildung 17: Häufigkeitsverteilung in Brückenquerrichtung nach Blab

Abbildung 16 zeigt nochmals die Häufigkeitsverteilung für zwillingsbereifte Achsen in vereinfachter Darstellung, wie sie in weiterer Folge in dieser Arbeit Anwendung fand. Es ist zu erkennen, dass nummehr lediglich 40% aller fahrzeuge mittig in der Fahrspur fahren.

3.2.2 Häufigkeitsverteilung nach EN 1991-2

Die zweite Häufigkeitsverteilung, die in dieser Arbeit verwendet wurde ist die Verteilung nach der Norm EN 1991-2 [7]. Bei dieser Verteilung sind die Werte der Häufigkeit ein bisschen anders als bei der Blab Verteilung aus dem Abschnitt 3.2.1. Abbildung 18 zeigt die Häufigkeitsverteilung, wie sie im Eurocode angegeben wird. Dementsprechend fahren 50% aller Fahrzeuge mittig in der Fahrspur.

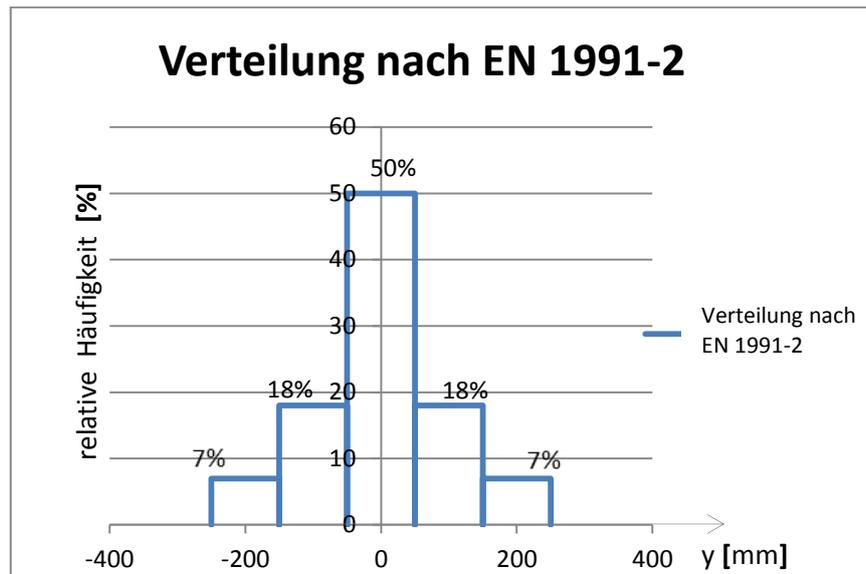


Abbildung 18: Häufigkeitsverteilung in Brückenquerrichtung na EN 1991-2 [7]

4 Grundkonzept der Arbeit

In einem ersten Schritt wurde eine rein zentrische Überfahrt aller Fahrzeuge in der Spur simuliert, wobei die Spur dementsprechend gewählt wurde, sodass die beiden untersuchten Kerbdetails ungünstigst beansprucht werden. Alle Achsen überfahren das Brückendeck wie in Abbildung 27 dargestellt, sodass die Flächenschwerpunkte der Radaufstandsflächen sich direkt über der Blechachse von Längsrippe 3 (LR-3) befinden. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird diese Achs- bzw. Radposition in Querrichtung als zentrische Überfahrt bezeichnet.

Für die Simulation der Fahrzeugüberfahrten wurde das Ermüdungslastmodell ELM 4 (siehe Abschnitt 2.1) herangezogen, welche 5 Fahrzeugtypen und 3 Achsarten beinhaltet. In den nachfolgenden Abschnitten werden die untersuchten Detailpunkte dargestellt und die Vorgehensweise der Simulationen von den Fahrzeugs Überfahrten näher erläutert.

Das aus der zentrischen Fahrzeugüberfahrt erhaltene Spannungskollektiv diene als Basis für die weiteren Untersuchungen bezüglich einer Berücksichtigung der realitätsnahen Achsgeometrien, sowie des Fahrspurverhaltens innerhalb der Spur (Häufigkeitsverteilung in Brückenquerrichtung).

Überfahrt von Typ 1 bis Typ 5

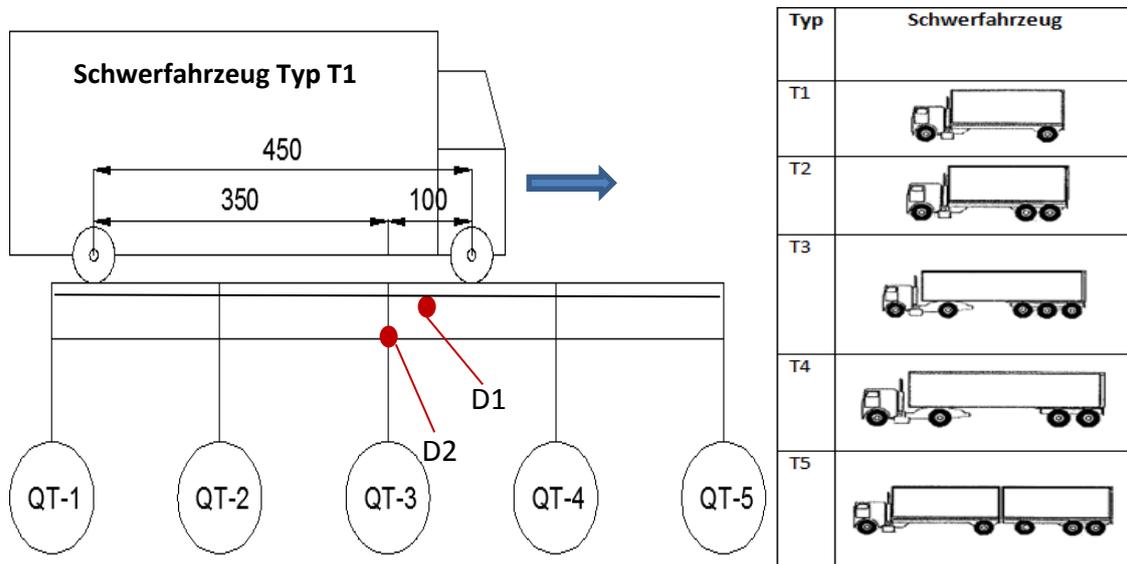


Abbildung 19: Überfahrt der Schwerfahrzeuge von Typ 1 bis Typ 5

-Schritt 1

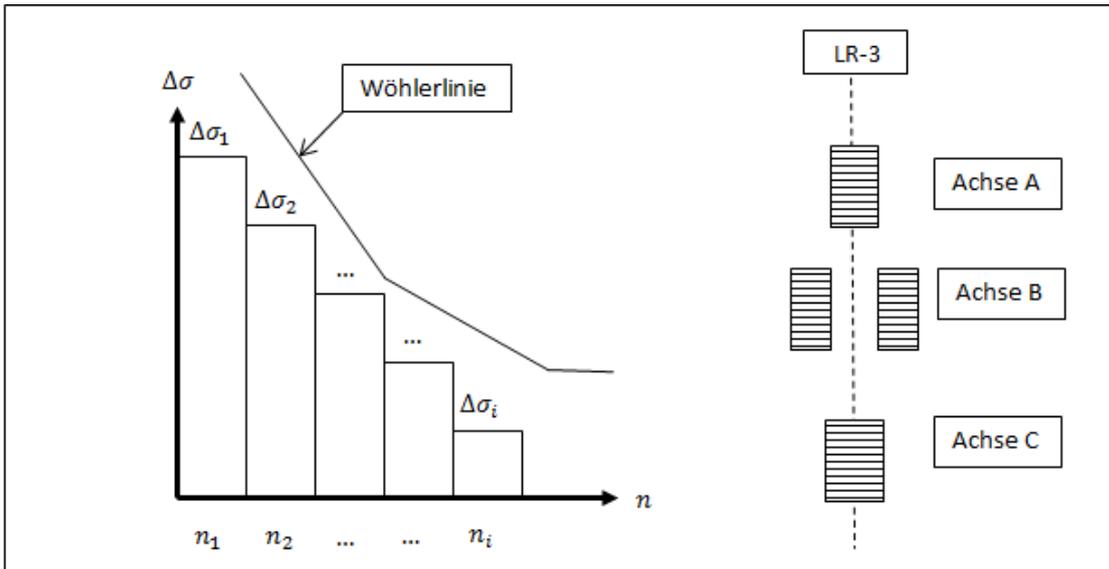


Abbildung 20: Ermittlung eines Spannungskollektives für die zentrische Überfahrt

-Schritt 2

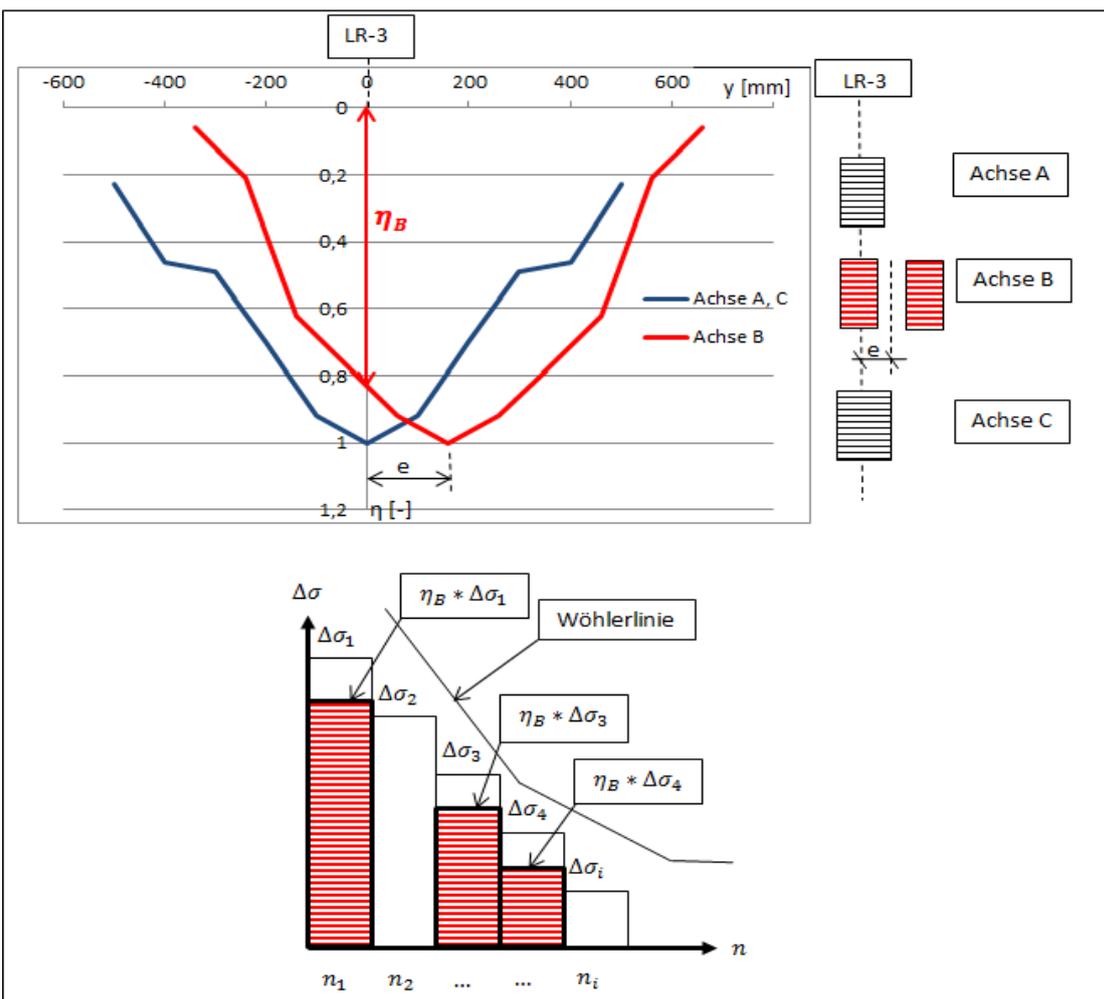


Abbildung 21: Ermittlung eines Spannungskollektives in Berücksichtigung einer realen Achsgeometrie

-Schritt 3

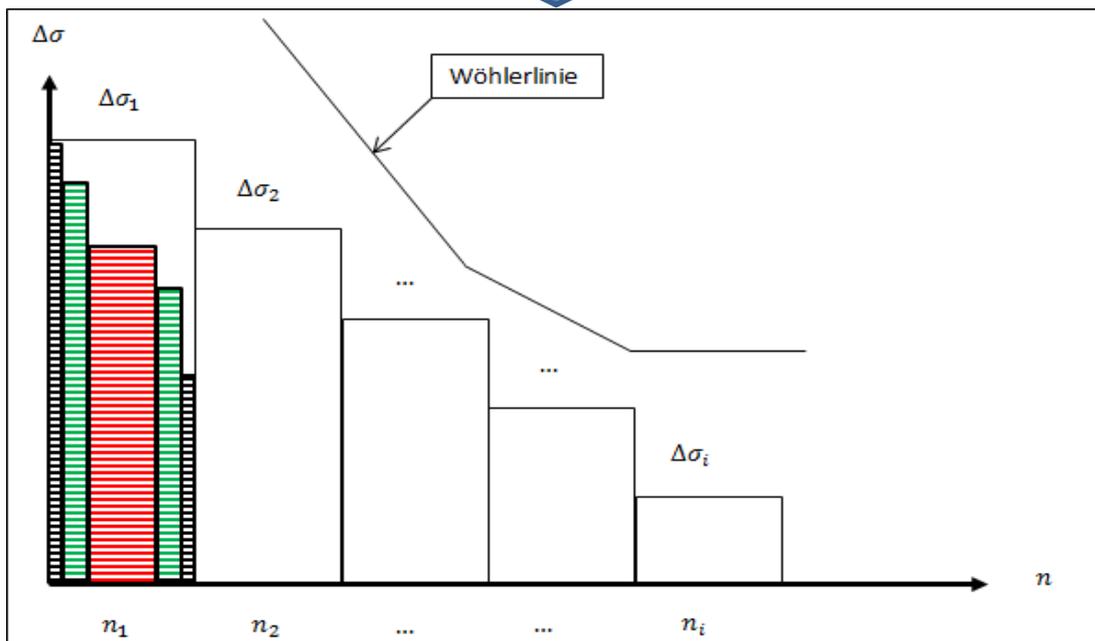
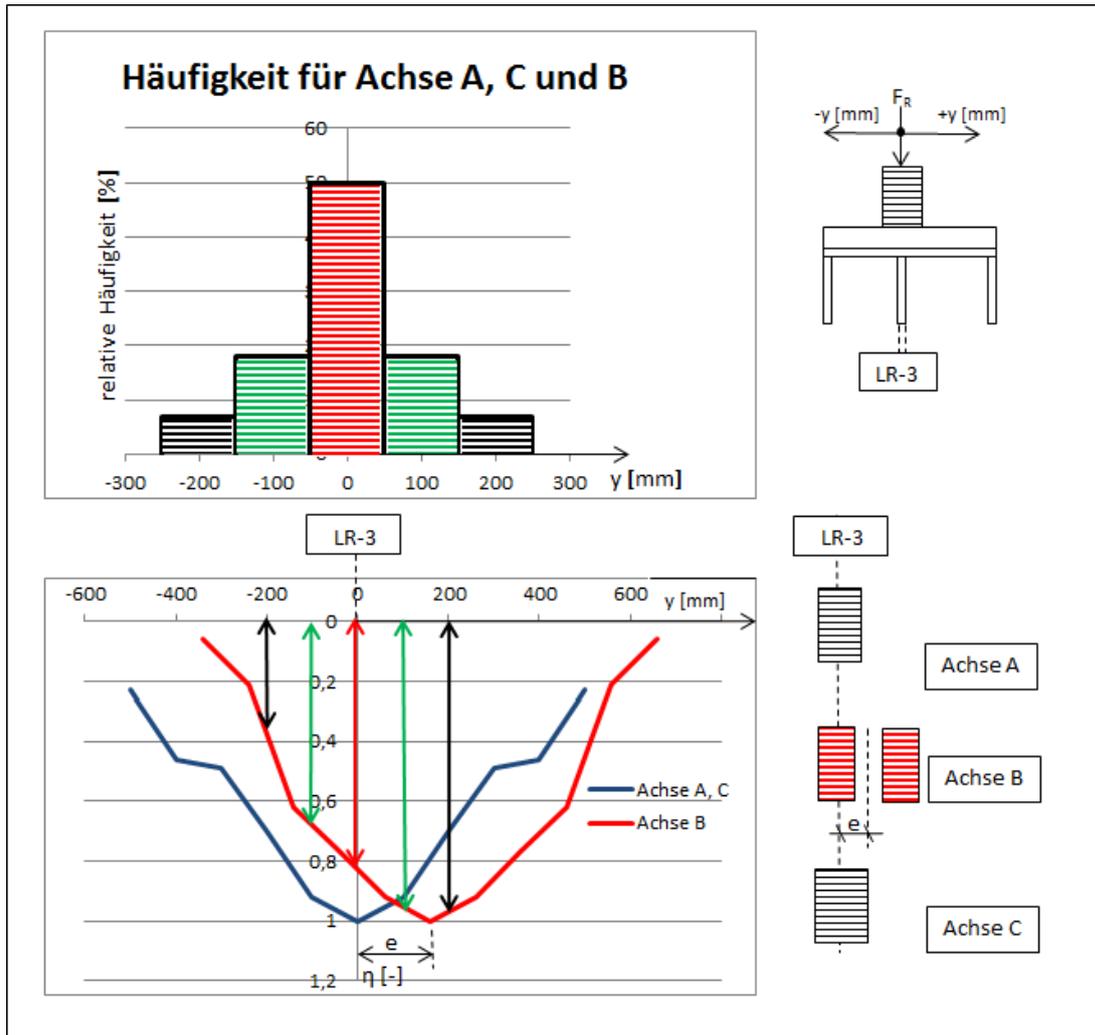


Abbildung 22: Ermittlung eines Spannungskollektives in Berücksichtigung einer realen Achsgeometrie in Verbindung mit einer Häufigkeitsverteilung

Die Abbildungen von 19 bis 22 zeigen eine prinzipielle Darstellung der Vorgehensweise.

Schritt 1 ist die Ermittlung eines Spannungskollektives bezüglich des betrachteten Detailpunktes für die rein zentrische Überfahrt aller Räder über Längsrippe 3 (LR-3). An dem maßgebenden Stellen wurden Querverteilungseinflusslinien der Details bezogen auf die Radlasten ermittelt, sodass die Kollektivteile aus dem Spannungskollektiv der zentrischen Überfahrt mit dem jeweils zutreffenden Wert η skaliert werden konnten (siehe Abbildung 20).

Schritt 2 ist die Berücksichtigung einer realen Achsgeometrie, wobei die maßgebende Achse und deren Querverteilungseinflusslinie um den Wert e in Brückenquerrichtung verschoben wurde. Die zu den Spannungskollektivteilen zugehörigen η -Werte konnten ausgelesen werden und eine zutreffende Skalierung der Kollektivteile konnte durchgeführt werden (siehe Abbildung 21).

Schritt 3 beschreibt eine Berücksichtigung der realen Achsgeometrie in Verbindung mit einer Häufigkeitsverteilung für die Achsen in Brückenquerrichtung. Abbildung 22 zeigt eine graphische Darstellung der Durchgeführten Bearbeitungen (Skalierung und Aufsplittung) am Basis Kollektiv (zentrische Überfahrt). Es erfolgte eine Aufsplittung der Kollektivteile bezüglich deren Auftretenshäufigkeit inklusive eine Skalierung mit dem zugehörigen Skalierfaktor η (siehe Abbildung 22).

Für die Lastkollektive aus Schritt 1, 2 und 3 wurden jeweils schadensäquivalente Einstufenkollektive $\Delta\sigma_e$ ermittelt, welche miteinander verglichen werden konnten.

4.1 Beschreibung der Detailpunkte D1 und D2

In [1] konnten zwei wesentliche, maßgebende Kerbdetailpunkte an einer orthotropen Platte mit offenen Längsrippen ausgearbeitet werden, welche auch in dieser Arbeit betrachtet wurden. Der erste Detailpunkt ist Detail D1 der Anschluss der Längsrippe 3 an das Deckblech. Der Anschluss der Längsrippe 3 an die Querrippe 3 ist Detail D2. Die maßgebende Lage der Details im Grundriss ist in der nachfolgenden Abbildung 23 genauer zu sehen.

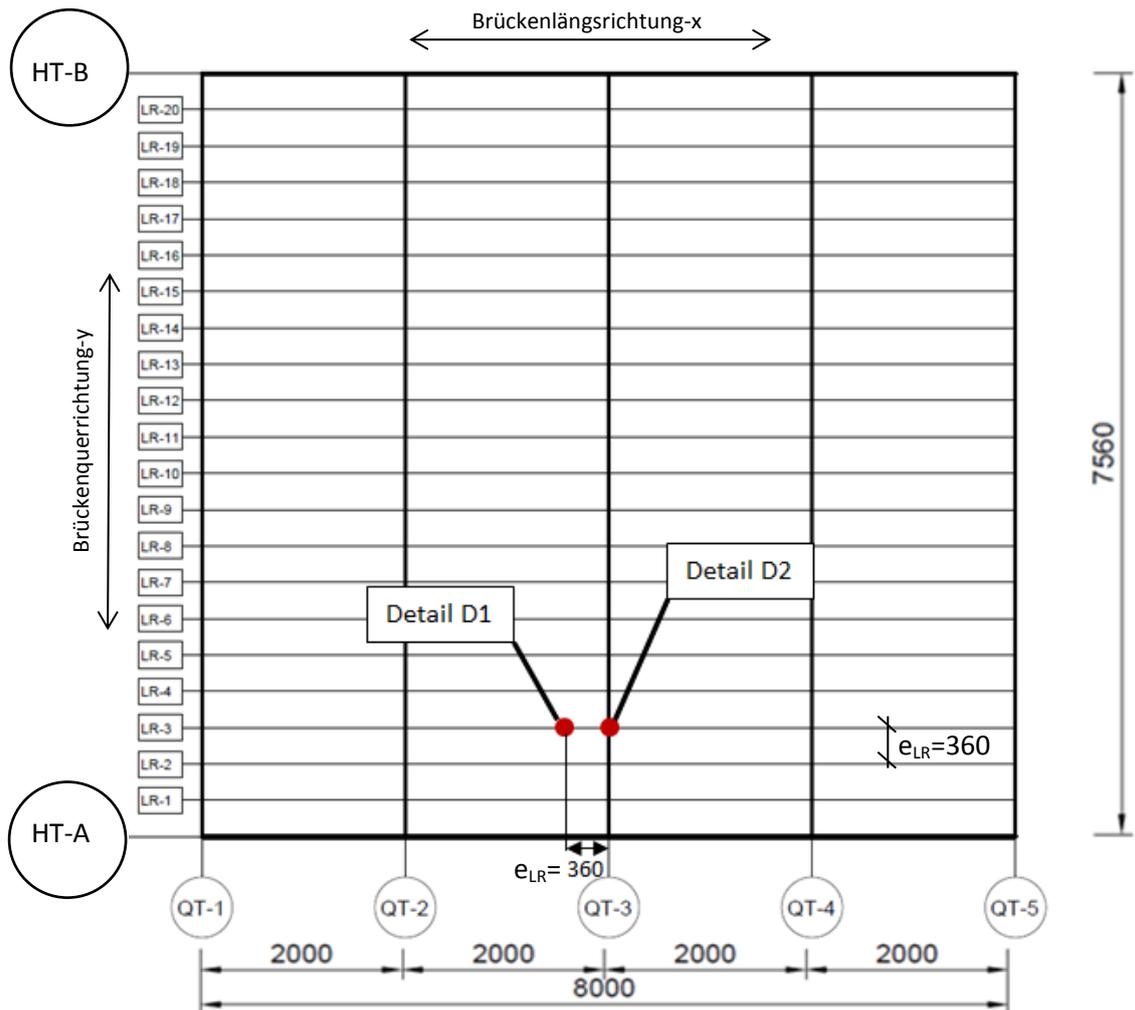


Abbildung 23: Lage von D1 und D2 im Grundriss

-Detail D1 -Schweißnaht der LR zum Deckblech

Detail D1 ist der geschweißte Anschluss der Längsrippe an das Deckblech. Die Kerbstelle befindet sich am Nahrand der Kehlnaht der zwei Bleche, wo Rissbildungen durch Ermüdungsversagen entstehen können. In Brückenquerrichtung kommt es zu großen Spannungsspielen $\Delta\sigma_{D1}$ im Deckblech die durch lokale Blechbiegungen entstehen.

Für das Detail D1 (siehe Abbildung 24) wurde nach EN 1993-1-9 [9] der Kerbfall 100 unter Verwendung des Strukturspannungskonzeptes angesetzt ($\Delta\sigma_c = 100 \text{ [N/mm}^2\text{]}$).

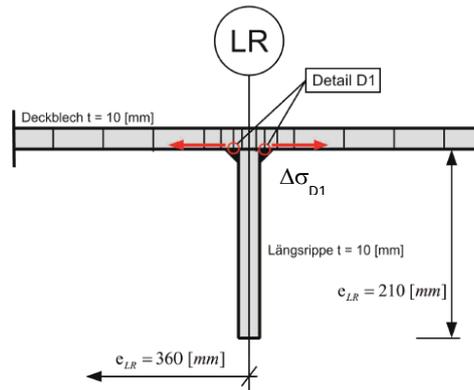


Abbildung 24: Deckblechbiegung für Detail D1; Einstufung in Kerbfall 100 [1]

Der untersuchte Detailpunkt D1 befindet sich an der Längsrippe 3 im Abstand von $e_{LR}=360\text{mm}$ von der mittleren Querrippe (siehe Abbildung 23). Die Spannungen σ_1 und σ_2 wurden aus Abaqus gelesen und die Spannung σ_{MP} wurde durch lineare Extrapolation gemäß [11] ermittelt (siehe Abbildung 25).

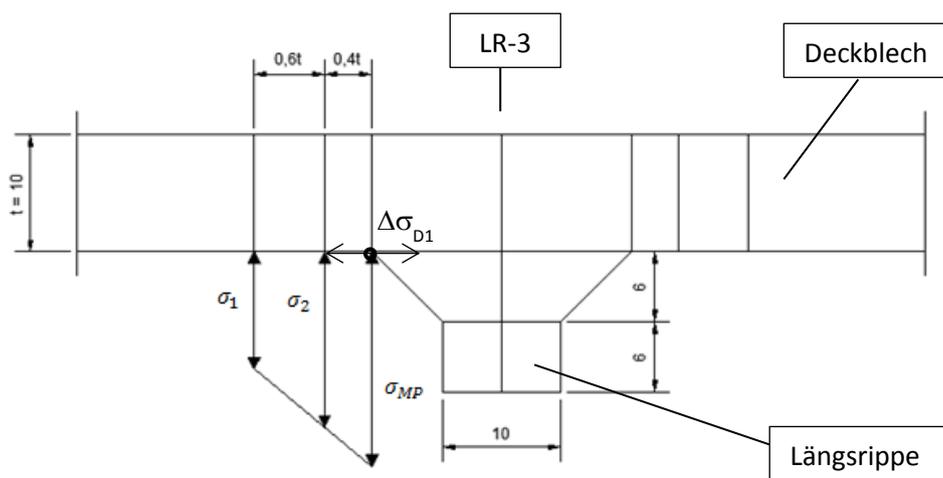


Abbildung 25: Spannungsermittlung für Detail D1

Nachfolgenden ist an einem Rechnerischen Beispiel dargestellt wie die Spannung σ_{MP} ermittelt wurde:

$$\sigma_1 = 96,22 \left[\frac{N}{mm^2} \right], \sigma_2 = 81,95 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

$$\sigma_{MP} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{0,6} * 0,4 + \sigma_1 = \frac{96,22 - 81,95}{0,6} * 0,4 + 96,22 = \mathbf{105,73 \left[\frac{N}{mm^2} \right]}$$

-Detail D2 – Anschluss zwischen LR und QR

Detail D2 ist der Schweißnahtanschluss der Längsrippe LR-3 an die mittlere Querrippe (siehe Abbildung 26). Das Spannungsspiel $\Delta\sigma_{D2}$ ermittelt sich aus Normalspannung in der Längsrippe am unteren Ende der Schweißnaht zur Querrippe.

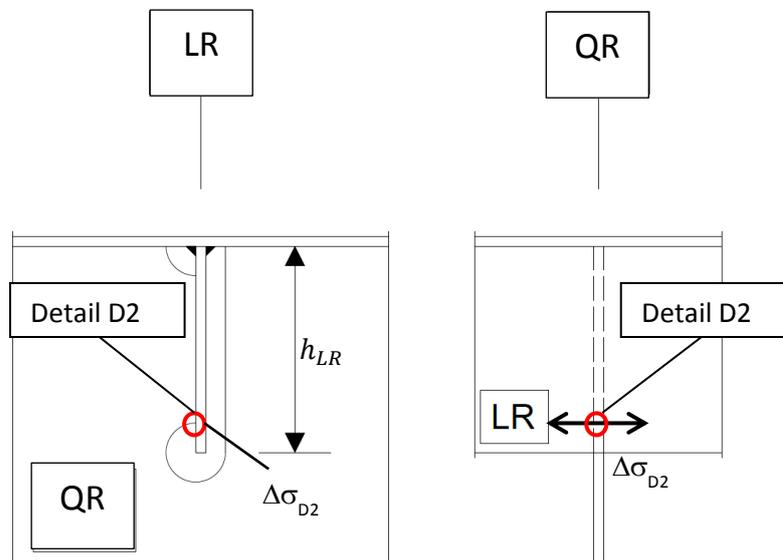


Abbildung 26: D2 Anschluss Längsrippe 3 an Querrippe 3

Für das Detail D2 (siehe Abbildung 26) wurde nach EN 1993-1-9 [9] der Kerbfall 100 unter Verwendung des Spannungskonzeptes angesetzt ($\Delta\sigma_c = 100 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$).

4.2 Zentrische Überfahrt der Fahrzeuge nach ELM 4

In dem Software Programm Abaqus wurde eine zentrische Überfahrt der Fahrzeuge nach ELM 4 simuliert. Definition der zentrischen Überfahrt ist grafisch in Abbildung 27 dargestellt. Die Simulation der zentrischen Überfahrt aller Achsen wurde über Längsrippe LR-3 durchgeführt. Für jede Achse (A, B, C) wurde eine Wanderlast in 10 cm schritten mit einer Einheitslast von $F_A=100\text{kN}$ generiert. Die Spannungen wurden in den Detailpunkten D1 und D2 ausgelesen und für jede Achse wurde eine Einflusslinie in Brückenlängsrichtung erstellt. Unter Berücksichtigung der Achsabstände und Achslasten gemäß ELM 4 konnte für jeden Fahrzeugtyp T1 bis T5 ein Spannungsverlauf bezogen auf den Weg erstellt werden. Die daraus entstehenden Spannungsspiele wurden mittels Reservoir-Methode ausgezählt und unter Berücksichtigung der Auftretenshäufigkeiten jedes Fahrzeugtyps konnte ein Lastkollektiv pro Detailpunkt erstellt werden, welches sich auf eine Überfahrt von insgesamt 100 Fahrzeugen bezieht. Das Lastkollektiv für die zentrische Überfahrt stellt die Basis dar. Die Kollektivteile daraus wurden in weiterer Folge mittels dem zutreffenden Faktoren aus den Querverteilungseinflusslinien skaliert. Die Ergebnisse sind im Abschnitt 5 zu finden.

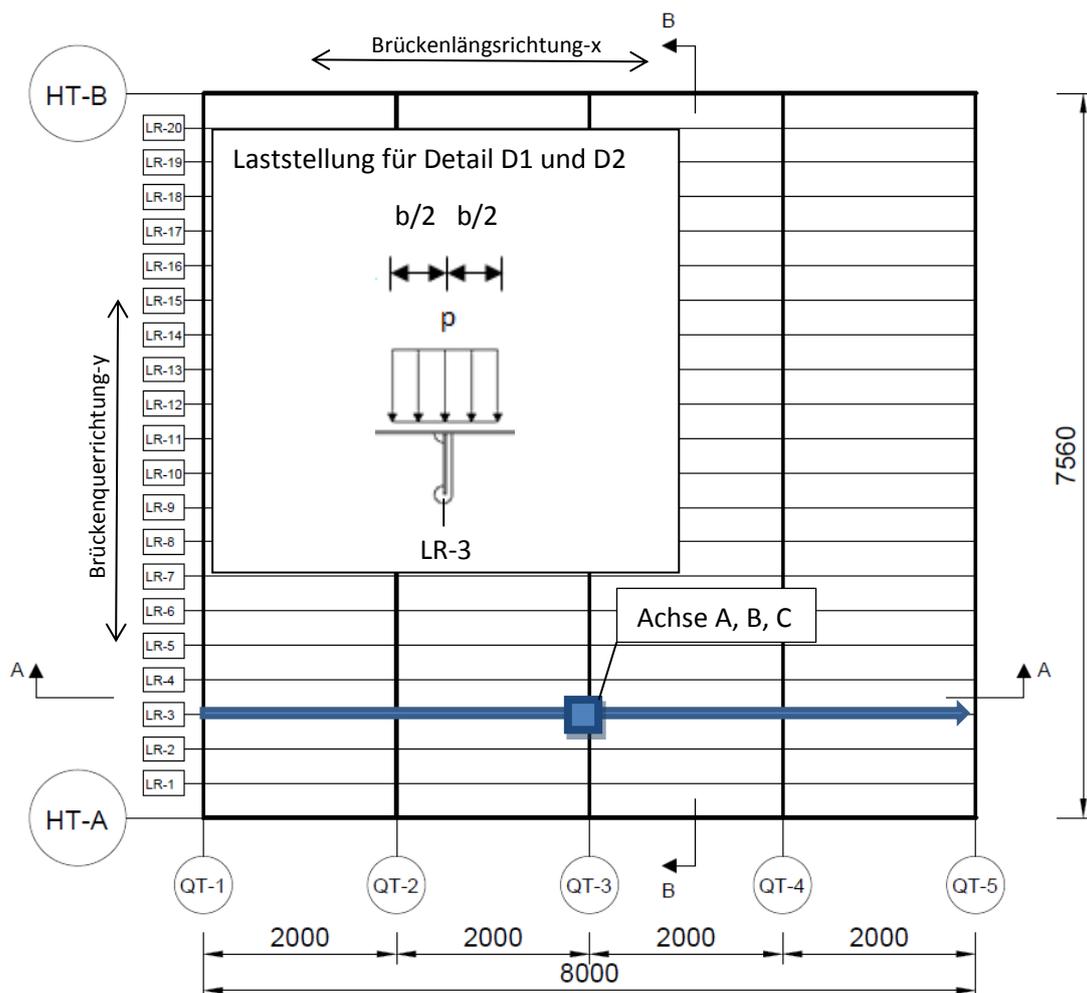


Abbildung 27: Lastzug für größtes Spannungsspiel in Detail D1 und D2

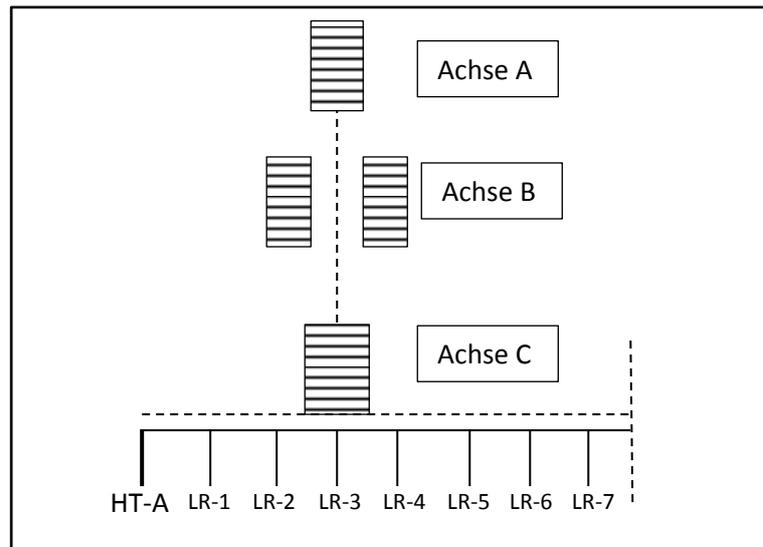


Abbildung 28: Position der Räder in Querrichtung für die zentrische Überfahrt

4.3 Querverteilungseinflusslinie in Brückenquerrichtung

Für weitere Untersuchungen bezüglich realer Achsgeometrien und dem Fahrspurverhalten von Schwerverkehr war es erforderlich, an dem maßgebenden Stellen bezüglich Detail D1 und D2, Querverteilungseinflusslinien für Einzel- und Zwillingräder zu erstellen. Die Einflusslinien sind im Abschnitt 5 dargestellt, wobei die maßgebende Position in Brückenlängsrichtung vom betrachteten Detailpunkt abhängig ist. Nachfolgend werden die Positionen in Querrichtung für die zwei Details dargestellt.

-Detail D1

Für das Detail D1 erfolgte die Ermittlung ist der Querverteilungseinflusslinien (QV-EFL) 360 mm in Brückenlängsrichtung von dem Querträger QT-3 entfernt (siehe Abbildung 29). Diese Position wurde gewählt, weil dort die größten Druckspannungen (σ_{\min}) in Detail D1 auftreten. Die Achslast wurde beiderseits der Blechachse von LR-3 verschoben, links und rechts versetzt um eine Einflusslinie in Querrichtung zu erhalten.

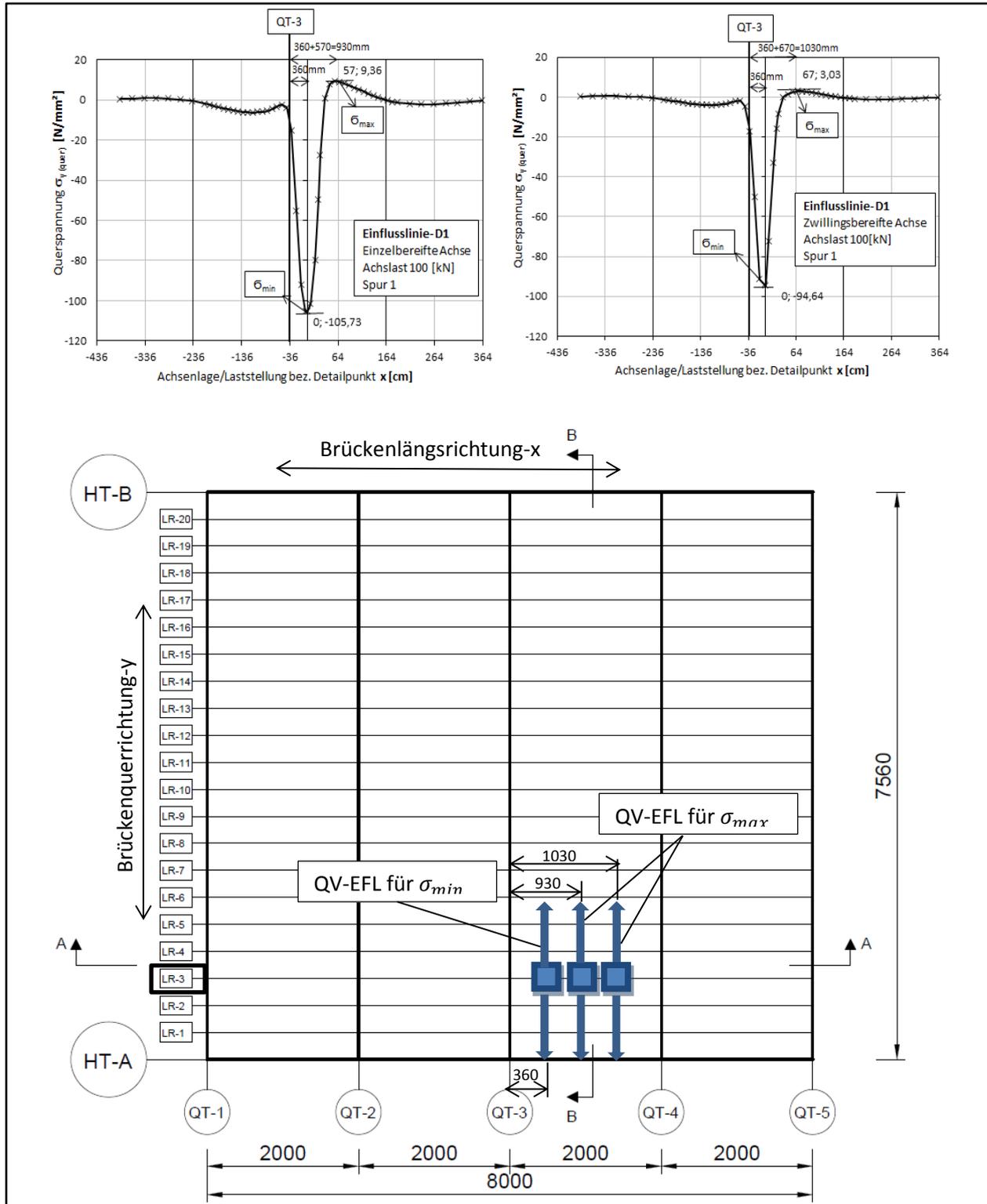


Abbildung 29: Position der Querverteilungseinflusslinie für D1 in Brückenquerrichtung bezüglich der maximal auftretenden Spannungen

Ergänzend erfolgte die Überprüfung der Spannungsänderung bei Detail D1 für die größte Zugspannung (σ_{max}), Belastung 930 mm (Einzelbereifte Achse) und 1030mm (Zwillingbereifte Achse) von Querträger QT-3 entfernt.

-Detail D2

Für das Detail D2 erfolgte die Ermittlung der Querverteilungseinflusslinie 800mm, in Brückenlängsrichtung von Querträger QT-3, entfernt (siehe Abbildung 30). Diese Position wurde gewählt, weil dort die größten Druckspannungen σ_{min} in Detail D2 auftreten. Die Achslast wurde beidseits der Blechachse von LR-3 verschoben, um eine Einflusslinie in Querrichtung zu erhalten.

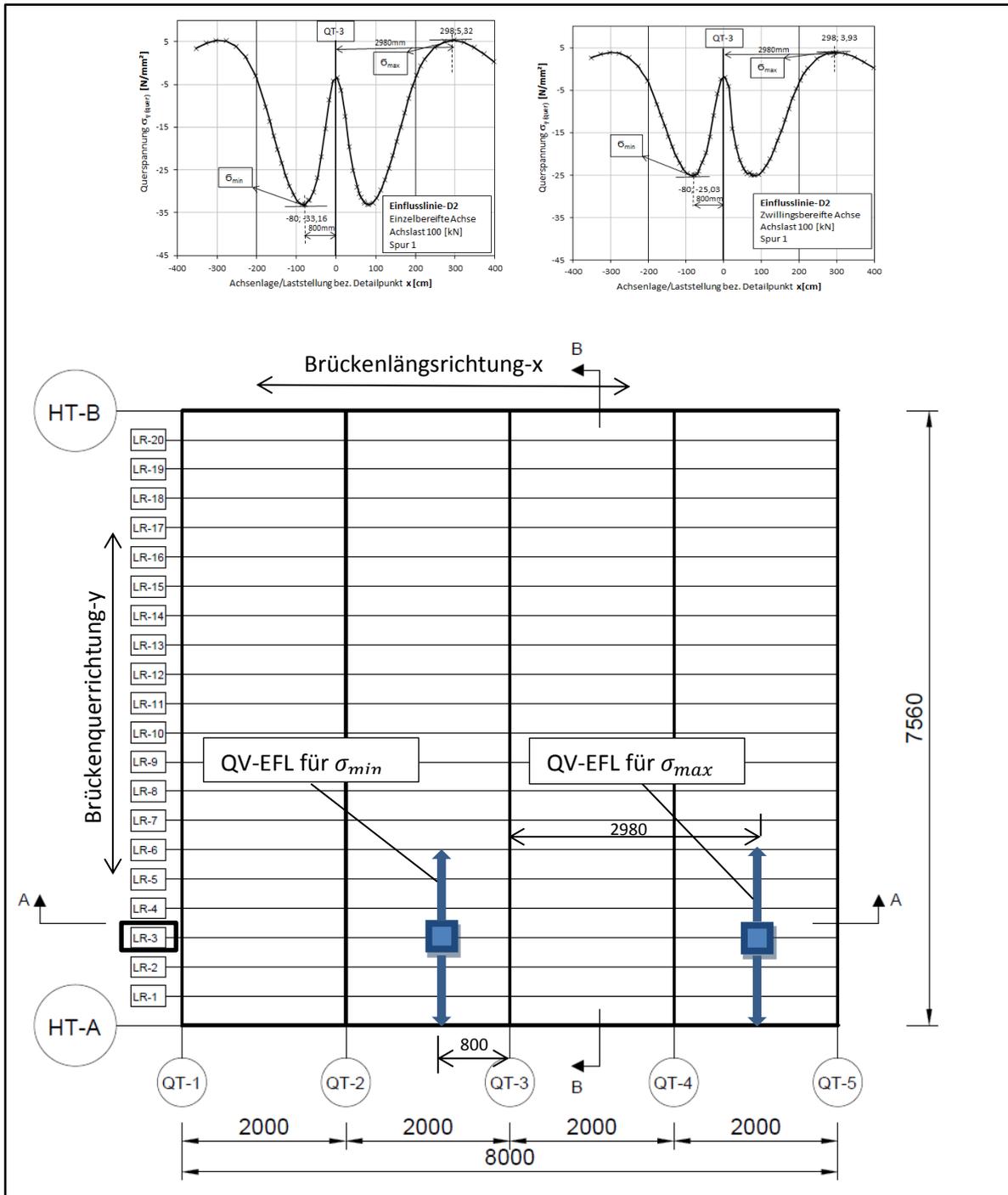


Abbildung 30: Position der Querverteilungseinflusslinie für D2 in Brückenquerrichtung bezüglich der maximal auftretenden Spannungen

Ergänzend erfolgte die Überprüfung der Spannungsänderung bei Detail D2 für die größten Zugspannungen (σ_{max}), Belastung 2980 mm von Querträger QT-3 entfernt.

5 Ergebnisse bezüglich zentrischer Überfahrt und Berücksichtigung der realen Achsgeometrie

In diesem Abschnitt werden nachfolgend die Ergebnisse der Simulation der Überfahrten dargestellt. Die Simulation der Überfahrten wurde mit dem Programm Abaqus durchgeführt. Für die Basis der Berechnungen wurde eine zentrische Überfahrt über die Längsrippe 3 durchgeführt. Die Stellen, wo die Spannungen ausgelesen wurden, sind genauer im Abschnitt 4.1 beschrieben. In der nachfolgenden Abbildung 31 ist die Position der Details am Deckblech in einem Grundriss nochmals dargestellt.

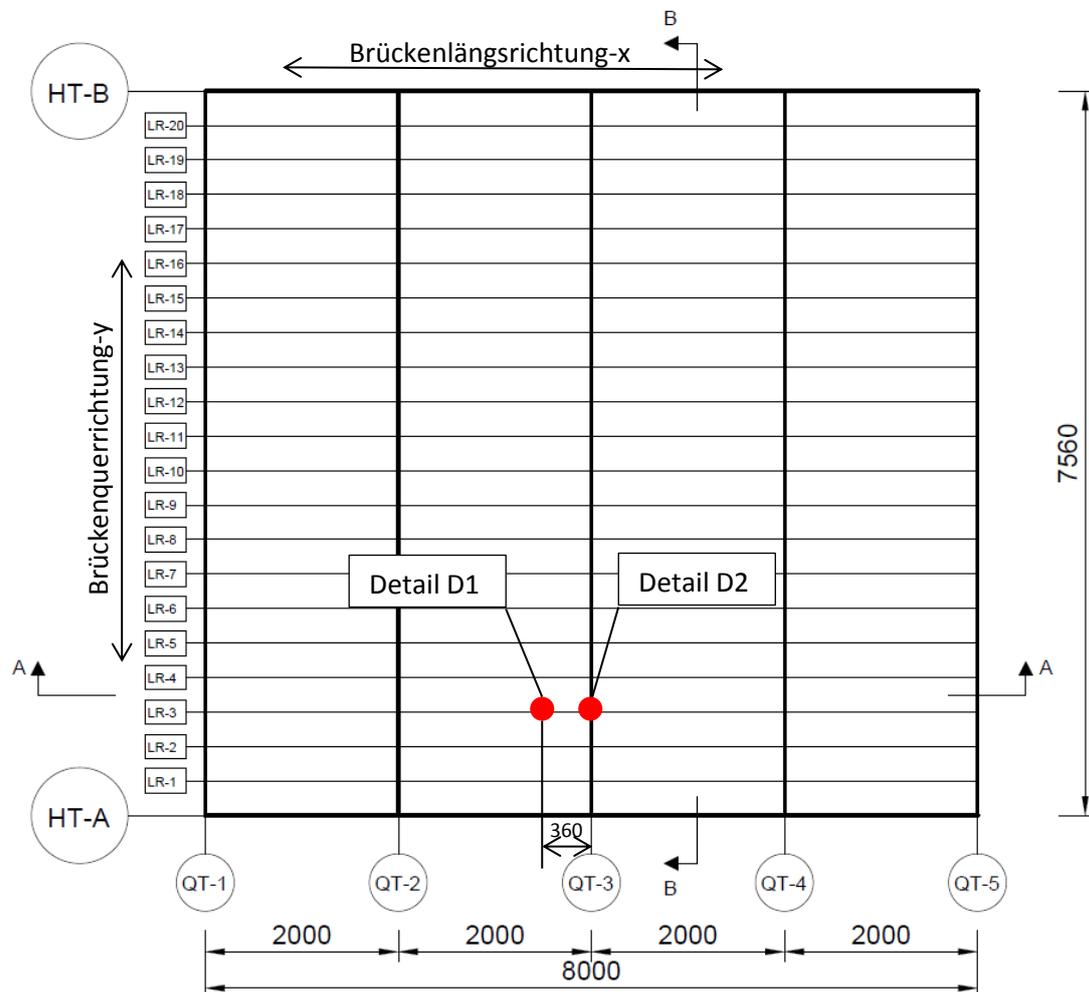


Abbildung 31: Lage von D1 und D2 im Grundriss

5.1 Detail D1

5.1.1 Darstellung der Spannungseinflusslinien infolge zentrischer Überfahrt aller Achsen

Aus der Simulation der zentrischen Überfahrt über Längsrippe 3 wurden die Spannungen im Detail D1 abgelesen. Die Spannung wurde nicht direkt im Detail D1 abgelesen, sondern an zwei benachbarten Punkten und mittels linearer Extrapolation wurde die Spannung im Detail D1 ausgerechnet. Die genaue Beschreibung der Linearen Extrapolationen für Detail D1 ist im Abschnitt 4.1 dargestellt. Die Spannungen wurden im Excel eingegeben und die Einflusslinien für die verschiedenen Achsen wurden erstellt.

Für die Berechnung der Einflusslinien wurde eine Achslast von 100 kN auf Achse A, B und C angesetzt. An den Einflusslinien kann man sehen, dass jede Achse aufgrund der lokal begrenzten Wirkung der Deckblechbiegung genau ein Spannungsspiel in dem Detailpunkt hervorruft, wobei das Maximum immer auftritt, wenn das Rad der Achse genau mittig über dem Detailpunkt D1 ist. Die nachfolgenden Abbildungen 32, 33, 34 aus Excel zeigen die Einflusslinien der Achsen A, B und C für das Detail D1 infolge rein zentrischer Überfahrt.

-Zentrische Überfahrt:

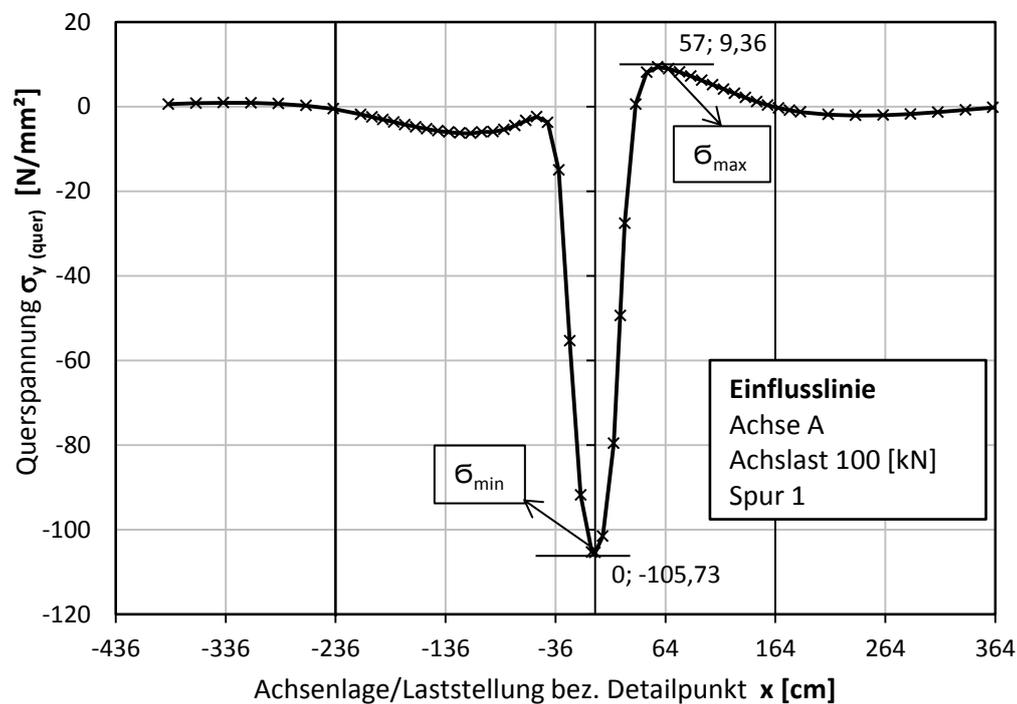


Abbildung 32: Spannungseinflusslinie D1 infolge Achse A

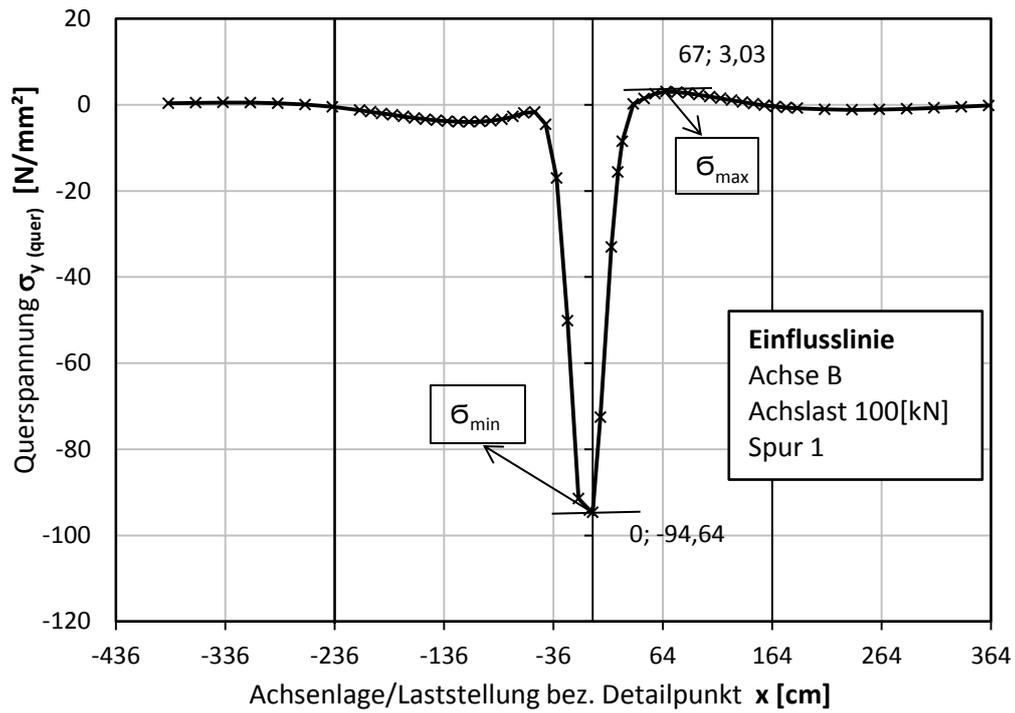


Abbildung 33: Spannungseinflusslinie D1 infolge Achse B

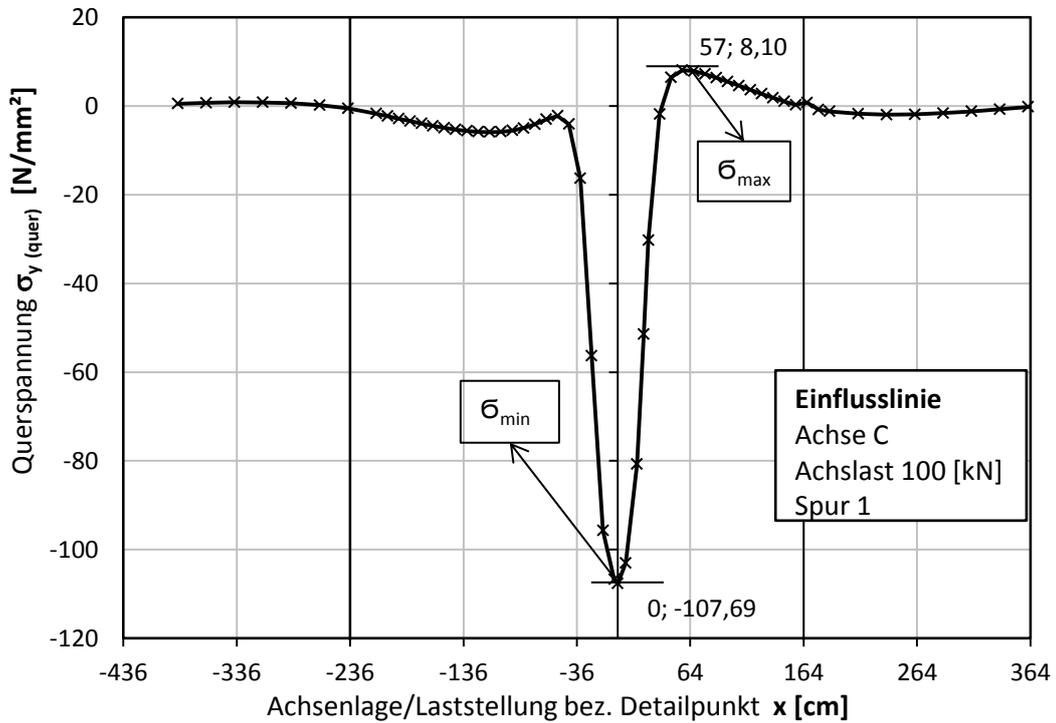


Abbildung 34: Spannungseinflusslinie infolge D1 Achse C

5.1.2 Darstellung der Spannungs-Zeitverläufe für Detail D1 infolge zentrischer Überfahrt aller Fahrzeuge

Anhand der Spannungseinflusslinien der einzelnen Achsen A bis C und unter Berücksichtigung Achsabstände, sowie Achslasten der Fahrzeugtypen konnten Spannungs-Weg-Verläufe für jedes Fahrzeug ermittelt werden.

- Spannungsverlauf im Detail D1 für Schwerfahrzeugtyp T1

In der nachfolgenden Abbildung 35 ist der Spannungsverlauf für den Schwerfahrzeugtyp T1 dargestellt und zeigt die Spannungswerte für Detail D1, wobei x den Abstand von der ersten Achse des Fahrzeugs bis zum Detail D1 zeigt.

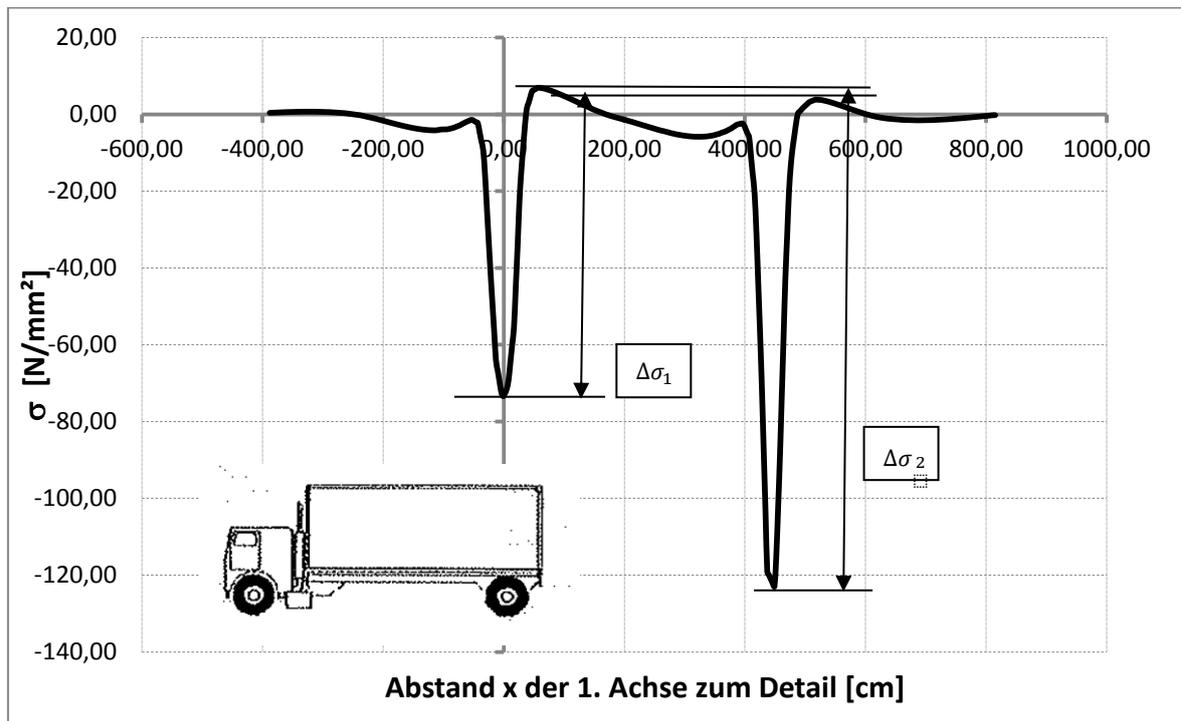


Abbildung 35: D1 – Spannungsverlauf infolge Überfahrt von Schwerfahrzeug Typ T1

Die Spannungsspiele für den Fahrzeugtyp kann man aus dem Spannungsverlauf (siehe Abbildung 35) ablesen, wobei sehr kleine Spannungsspiele nicht berücksichtigt wurden. Die Auslesung der Ergebnisse wurde für jeden Fahrzeugtyp analog durchgeführt (siehe Tabelle 3 bis 7). In der nachfolgenden Tabelle (siehe Tabelle 3) sind die Spannungsspiele für Schwerverkehrstyp T1 dargestellt.

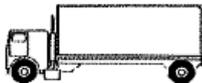
		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	71,95	20
$\Delta\sigma_2$	129,84	20

Tabelle 3: D1 - Spannungsspiele Schwerfahrzeug Typ T1

- Spannungsverlauf im Detail D1 für Schwerfahrzeugtyp T2

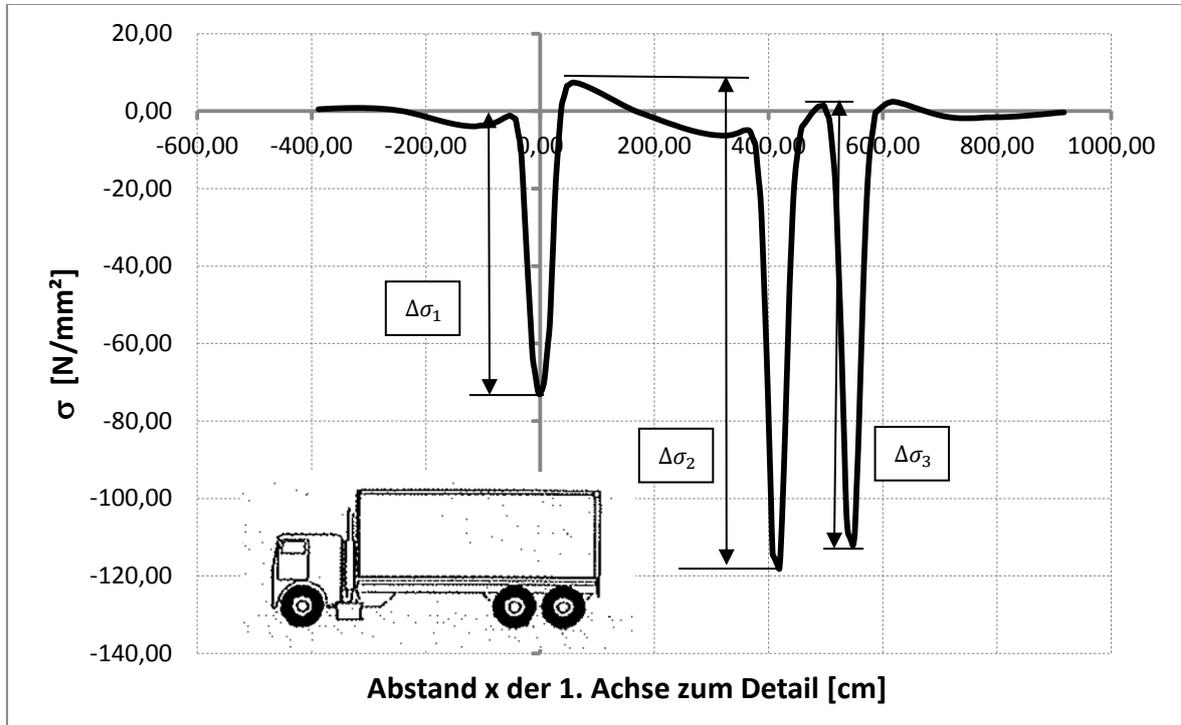


Abbildung 36: D1 - Spannungsverlauf infolge Überfahrt von Schwerfahrzeug Typ T2

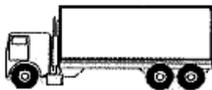
		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{\text{mm}^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	71,65	5
$\Delta\sigma_2$	125,48	5
$\Delta\sigma_3$	113,45	5

Tabelle 4: D1 - Spannungsspiele Schwerfahrzeug Typ T2

- Spannungsverlauf im Detail D1 für Schwerfahrzeugstyp T3

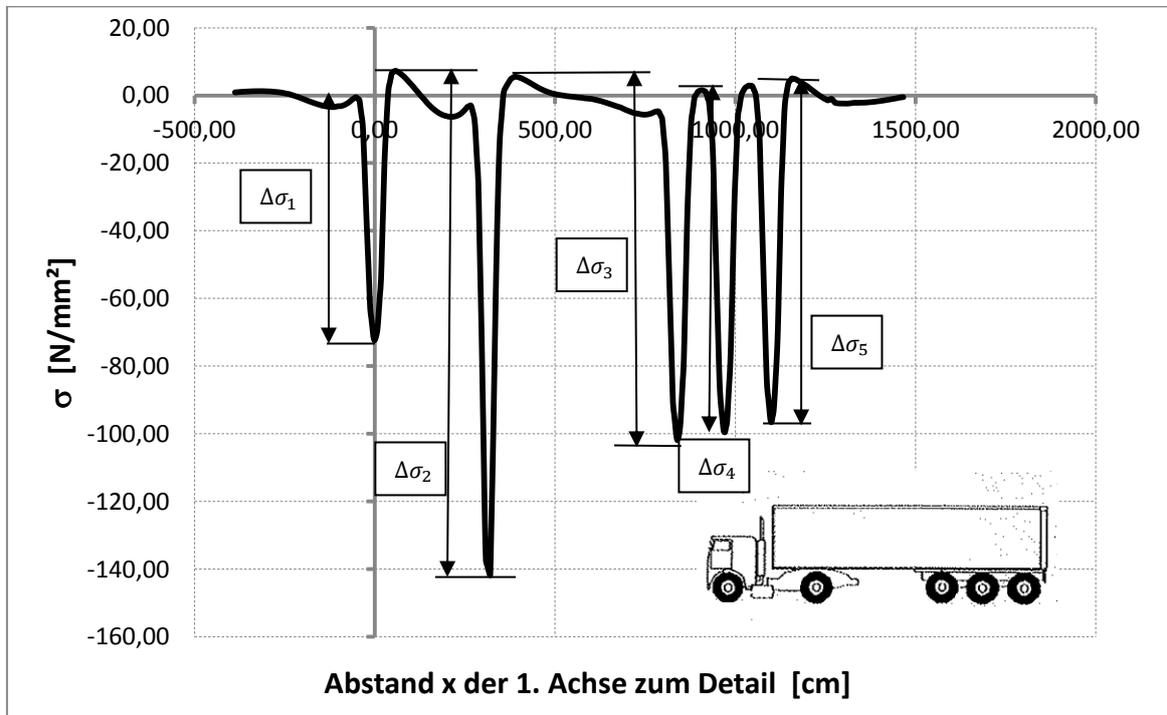


Abbildung 37: D1 – Spannungsverlauf infolge Überfahrt von Schwerfahrzeug Typ T3

$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	77,92	50
$\Delta\sigma_2$	147,24	50
$\Delta\sigma_3$	107,40	50
$\Delta\sigma_4$	101,07	50
$\Delta\sigma_5$	99,42	50

Tabelle 5: D1 - Spannungsspiele Schwerfahrzeug Typ T3

- Spannungsverlauf im Detail D1 für Schwerfahrzeugstyp T4

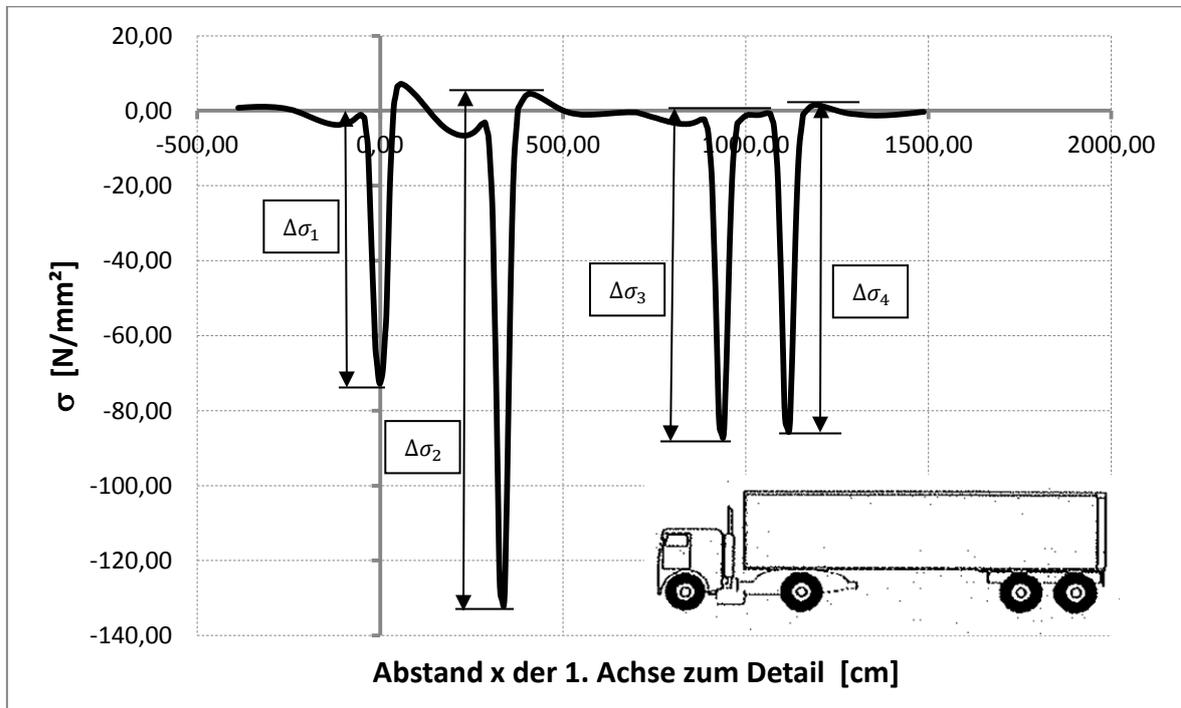


Abbildung 38: D1 - Spannungsverlauf infolge Überfahrt von Schwerfahrzeug Typ T4

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	71,71	15
$\Delta\sigma_2$	139,27	15
$\Delta\sigma_3$	90,22	15
$\Delta\sigma_4$	82,68	15

Tabelle 6: D1 - Spannungsspiele Schwerfahrzeug Typ T4

- Spannungsverlauf im Detail D1 für Schwerfahrzeugtyp T5

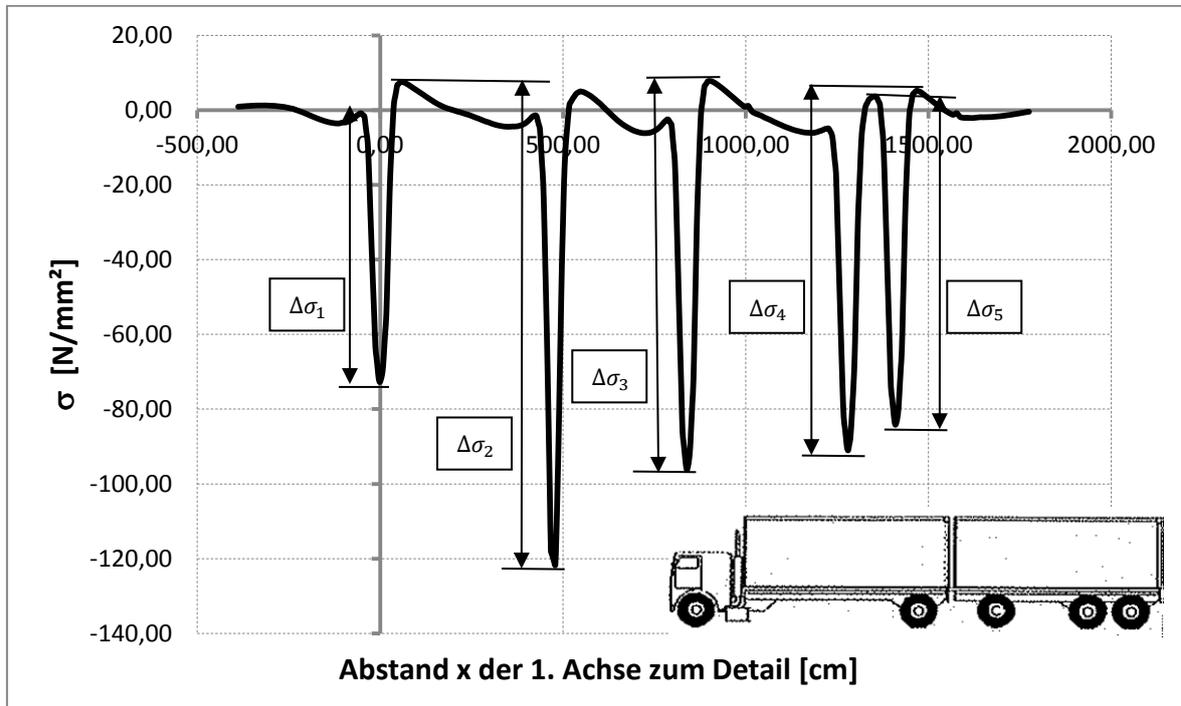


Abbildung 39: D1 - Spannungsverlauf infolge Überfahrt von Schwerfahrzeug Typ T5

$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	71,94	10
$\Delta\sigma_2$	126,71	10
$\Delta\sigma_3$	104,02	10
$\Delta\sigma_4$	96,22	10
$\Delta\sigma_5$	87,81	10

Tabelle 7: D1 - Spannungsspiele Schwerfahrzeug Typ T5

5.1.3 Gesamtkollektiv für Detail D1 aus ELM 4- zentrische Überfahrt

Die Abbildung 40 zeigt das Gesamtkollektiv infolge zentrischer Überfahrt aller Fahrzeuge für das Detail D1 bezogen auf insgesamt 100 Fahrzeuge. Mit den schwarzen Linien sind die schädigenden und mit grauen Linien die nicht schädigenden Lastwechsel dargestellt. Zuerst ist das Lastkollektiv für die zentrische Spurlage mit einer zugehörigen Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 100 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$ infolge Belastung aus Ermüdungslastmodell 4 dargestellt (siehe Abbildung 40).

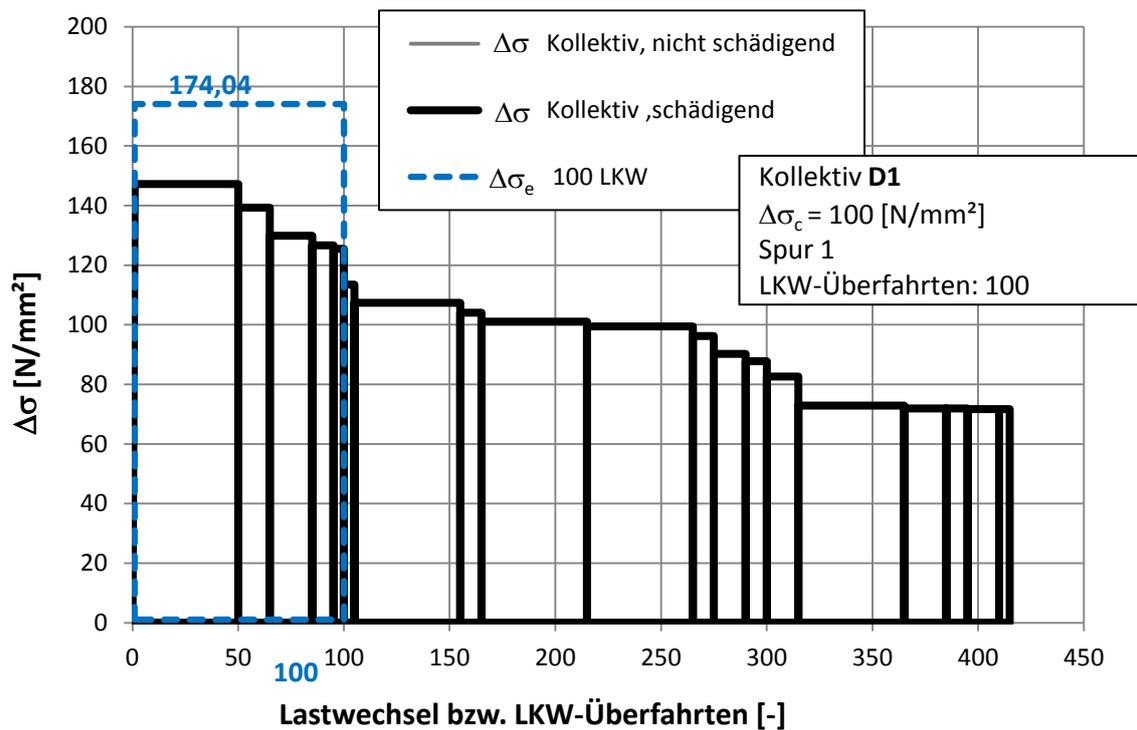


Abbildung 40: D1 - Lastkollektiv zentrische Spurlage $\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm²]

Das schadenäquivalente Einstufenkollektiv bezogen auf 100 Lastwechsel, ist mit $\Delta\sigma_e = 174,04 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$ als blau strichlierter Block eingezeichnet.

Es ist noch ein Lastkollektiv dargestellt mit einer fiktiven Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c = 40 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$ (siehe Abbildung 41).

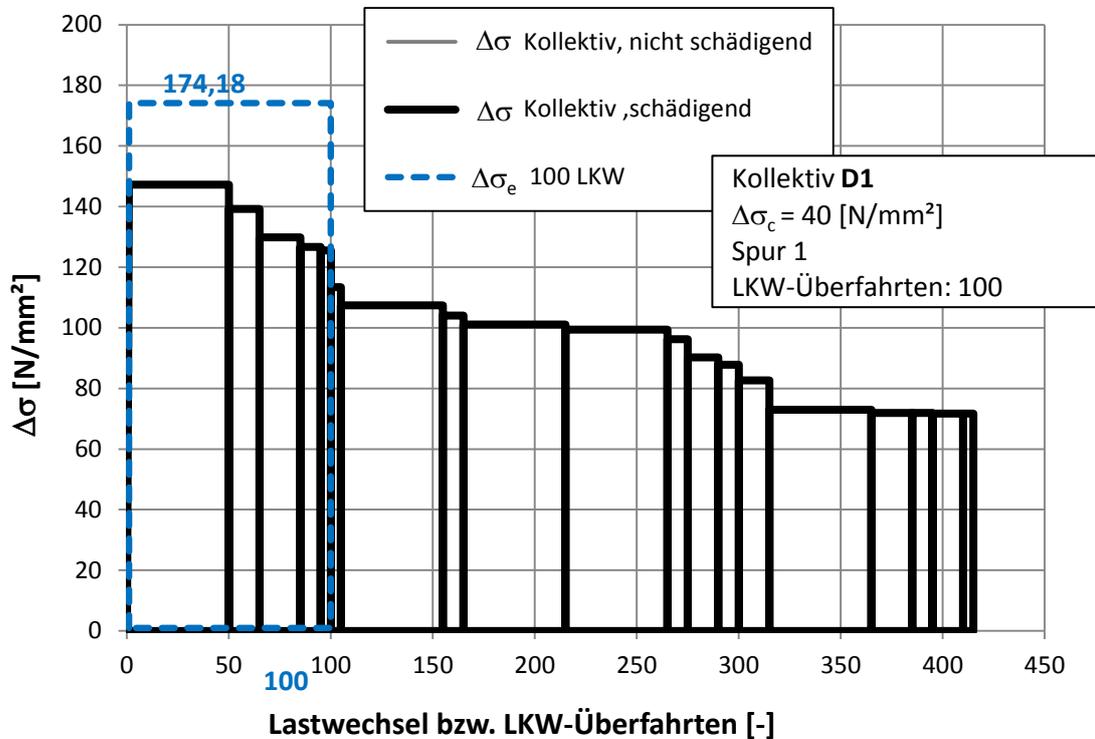


Abbildung 41: D1 - Lastkollektiv zentrische Spurlage $\Delta\sigma_c = 40 [N/mm^2]$

Diese niedrige Ermüdungsfestigkeit wurde gewählt, damit alle Spannungsspiele $\Delta\sigma_i$ größer als der Wert der Dauerfestigkeit ($\Delta\sigma_D \approx 0,737 * \Delta\sigma_c$) sind und als vollschädigend mit der Wöhlerlinien-Neigung $m^* = 3$ anzusetzen sind ($\Delta\sigma_i^3 * N_{r,i} = \Delta\sigma_D^3 * 5 * 10^6$). Der Vergleich mit Abbildung 40 zeigt jedoch keine nennenswerte Erhöhung des schadensäquivalenten Einstufenkollektivs $\Delta\sigma_e$.

5.1.4 Darstellung der Querverteilungseinflusslinie für Detail D1

Die Ermittlung der Einflusslinie in Brückenquerrichtung für das Detail D1 wurde im Abaqus gemacht. Die einzelbereiften Achsen A und C sind geometrisch sehr ähnlich, deshalb erfolgte die Ermittlung der Querverteilungseinflusslinie für einzelbereifte Achsen. Für die zwillingsbereifte Achse B erfolgte die Ermittlung der Einflusslinie in selber Form.

Die größte minimale Spannung (Druckspannung) tritt auf, wenn die Achslast (Einzel- und Zwillingsrad) genau über dem Detail D1 steht (360 mm entfernt von der Querrippe 3 in der Längsrichtung). Die größte maximale Spannung (Zugspannung) tritt bei Achse B (Zwillingsrad) auf, wenn die Achslast im Abstand von 1030 mm von der mittleren Querrippe QT-3 angreift. Die größte maximale Spannung (Zugspannung) tritt bei Achse C (Einzelrad) auf, wenn die Achslast im Abstand von 930 mm von der mittleren Querrippe QT-3 angreift (siehe Abbildung 29). An diesen Positionen in Brückenquerrichtung erfolgte somit die Ermittlung der Querverteilungseinflusslinie (QV-EFL) der einzel- und zwillingsbereiften Achsen.

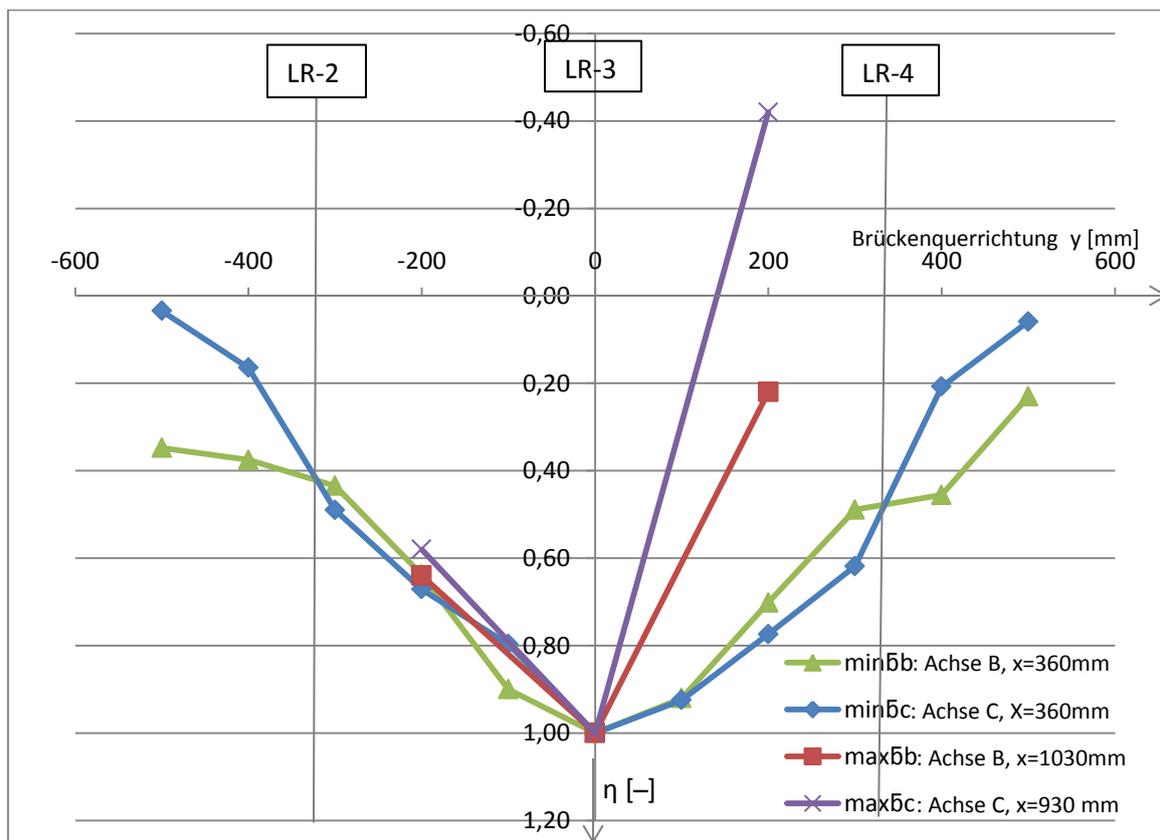
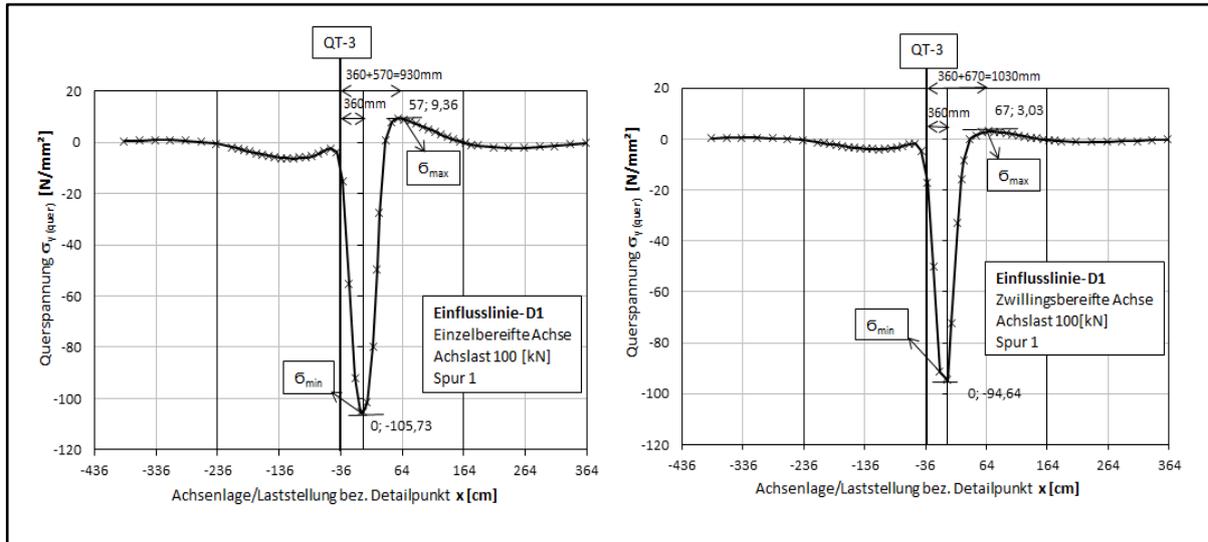


Abbildung 42: D1 - Einflusslinien Verlauf in Querrichtung für σ_{min} und σ_{max} der Achsen B und C



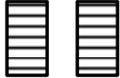
Achsen-Typ	Position x in Brückenlängsrichtung	
	min σ	max σ
A&C 	360 mm	360+570=930mm
B 	360 mm	670+360=1030mm

Tabelle 8: Position der Räder in Brückenlängsrichtung für D1

An der Abbildung 42 sind Einflusslinien Verläufe für die in Längsrichtung minimal (σ_{\min}) und maximal (σ_{\max}) auftretende Spannung eingezeichnet. An der x Achse ist der Abstand in Brückenquerrichtung (mm) von der Längsrippe 3 aufgetragen und an der y Achse sind die Skalierungsfaktoren η [-] aufgetragen.

Die blaue und die grüne Linie zeigen einen Einflusslinien Verlauf in Querrichtung für die minimale Spannung im Detail D1. Die blaue Linie zeigt den Verlauf für einzelbereifte Achsen (Achse C) und die grüne den Verlauf für zwillingsbereifte Achsen (Achse B).

Die rote und die violett Linie zeigen einen Einflusslinien Verlauf in Querrichtung für die maximale Spannung im Detail D1. Die violette Linie zeigt den Verlauf für einzelbereifte Achsen (Achse C) und die rote den Verlauf für zwillingsbereifte Achsen (Achse B).

5.1.5 Gesamtkollektiv für Detail D1 unter Berücksichtigung der realen Achsgeometrie

Als Basis dient das Lastkollektiv der zentrischen Überfahrt aller Achsen unmittelbar über Längsrippe LR-3 aus Abschnitt 5.1.3. Abbildung 43 zeigt nochmal dieses Lastkollektiv, wobei die einzelnen Kollektivteile betreffend des Fahrzeugtyps eingefärbt wurden und mit folgender Kennzeichnung versehen wurden:

T i - j - a (i - Fahrzeugtyp, j - Achsnummer, a - Achsart (A, B, C))

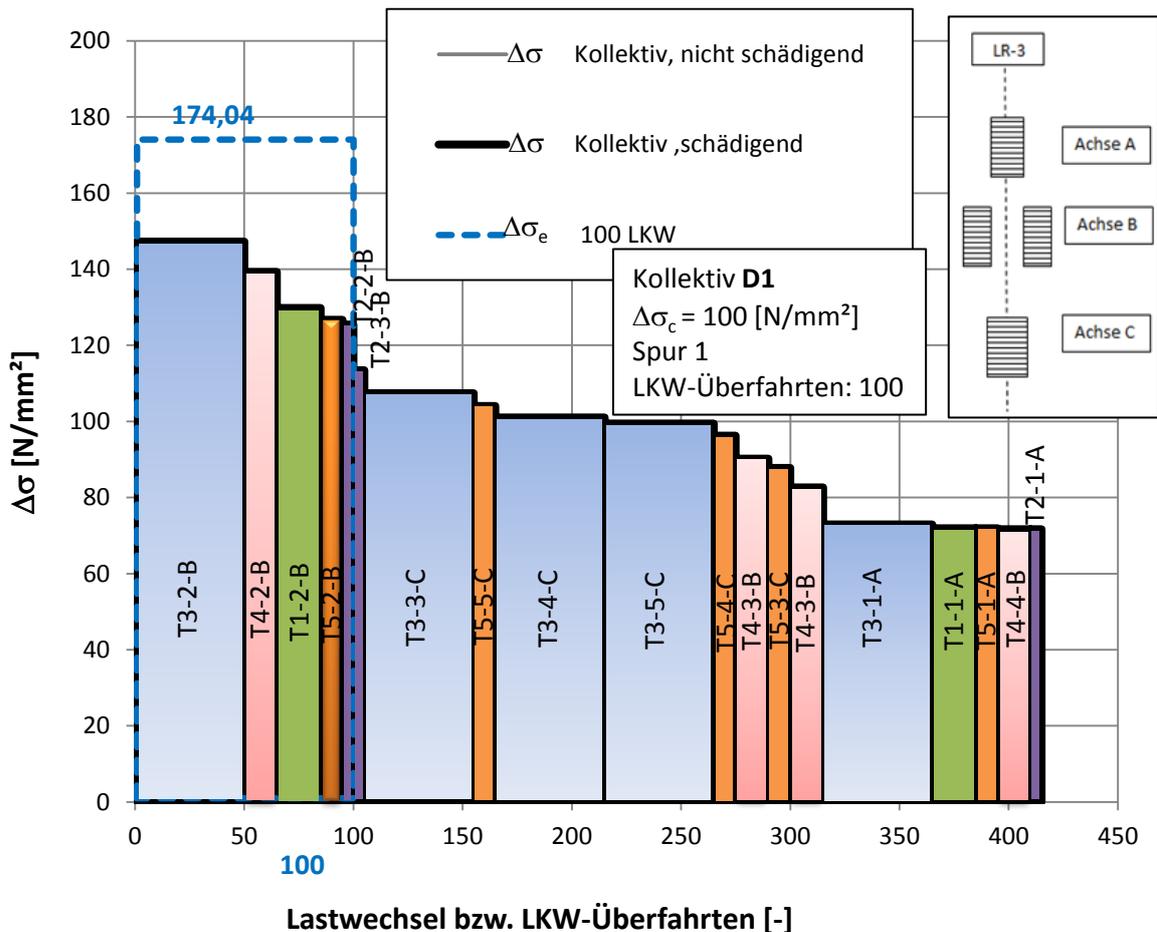
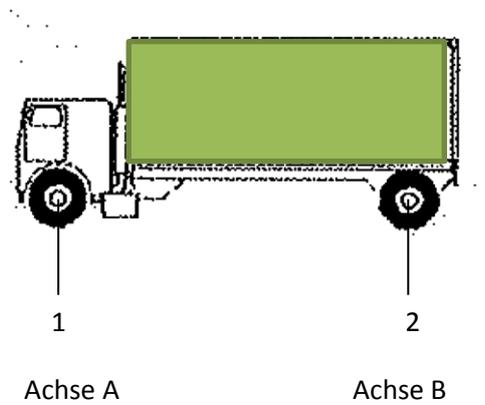


Abbildung 43: D1 - Lastkollektiv zentrische Spurlage $\Delta\sigma_c = 100 \text{ [N/mm}^2\text{]}$

Anhand der Kennzeichnung der Kollektivteile ist nun eine Zuordnung von Fahrzeugtyp, sowie Achse zu Kollektivteil möglich. In der nachfolgenden Abbildung 43-1 sind zwei Schwerfahrzeuge dargestellt, als Beispiel, wie die Kennzeichnung der Kollektivteile gemacht wurde.

Schwerfahrzeug Typ 1- T1



Schwerfahrzeug Typ 5- T5

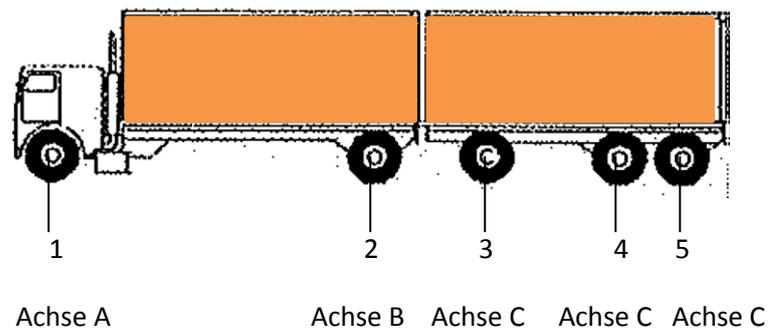


Abbildung 43-1: Beschreibung der Schwerfahrzeuge Typ 1 und Typ 5

An diesem Lastkollektiv kann man erkennen welche Spannung von welchem Fahrzeugtyp und von welcher Achse hervorgerufen wird. In dieser Arbeit wurden zwei Fälle für die Berücksichtigung der realen Achsgeometrie untersucht, welche in den nachfolgenden Abbildungen grafisch dargestellt werden.

-Fall 1 – Achse A, C mittig und Achse B versetzt

In dem ersten Fall wird das Kollektiv erstellt, wenn die Räder von der Achse C und A mittig über Längsrippe LR-3 fahren und die Räder der Achse B um 160mm in Brückenquerrichtung versetzt sind. Abbildung 44 zeigt die Querverteilungseinflusslinie für Detail D1 bezüglich Achse B und an der Position $x=360\text{mm}$ in Längsrichtung gemessen von der mittleren Querrippe QT-3.

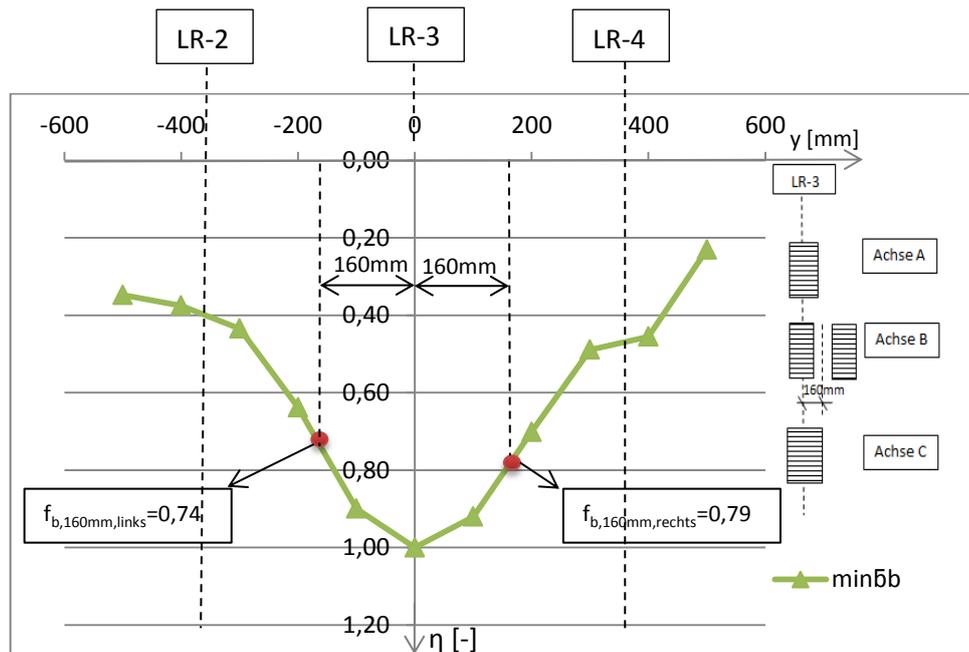


Abbildung 44: D1 Querverteilungseinflusslinie für σ_{\min} -Achse B

Aus der Abbildung 44 wird der maßgebende Faktor $f_{b,160\text{mm}}$ ausgelesen mit welchem die zutreffenden Kollektivteile bezüglich Achse B aus dem Basiskollektiv (zentrische Überfahrt-Abbildung 43) skaliert werden. Die Reduktionsfaktoren für Achse B sind: $f_{b,160\text{mm},\text{links}}=0,74$ und $f_{b,160\text{mm},\text{rechts}}=0,79$.

Abbildung 45 zeigt das Lastkollektiv für Detail D1-Fall 1, Achse B nach links versetzt (siehe Abbildung 44) unter dem Ansatz der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm²].

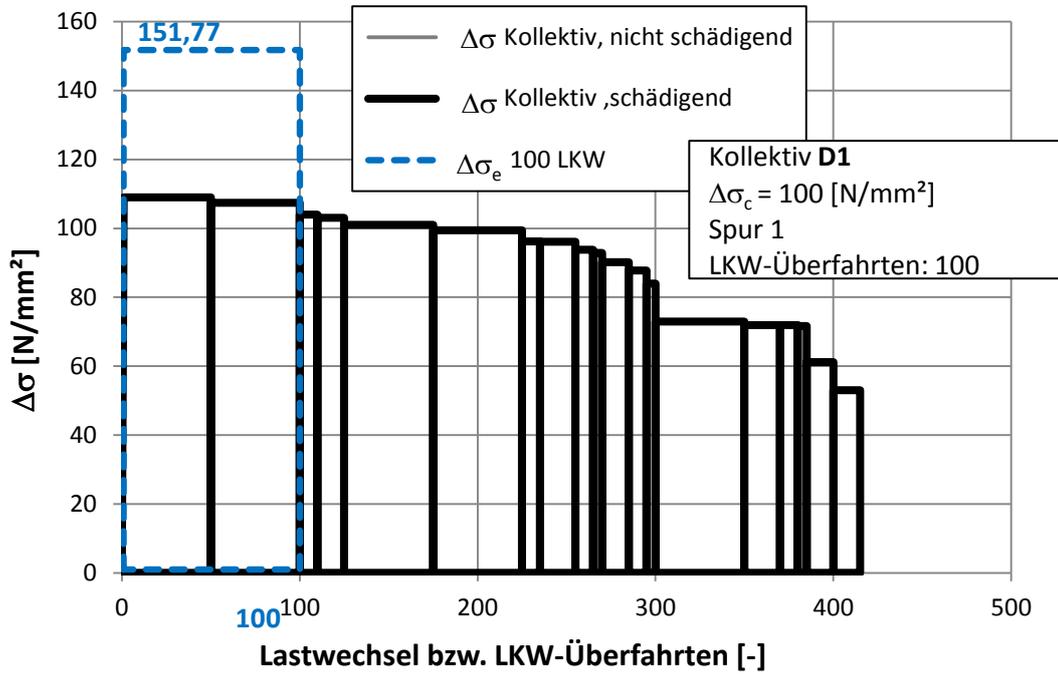


Abbildung 45: D1-Lastkollektiv A, C-mittig über LR-3 und B-links versetzt 160mm $\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm²]

Abbildung 46 zeigt das Lastkollektiv für Detail D1-Fall 1, Achse B nach links versetzt (siehe Abbildung 44) unter dem Ansatz der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c = 40$ [N/mm²].

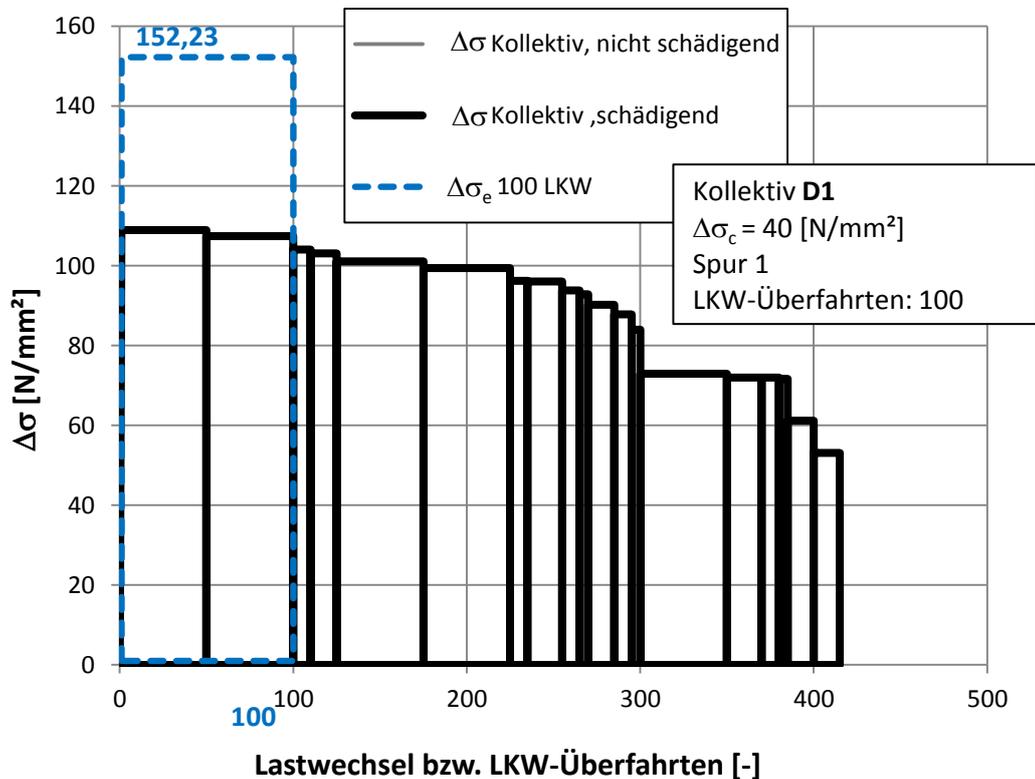


Abbildung 46: D1-Lastkollektiv A, C-mittig über LR-3 und B-links versetzt 160mm $\Delta\sigma_c = 40$ [N/mm²]

Abbildung 47 zeigt das Lastkollektiv für Detail D1-Fall 1, Achse B nach rechts versetzt (siehe Abbildung 44) unter dem Ansatz der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm²].

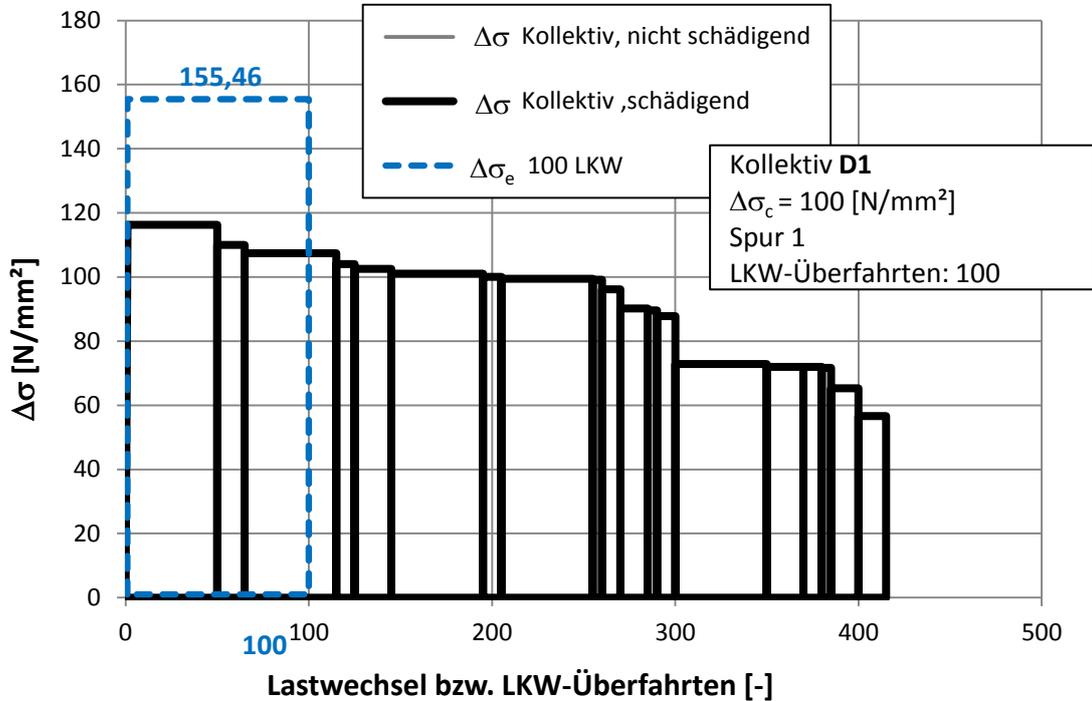


Abbildung 47: D1-Lastkollektiv A, C-mittig über LR-3 und B-rechts versetzt 160mm $\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm²]

Abbildung 48 zeigt das Lastkollektiv für Detail D1-Fall 1, Achse B nach rechts versetzt (siehe Abbildung 44) unter dem Ansatz der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c = 40$ [N/mm²].

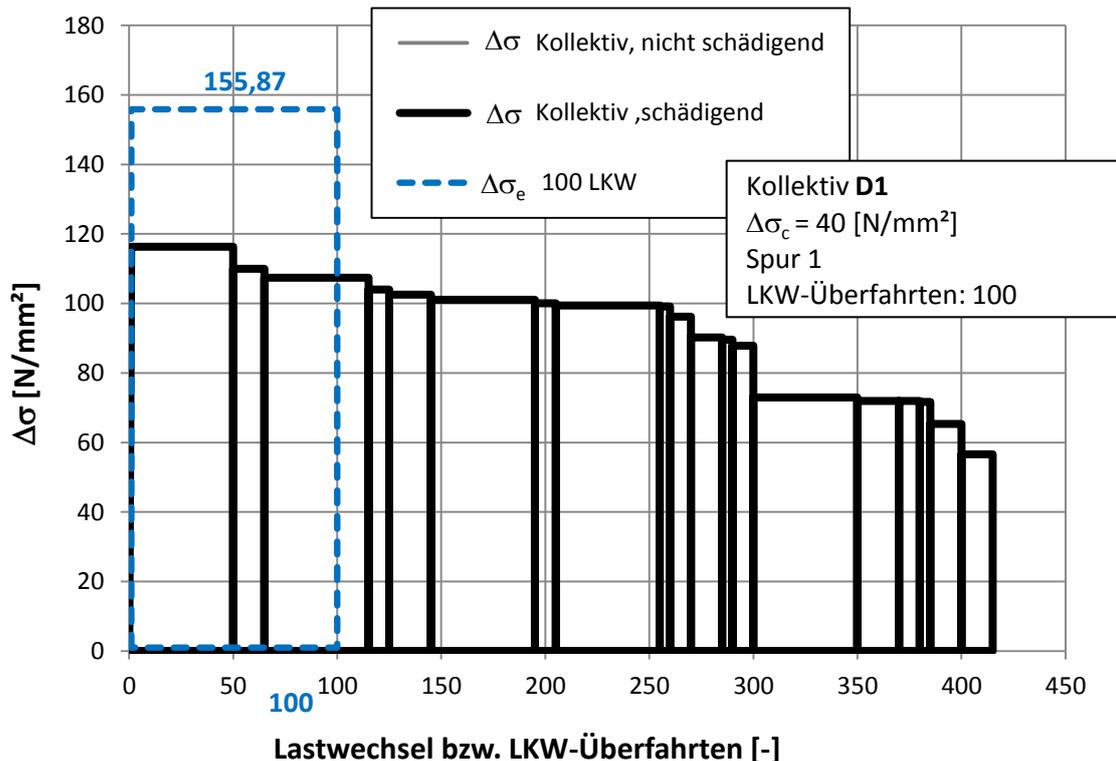


Abbildung 48: D1-Lastkollektiv A, C-mittig über LR-3 und B-rechts versetzt 160mm $\Delta\sigma_c = 40$ [N/mm²]

Fall 1	$\Delta\sigma_c = 100 \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$\Delta\sigma_c = 40 \text{ [N/mm}^2\text{]}$
Achse A, C-mittig über LR-3 und B links versetzt um 160 mm $\Delta\sigma_e$ bezogen auf 100LKW	151,77	152,23
Achse A, C-mittig über LR-3 und B rechts versetzt um 160 mm $\Delta\sigma_e$ bezogen auf 100LKW	155,46	155,87

Tabelle 9: D1-Darstellung der Ergebnisse für Fall 1

$\Delta\sigma_e = 174,04 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ } zentrische Überfahrt aller Achsen

Reduktion des schadensäquivalenten Einstufenkollektives durch Berücksichtigung realer Achsgeometrie (FALL 1): $\frac{155,46}{174,04} = 0,89$.

- Fall 2 – Achse B mittig und Achse A, C versetzt

In dem zweiten Fall wird das Kollektiv erstellt, wenn die Räder von der Achse B mittig über Längsrippe LR-3 fahren und die Räder der Achse C und A um 160mm in Brückenquerrichtung versetzt sind. Abbildung 49 zeigt die Querverteilungseinflusslinie für Detail D1 bezüglich Achse C und an der Position $x=360\text{mm}$ in Längsrichtung gemessen von der mittleren Querrippe QT-3.

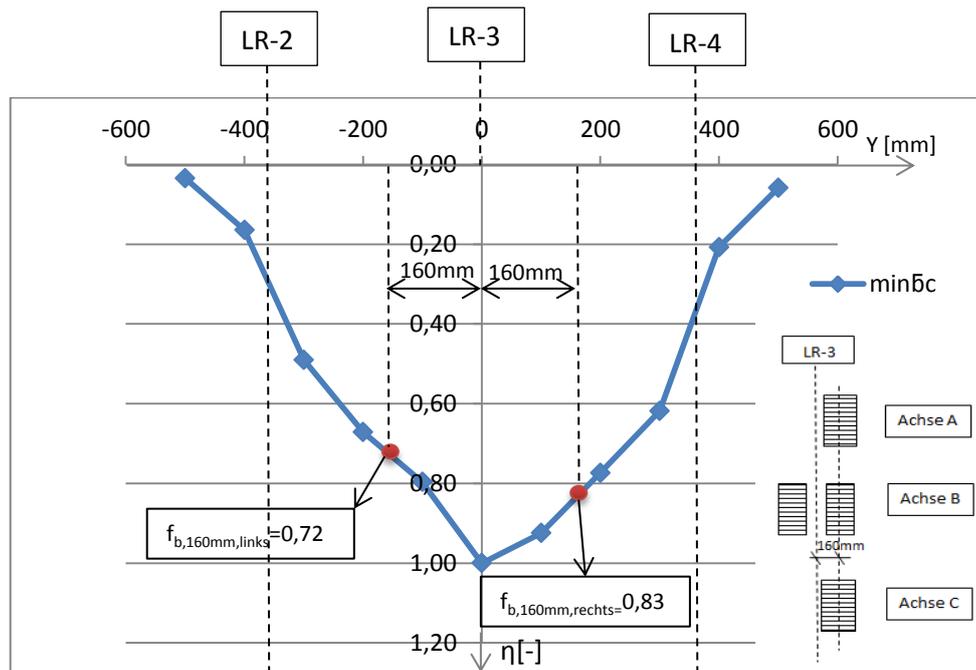


Abbildung 49: D1 Querverteilungseinflusslinie für σ_{\min} -Achse C

Aus der Abbildung 49 wird der maßgebende Faktor $f_{c,160\text{mm}}$ ausgelesen mit welchem die zutreffenden Kollektivteile bezüglich Achse C aus dem Basiskollektiv (zentrische Überfahrt-Abbildung 43) skaliert werden. Die Reduktionsfaktoren für Achse C sind: $f_{c,160\text{mm},\text{links}}=0,72$ und $f_{c,160\text{mm},\text{rechts}}=0,83$.

Abbildung 50 zeigt das Lastkollektiv für Detail D1-Fall 2, Achse C nach links versetzt (siehe Abbildung 49) unter dem Ansatz der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm²].

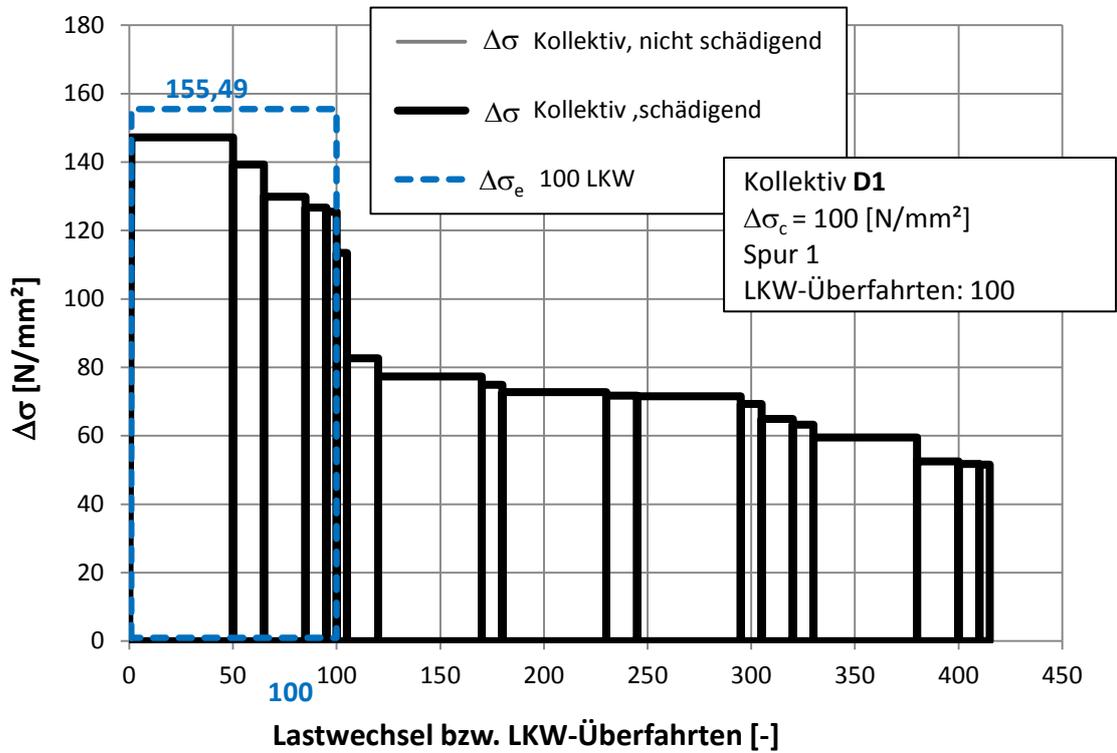


Abbildung 50: D1-Lastkollektiv B mittig über LR-3 und A, C-links versetzt 160mm $\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm²]

Abbildung 51 zeigt das Lastkollektiv für Detail D1-Fall 2, Achse C nach links versetzt (siehe Abbildung 49) unter dem Ansatz der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c = 40$ [N/mm²].

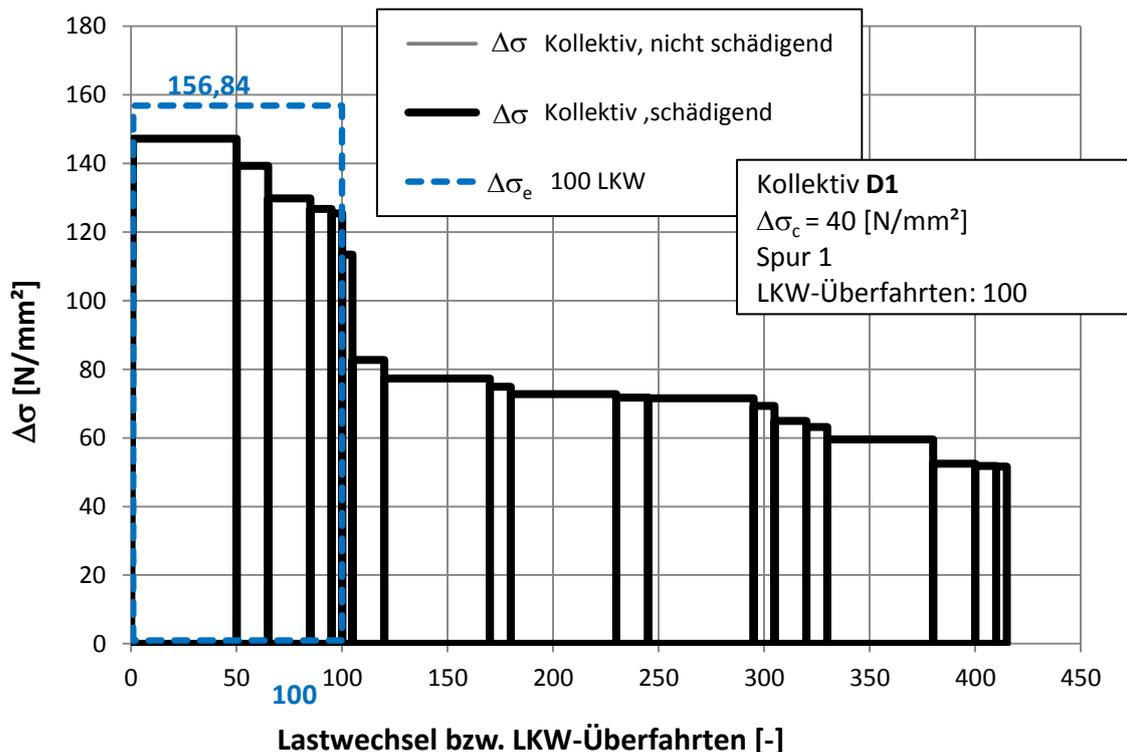


Abbildung 51: D1-Lastkollektiv B mittig über LR-3 und A, C-links versetzt 160mm $\Delta\sigma_c = 40$ [N/mm²]

Abbildung 52 zeigt das Lastkollektiv für Detail D1-Fall 2, Achse C nach rechts versetzt (siehe Abbildung 49) unter dem Ansatz der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm²].

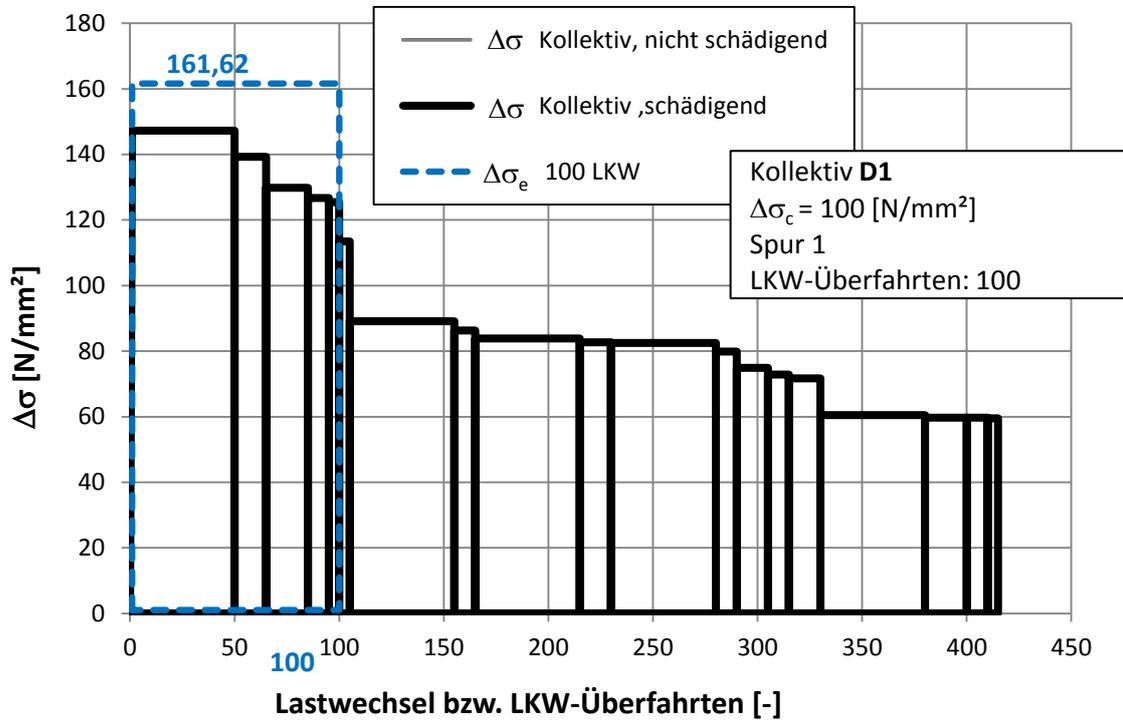


Abbildung 52: D1-Lastkollektiv B mittig über LR-3 und A, C-rechts versetzt 160mm $\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm²]

Abbildung 53 zeigt das Lastkollektiv für Detail D1-Fall 2, Achse C nach rechts versetzt (siehe Abbildung 49) unter dem Ansatz der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c = 40$ [N/mm²].

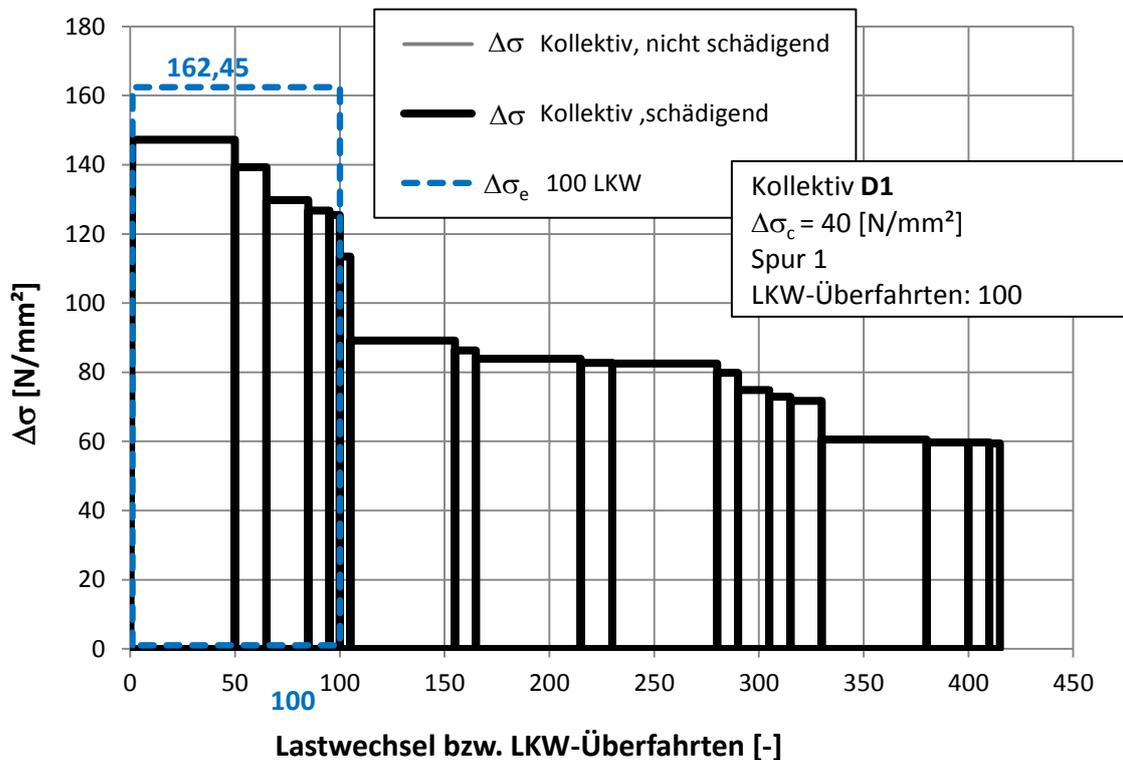


Abbildung 53: D1-Lastkollektiv B mittig über LR-3 und A, C-rechts versetzt 160mm $\Delta\sigma_c = 40$ [N/mm²]

Fall 2	$\Delta\sigma_c = 100 \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$\Delta\sigma_c = 40 \text{ [N/mm}^2\text{]}$
Achse B-mittig über LR-3 und A, C links versetzt um 160 mm $\Delta\sigma_e$ bezogen auf 100LKW	155,49	156,84
Achse B-mittig über LR-3 und A, C rechts versetzt um 160 mm $\Delta\sigma_e$ bezogen auf 100LKW	161,62	162,45

Tabelle 10: D1-Darstellung der Ergebnisse für Fall 2

Maßgebende Achsgeometrie für Detail D1:

Achse B mittig und Achsen A, C rechts versetzt.

$\Delta\sigma_e = 174,04 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ } zentrische Überfahrt aller Achsen

Reduktion des schadensäquivalenten Einstufenkollektives durch Berücksichtigung realer Achsgeometrie (FALL 2): $\frac{161,62}{174,04} = 0,93$.

5.2 Detail D2

5.2.1 Darstellung der Spannungseinflusslinien infolge zentrischer Überfahrt aller Achsen

Aus der Simulation der zentrischen Überfahrt über Längsrippe 3 wurden die Spannungen im Detail D2 abgelesen. Die Spannung wurde direkt im Detail D2 (Anschluss der Längsrippe an die Querrippe) abgelesen. Die Spannungen wurden im Excel eingegeben und die Einflusslinien für die verschiedenen Achsen wurden erstellt.

Für die Berechnung der Einflusslinien wurde eine Achslast von 100 kN auf Achse A, B und C angesetzt. Die größten Druckspannungen treten bei Detail D2 auf, wenn die Achslast im Abstand von $x=800\text{mm}$ in Längsrichtung von der mittleren Querrippe QT-3 entfernt, angreift. Die größte Zugspannung resultieren zufolge der Achslastposition $x=2980\text{mm}$ in Längsrichtung, von QT-3 entfernt. Die nachfolgenden Abbildungen 54, 55, 56 aus Excel zeigen die Einflusslinien der Achsen A, B und C für das Detail D2 infolge rein zentrischer Überfahrt.

-Zentrische Überfahrt:

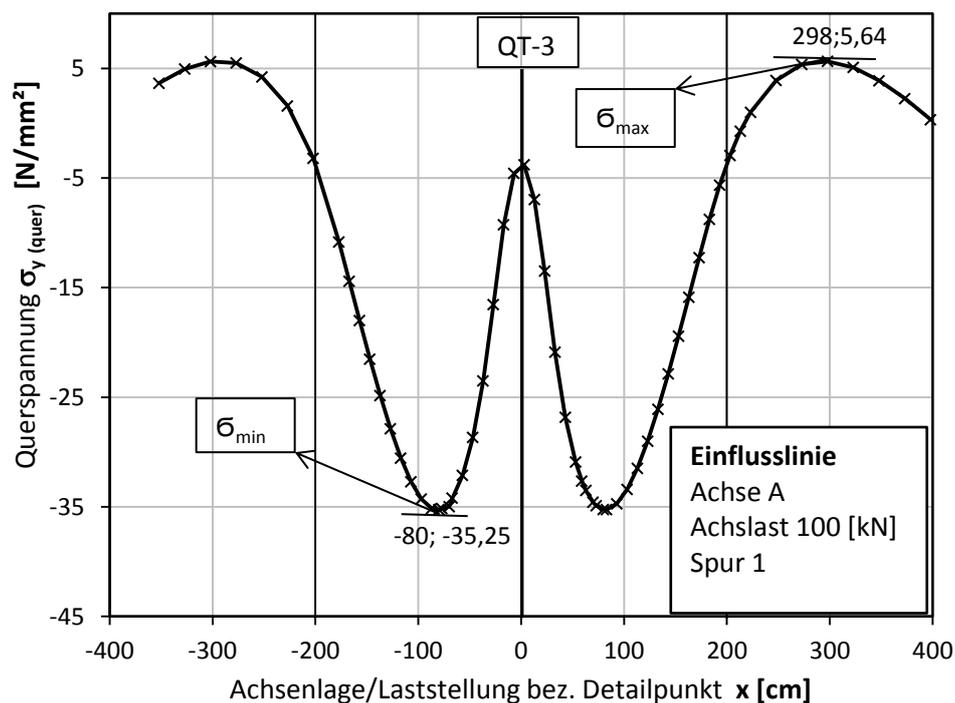


Abbildung 54: Spannungseinflusslinie D2 infolge Achse A

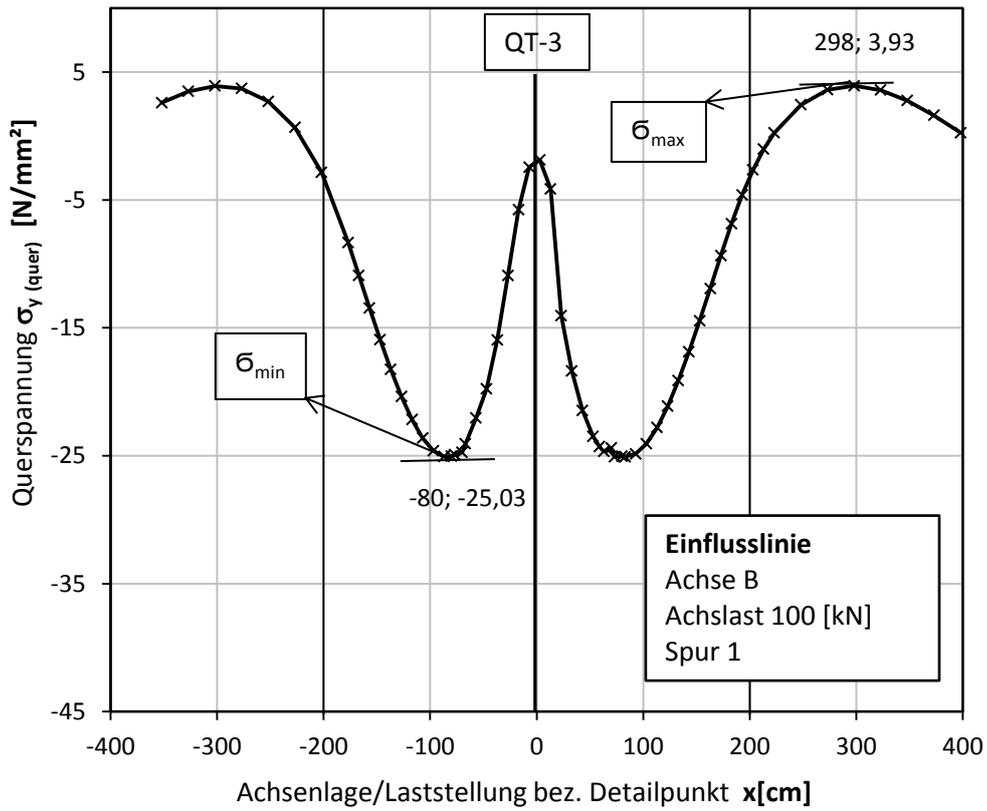


Abbildung 55: Spannungseinflusslinie D2 infolge Achse B

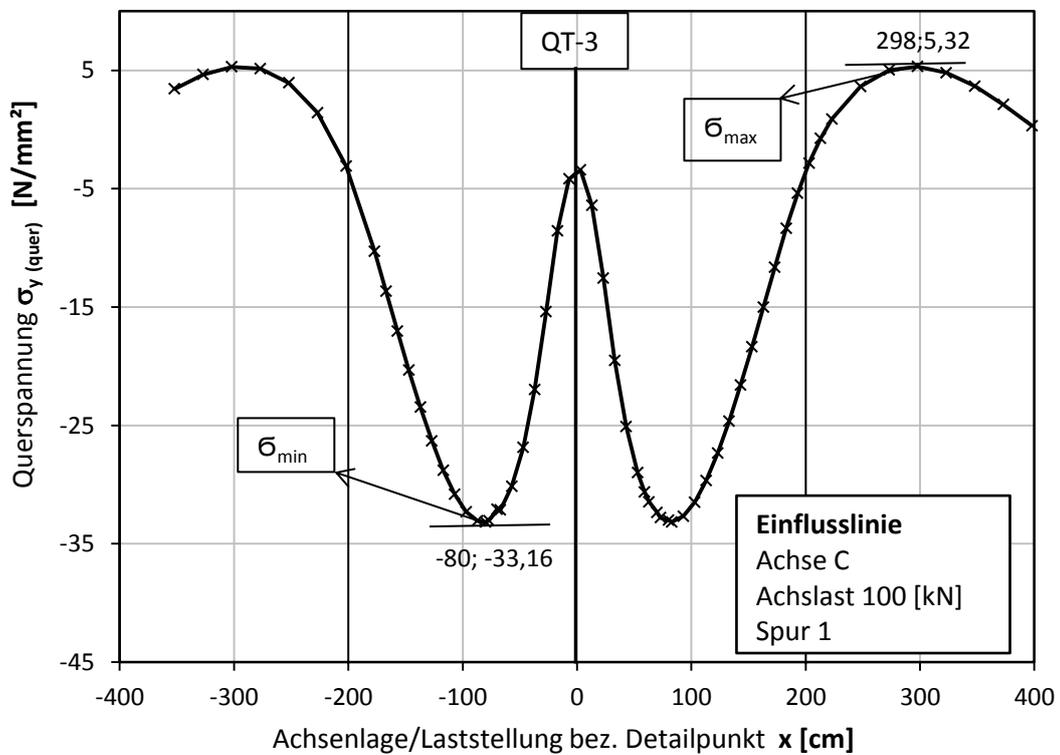


Abbildung 56: Spannungseinflusslinie infolge D2 Achse C

5.2.2 Darstellung der Spannungs-Zeitverläufe für Detail D2 infolge zentrischer Überfahrt aller Fahrzeuge

Anhand der Spannungseinflusslinien der einzelnen Achsen A bis C unter Berücksichtigung Achsabstände, sowie Achslasten der Fahrzeugtypen konnten Spannungs-Weg-Verläufe für jedes Fahrzeug ermittelt werden.

- Spannungsverlauf im Detail D2 für Schwerfahrzeugtyp T1

In der nachfolgenden Abbildung 57 ist der Spannungsverlauf für den Schwerfahrzeugtyp T1 dargestellt und zeigt die Spannungswerte für Detail D2, wobei x den Abstand von der ersten Achse des Fahrzeugs bis zum Detail D2 zeigt.

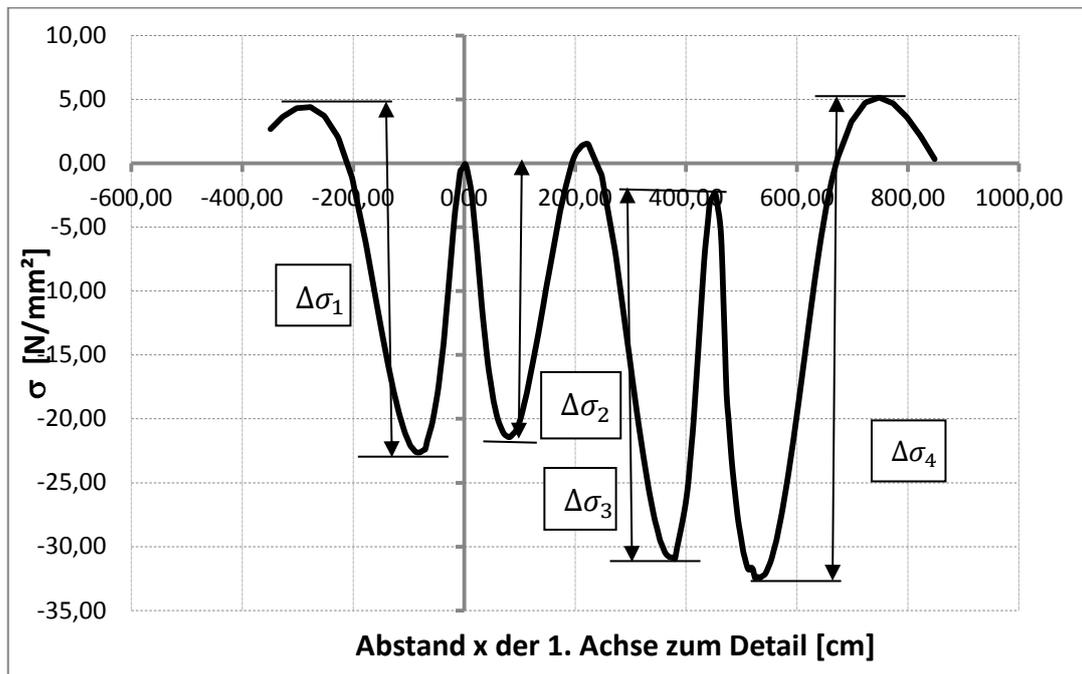


Abbildung 57: D2 – Spannungsverlauf infolge Überfahrt von Schwerfahrzeug Typ T1

Die Spannungsspiele für den Fahrzeugtyp kann man aus dem Spannungsverlauf (siehe Abbildung 57) ablesen, wobei sehr kleine Spannungsspiele nicht berücksichtigt wurden. Die Auslesung der Ergebnisse wurde für jeden Fahrzeugtyp analog durchgeführt (siehe Tabelle 11 bis 15). In der nachfolgenden Tabelle (siehe Tabelle 11) sind die Spannungsspiele für Schwerverkehrstyp T1 dargestellt.

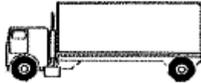
		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	27,04	20
$\Delta\sigma_2$	21,38	20
$\Delta\sigma_3$	28,65	20
$\Delta\sigma_4$	37,53	20

Tabelle 11: D2 - Spannungsspiele Schwerfahrzeug Typ T1

- Spannungsverlauf im Detail D2 für Schwerfahrzeugtyp T2

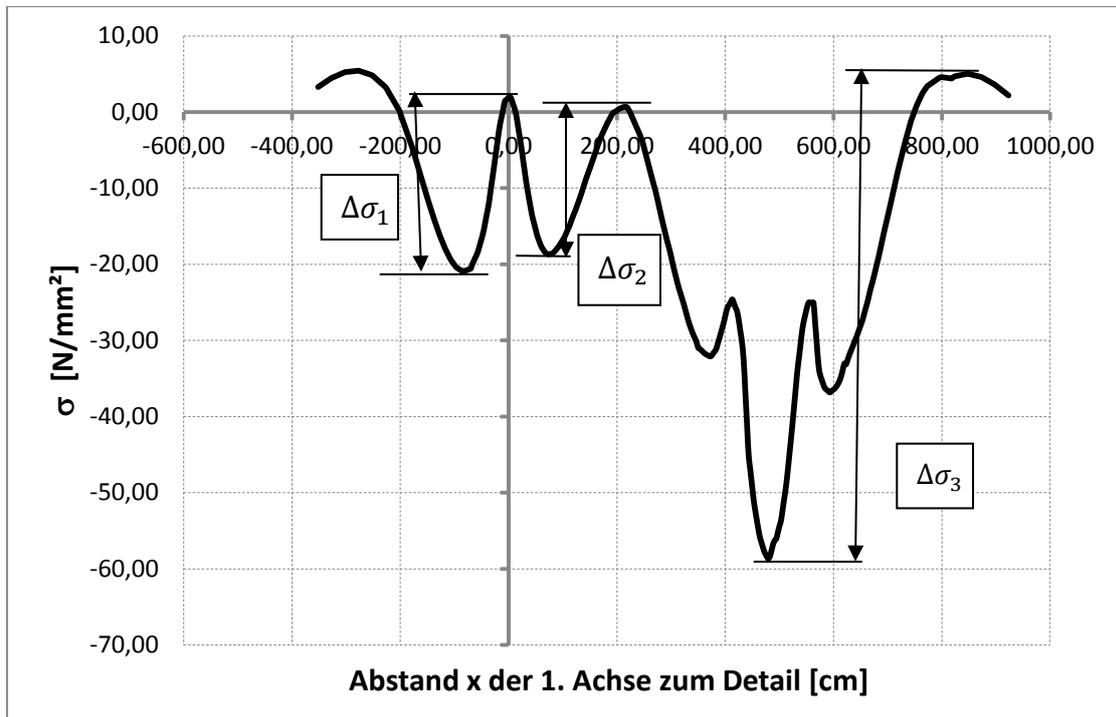


Abbildung 58: D2 – Spannungsverlauf infolge Überfahrt von Schwerfahrzeug Typ T2

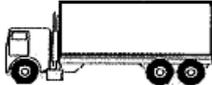
		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	22,91	5
$\Delta\sigma_2$	18,00	5
$\Delta\sigma_3$	63,70	5

Tabelle 12: D2 - Spannungsspiele Schwerfahrzeug Typ T2

- Spannungsverlauf im Detail D2 für Schwerfahrzeugtyp T3

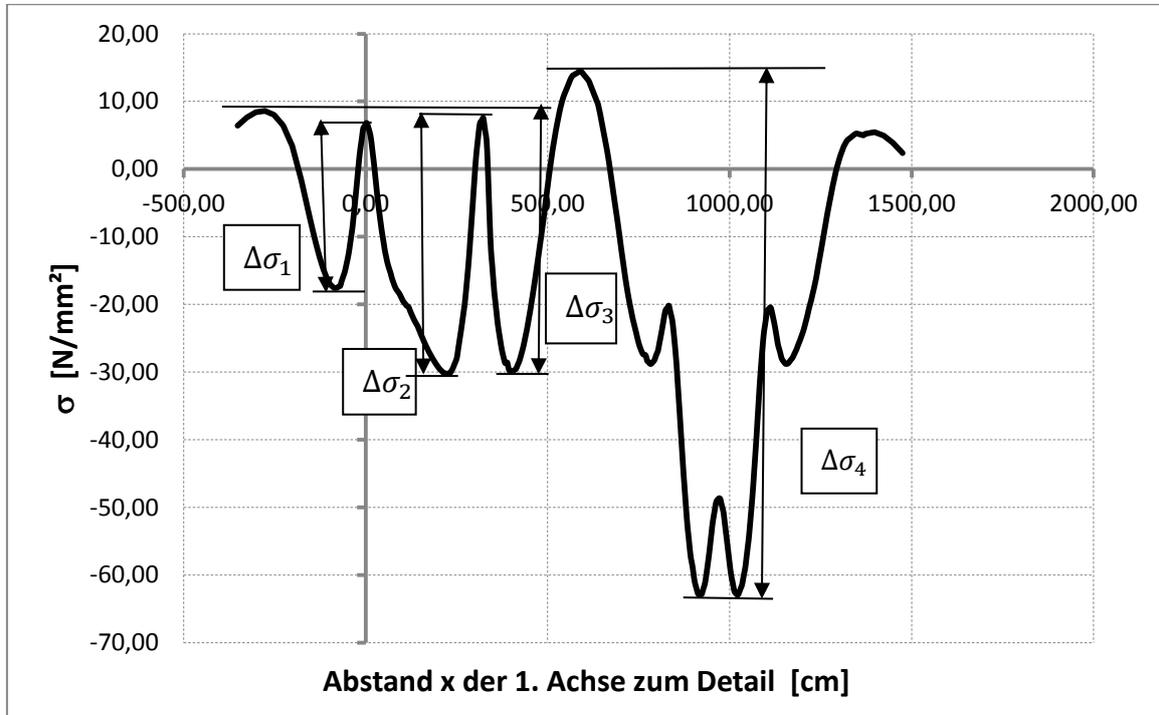


Abbildung 59: D2 - Spannungsverlauf infolge Überfahrt von Schwerfahrzeug Typ T3

		
$\Delta\sigma_i$	$\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	n_i
$\Delta\sigma_1$	24,40	50
$\Delta\sigma_2$	37,79	50
$\Delta\sigma_3$	38,52	50
$\Delta\sigma_4$	77,37	50

Tabelle 13: D2 - Spannungsspiele Schwerfahrzeug Typ T3

- Spannungsverlauf im Detail D2 für Schwerfahrzeugtyp T4

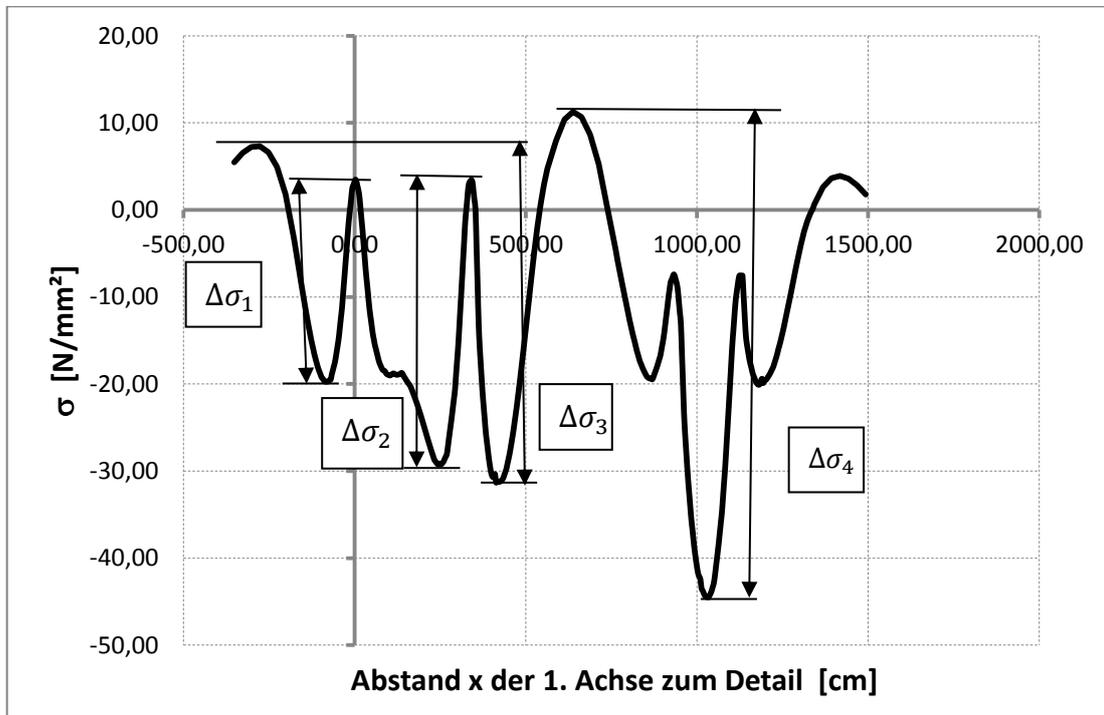


Abbildung 60: D2- Spannungsverlauf infolge Überfahrt von Schwerfahrzeug Typ T4

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{\text{mm}^2}$	n_i
$\Delta\sigma_1$	23,22	15
$\Delta\sigma_2$	32,66	15
$\Delta\sigma_3$	38,62	15
$\Delta\sigma_4$	55,79	15

Tabelle 14: D2- Spannungsspiele Schwerfahrzeug Typ T4

- Spannungsverlauf im Detail D2 für Schwerfahrzeugtyp T5

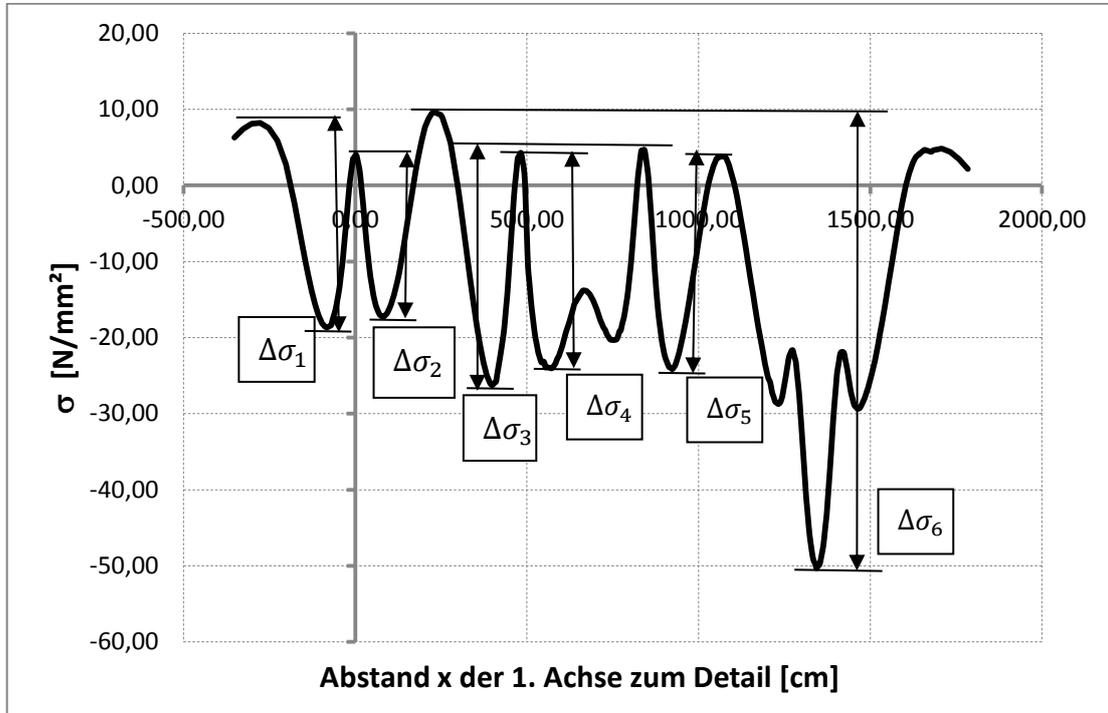


Abbildung 61: D2 - Spannungsverlauf infolge Überfahrt von Schwerfahrzeug Typ T5

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	n_i
$\Delta\sigma_1$	28,83	10
$\Delta\sigma_2$	21,30	10
$\Delta\sigma_3$	30,09	10
$\Delta\sigma_4$	26,85	10
$\Delta\sigma_5$	28,33	10
$\Delta\sigma_6$	59,93	10

Tabelle 15: D2 - Spannungsspiele Schwerfahrzeug Typ T5

5.2.3 Gesamtkollektiv für Detail D2 aus ELM 4- zentrische Überfahrt

Die Abbildung 62 zeigt das Gesamtkollektiv infolge zentrischer Überfahrt aller Fahrzeuge für das Detail D2 bezogen auf insgesamt 100 Fahrzeuge. Mit den schwarzen Linien sind die schädigenden und mit grauen Linien die nicht schädigenden Lastwechsel dargestellt. Zuerst ist das Lastkollektiv für die zentrische Spurlage mit einer zugehörigen Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 100 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$ infolge Belastung aus Ermüdungslastmodell 4 dargestellt (siehe Abbildung 62).

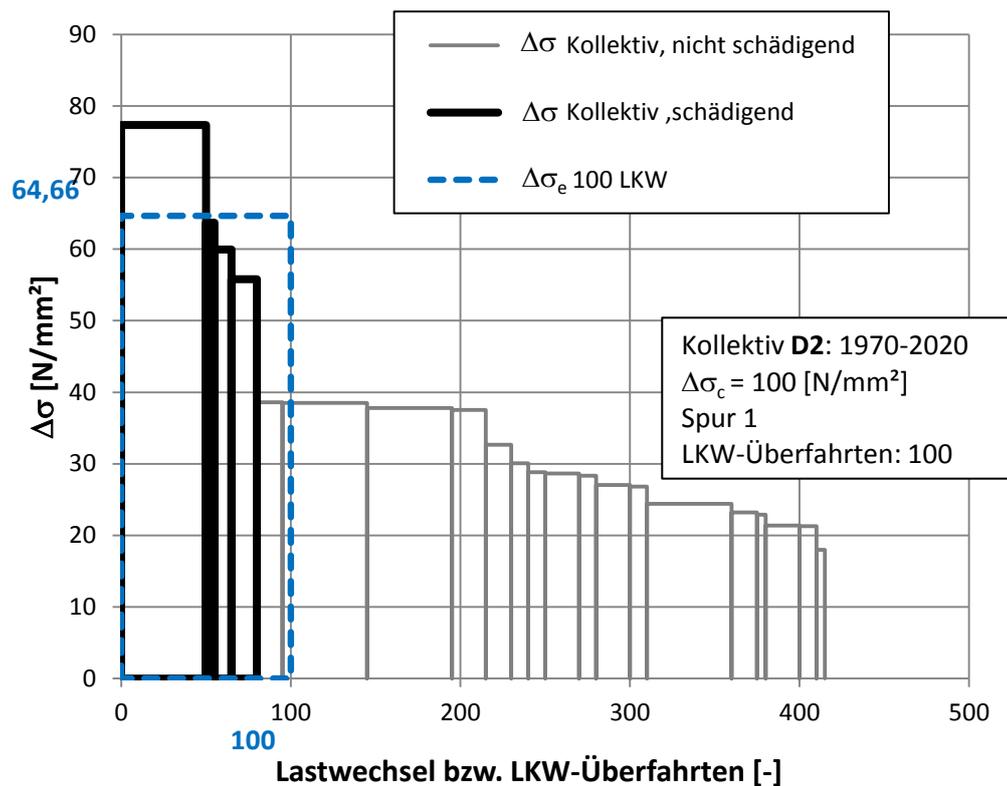


Abbildung 62: D1 - Lastkollektiv zentrische Spurlage $\Delta\sigma_c = 100 [N/mm^2]$

Das schadenäquivalente Einstufenkollektiv bezogen auf 100 Lastwechsel, ist mit $\Delta\sigma_e = 64,66 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$ als blau strichlierter Block eingezeichnet.

Es ist noch ein Lastkollektiv dargestellt, mit einer Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 40 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$ (siehe Abbildung 63).

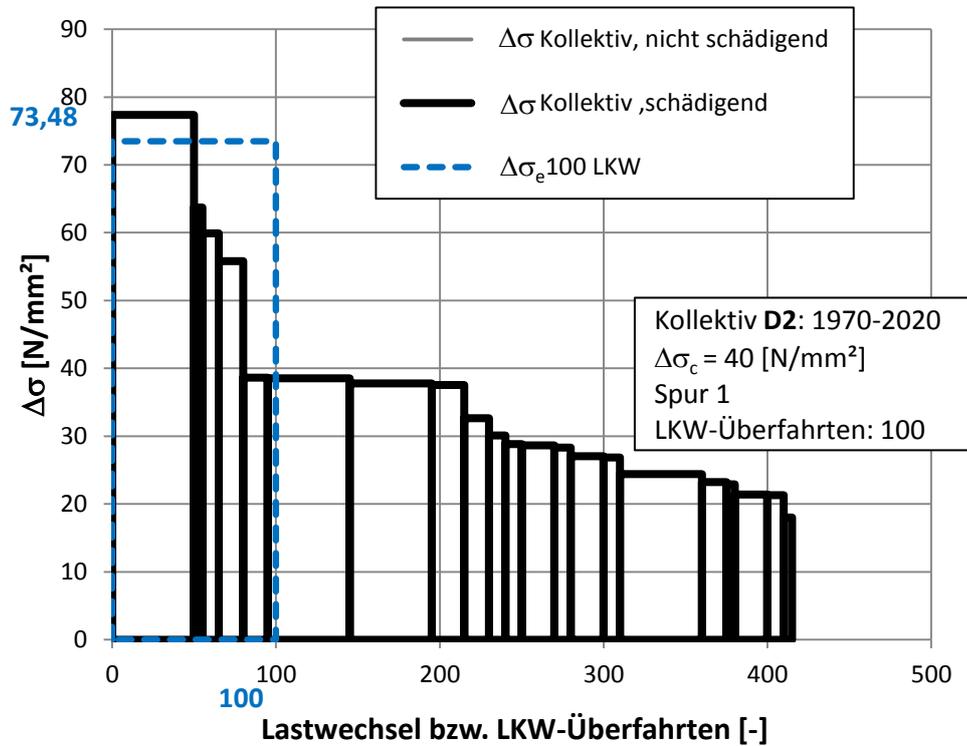


Abbildung 63: D2 - Lastkollektiv zentrische Spurlage $\Delta\sigma_c = 40 \text{ [N/mm}^2\text{]}$

Diese niedrige Ermüdungsfestigkeit wurde gewählt, damit alle Spannungsspiele $\Delta\sigma_i$ größer als der Wert der Dauerfestigkeit ($\Delta\sigma_D \approx 0,737 * \Delta\sigma_c = 29,5 \frac{N}{mm^2}$) sind und als vollschädigend mit der Wöhlerlinie-Neigung $m^* = 3$ anzusetzen sind ($\Delta\sigma_i^3 * N_{r,i} = \Delta\sigma_D^3 * 5 * 10^6$).

5.2.4 Darstellung der Querverteilungseinflusslinie für Detail D2

Die Ermittlung der Einflusslinie in Brückenquerrichtung für das Detail D2 wurde im Abaqus gemacht. Die einzelbereiften Achsen A und C sind geometrisch sehr ähnlich, deshalb erfolgte die Ermittlung der Querverteilungseinflusslinie für einzelbereifte Achsen. Für die zwillingsbereifte Achse B erfolgte die Ermittlung der Einflusslinie in selber Form.

Die größte minimale Spannung (Druckspannung) tritt auf, wenn die Achslast im Abstand $\pm 800\text{mm}$, bezogen auf die mittlere Querrippe QT-3 angreift. Die größte maximale Spannung (Zugspannung) tritt auf, wenn die Achslast im Abstand von 2980 mm von der mittleren Querrippe QT-3 angreift (siehe Abbildung 30). An diesen Positionen in Brückenquerrichtung erfolgte somit die Ermittlung der Querverteilungseinflusslinie (QV-EFL) der einzel- und zwillingsbereiften Achsen.

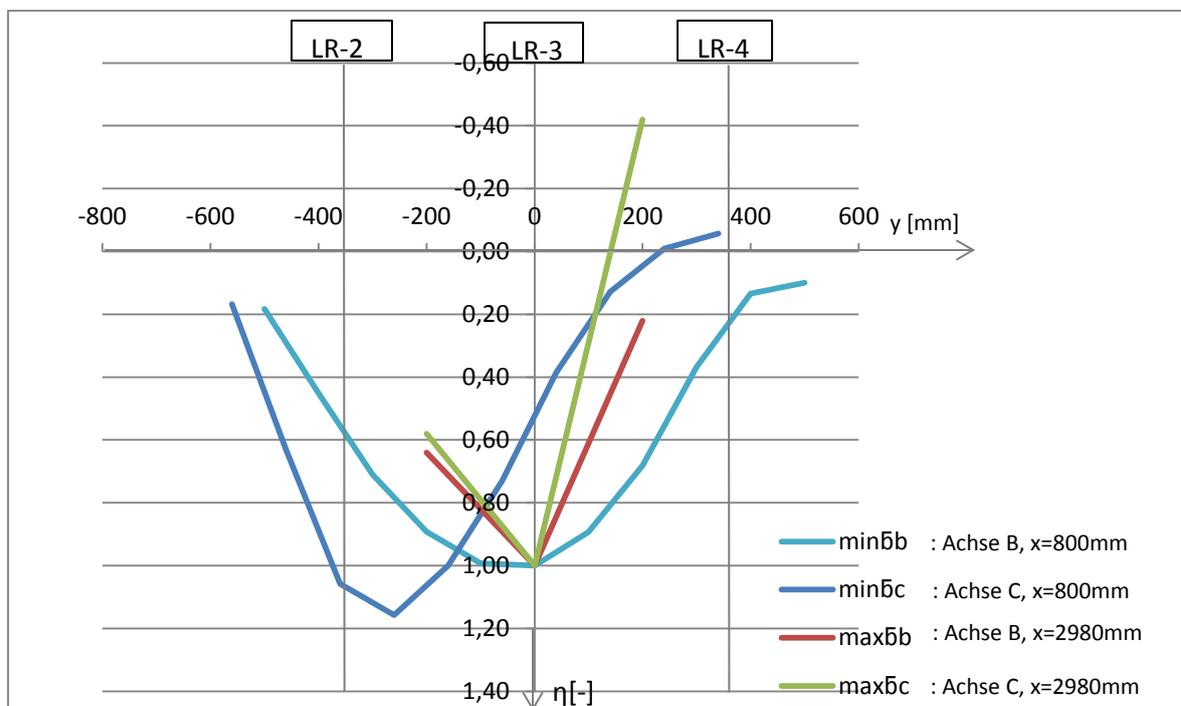
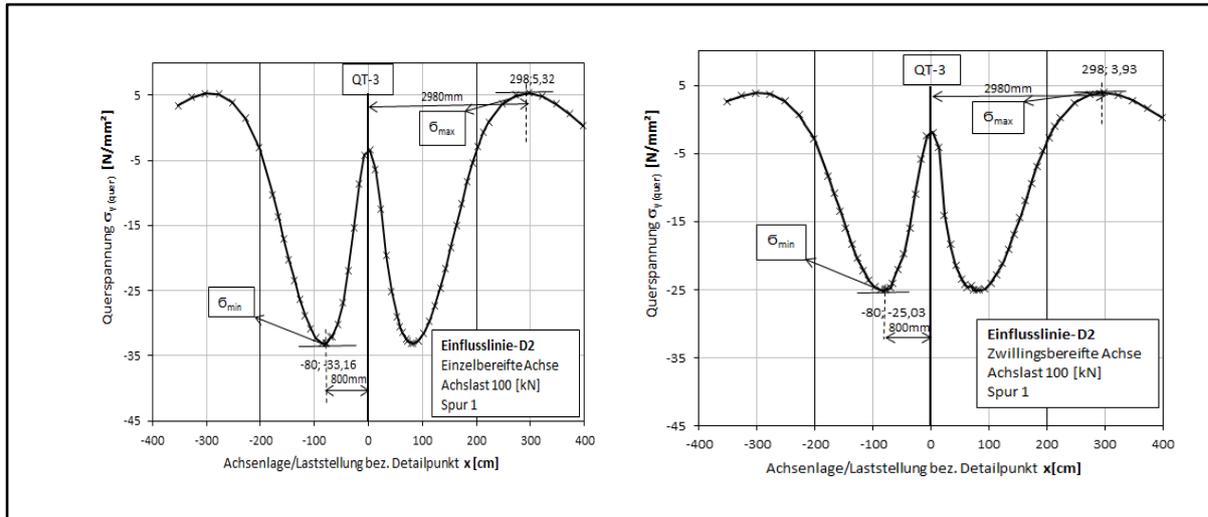


Abbildung 64: D2 - Einflusslinien Verlauf in Querrichtung für σ_{\min} und σ_{\max} der Achsen B und C



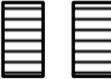
Achs-Typ	Position x in Brückenlängsrichtung	
	min σ	max σ
A&C 	800 mm	2980mm
B 	800 mm	2980mm

Tabelle 16: Position der Räder in Brückenlängsrichtung für D2

An der Abbildung 64 sind Einflusslinien Verläufe für die in Längsrichtung minimal (σ_{\min}) und maximal (σ_{\max}) auftretende Spannung eingezeichnet. An der x Achse ist der Abstand in Brückenquerrichtung (mm) von der Längsrippe 3 aufgetragen und an der y Achse sind die Skalierungsfaktoren η [-] aufgetragen.

Die dunkel- und hellblaue Linie zeigen einen Einflusslinien Verlauf in Querrichtung für die minimale Spannung im Detail D2. Die dunkelblaue Linie zeigt den Verlauf für einzelbereifte Achsen (Achse C) und die hellblaue den Verlauf für zwillingbereifte Achsen (Achse B).

Die rote und die grüne Linie zeigen einen Einflusslinien Verlauf in Querrichtung für die maximale Spannung im Detail D2. Die grüne Linie zeigt den Verlauf für einzelbereifte Achsen (Achse C) und die rote den Verlauf für zwillingbereifte Achsen (Achse B).

5.2.5 Gesamtkollektiv für Detail D2 unter Berücksichtigung der realen Achsgeometrie

Als Basis dient das Lastkollektiv der zentrischen Überfahrt aller Achsen unmittelbar über Längsrippe LR-3 aus Abschnitt 5.2.3. Abbildung 65 zeigt nochmal dieses Lastkollektiv, wobei die einzelnen Kollektivteile betreffend des Fahrzeugtyps eingefärbt wurden und mit folgender Kennzeichnung versehen wurden:

T i - j (i - Fahrzeugtyp, j - Achsart (A, B, C))

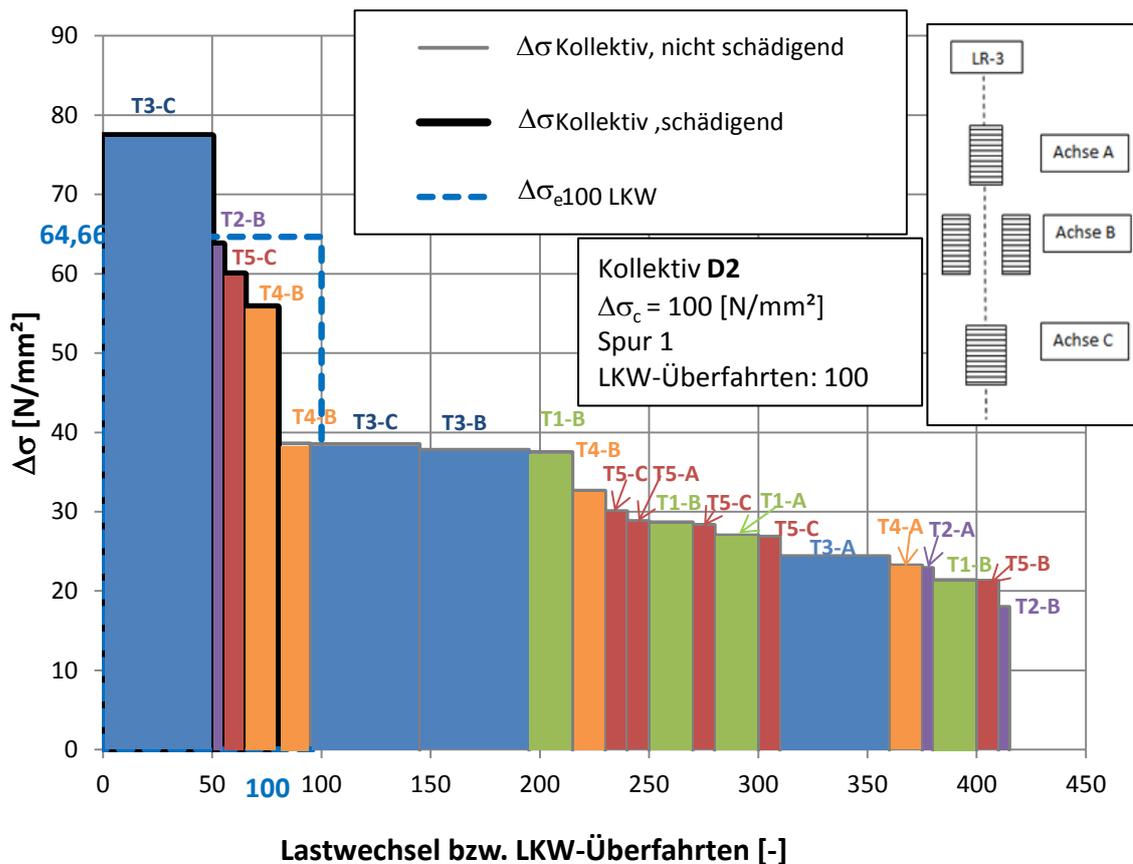
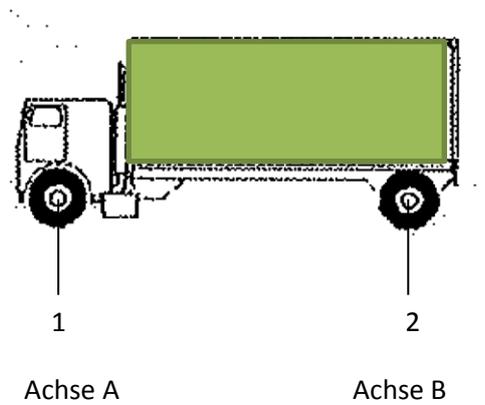


Abbildung 65: D2 - Lastkollektiv zentrische Spurlage $\Delta\sigma_c = 100 \text{ [N/mm}^2\text{]}$

Anhand der Kennzeichnung der Kollektivteile ist nun eine Zuordnung von Fahrzeugtyp, sowie Achse zu Kollektivteil möglich. In der nachfolgenden Abbildung 65-1 sind zwei Schwerfahrzeuge dargestellt, als Beispiel, wie die Kennzeichnung der Kollektivteile gemacht wurde.

Schwerfahrzeug Typ 1- T1



Schwerfahrzeug Typ 5- T5

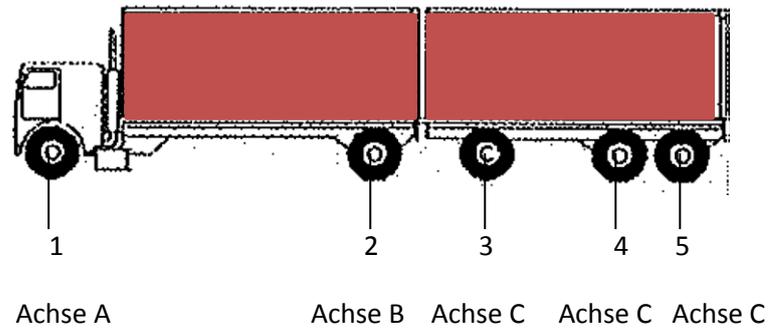


Abbildung 65-1: Beschreibung der Schwerfahrzeuge Typ 1 und Typ 5

An diesem Lastkollektiv kann man erkennen welche Spannung von welchem Fahrzeugtyp und von welcher Achse hervorgerufen wird. In dieser Arbeit wurden zwei Fälle für die Berücksichtigung der realen Achsgeometrie untersucht, welche in den nachfolgenden Abbildungen grafisch dargestellt werden.

-Fall 1 – Achse A, C mittig und Achse B versetzt

In dem ersten Fall wird das Kollektiv erstellt, wenn die Räder von der Achse C und A mittig über Längsrippe LR-3 fahren und die Räder der Achse B um 160mm in Brückenquerrichtung versetzt sind. Abbildung 66 zeigt die Querverteilungseinflusslinie für Detail D2 bezüglich Achse B und an der Position $x=800\text{mm}$ in Längsrichtung gemessen von der mittleren Querrippe QT-3.

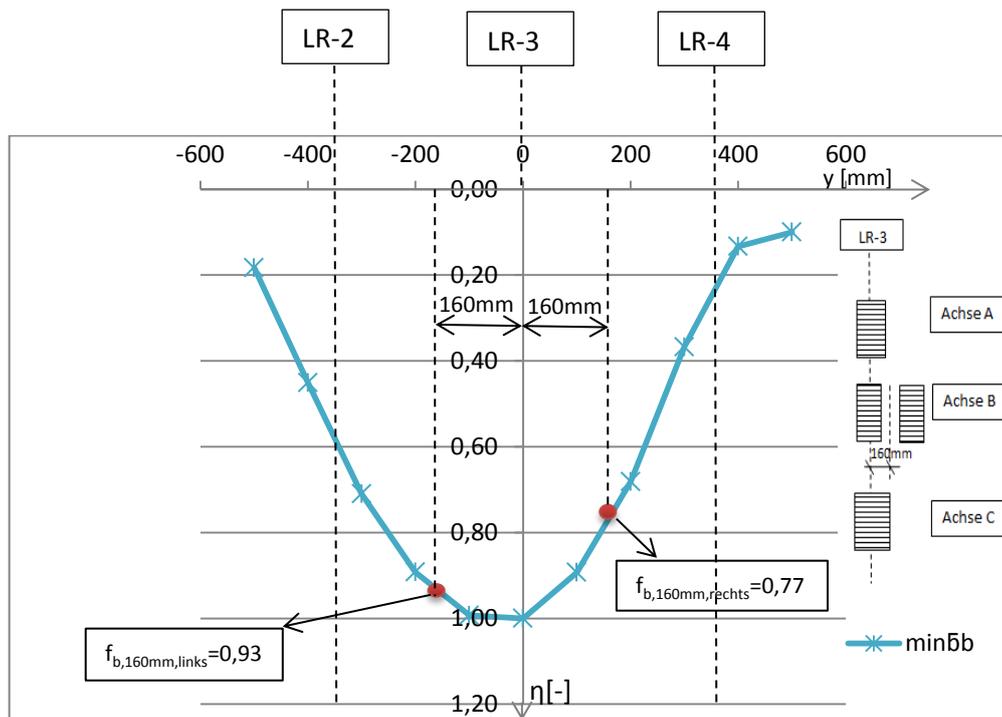


Abbildung 66: D2 Querverteilungseinflusslinie für σ_{\min} -Achse B

Aus der Abbildung 66 wird der maßgebende Faktor $f_{b,160\text{mm}}$ ausgelesen mit welchem die zutreffenden Kollektivteile bezüglich Achse B aus dem Basiskollektiv (zentrische Überfahrt-Abbildung 65) skaliert werden. Die Reduktionsfaktoren für Achse B sind: $f_{b,160\text{mm},\text{links}}=0,93$ und $f_{b,160\text{mm},\text{rechts}}=0,77$.

Abbildung 67 zeigt das Lastkollektiv für Detail D2-Fall 1, Achse B nach links versetzt (siehe Abbildung 66) unter dem Ansatz der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm²].

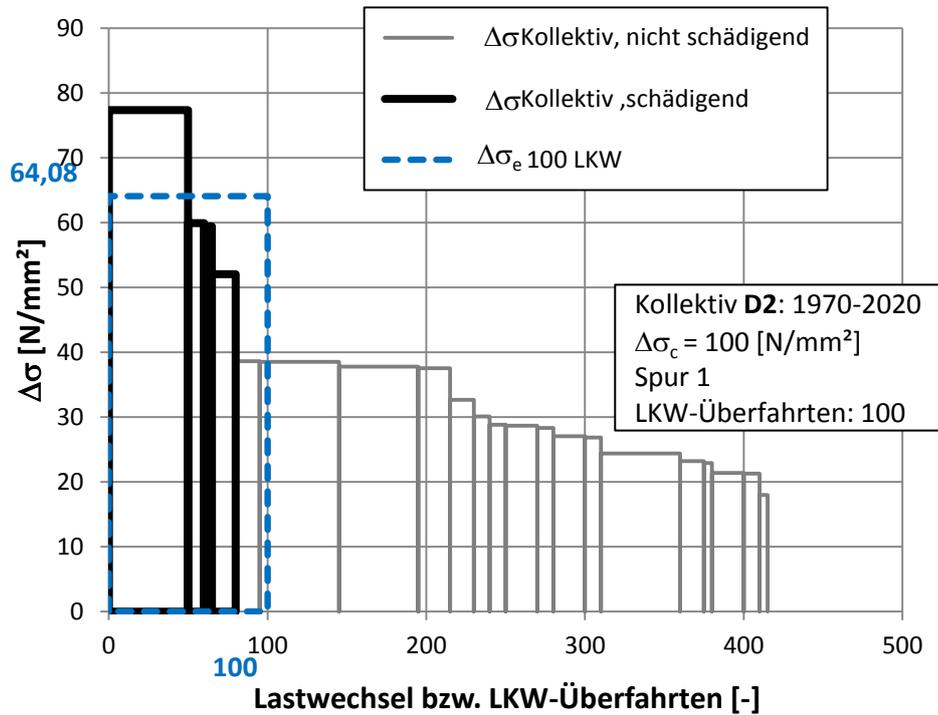


Abbildung 67: D2-Lastkollektiv A, C-mittig über LR-3 und B-links versetzt 160mm $\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm²]

Abbildung 68 zeigt das Lastkollektiv für Detail D2-Fall 1, Achse B nach links versetzt (siehe Abbildung 66) unter dem Ansatz der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c = 40$ [N/mm²].

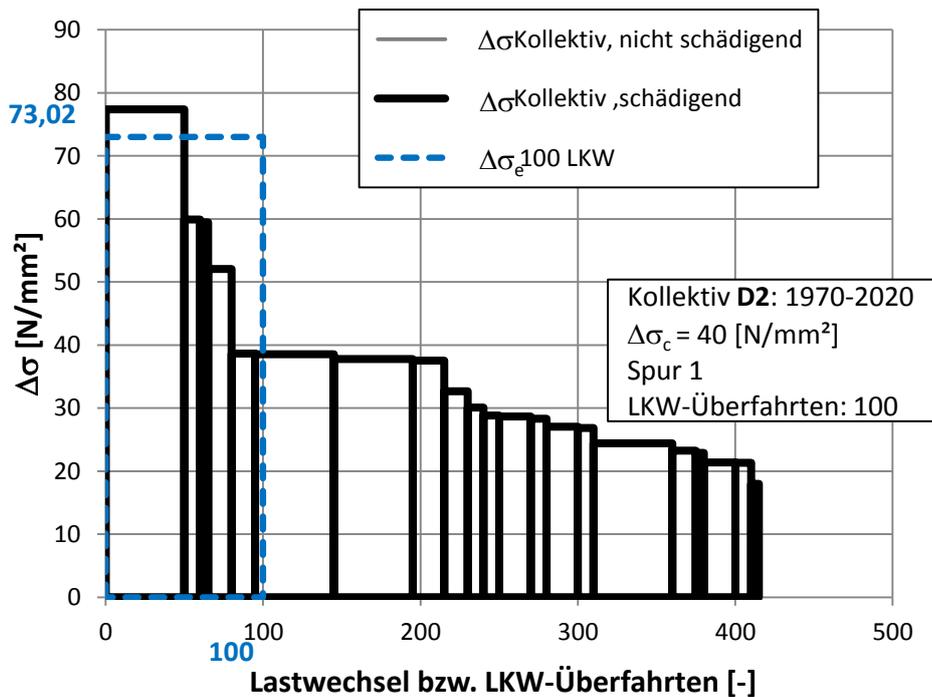


Abbildung 68: D2-Lastkollektiv A, C-mittig über LR-3 und B-links versetzt 160mm $\Delta\sigma_c = 40$ [N/mm²]

Abbildung 69 zeigt das Lastkollektiv für Detail D2-Fall 1, Achse B nach rechts versetzt (siehe Abbildung 66) unter dem Ansatz der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm²].

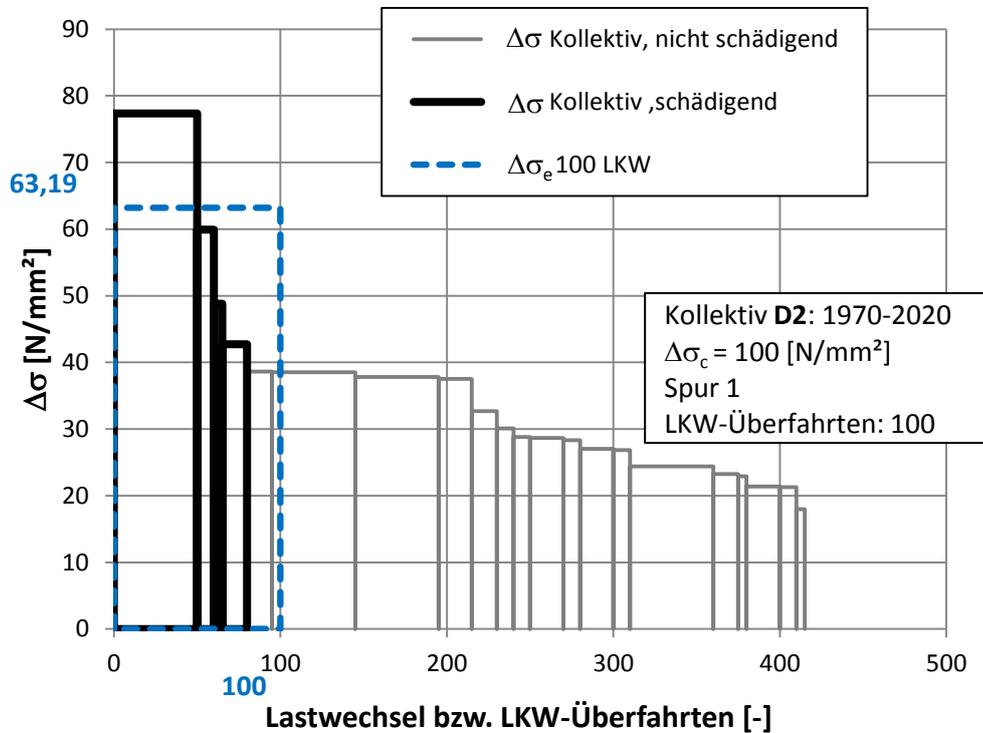


Abbildung 69: D2-Lastkollektiv A, C-mittig über und B-rechts versetzt 160mm $\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm²]

Abbildung 70 zeigt das Lastkollektiv für Detail D2-Fall 1, Achse B nach rechts versetzt (siehe Abbildung 66) unter dem Ansatz der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c = 40$ [N/mm²].

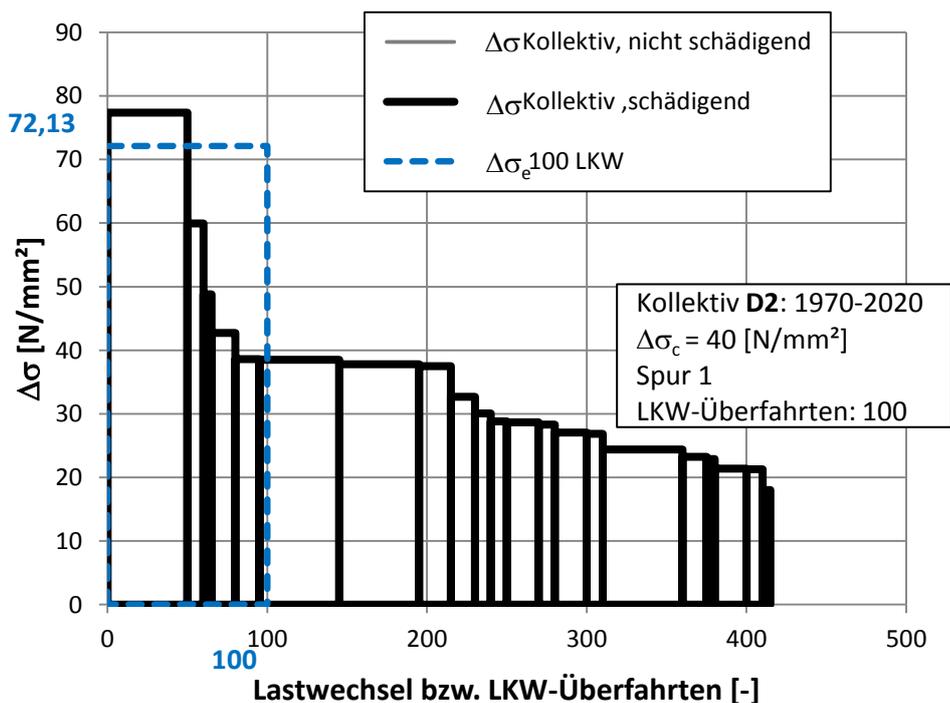


Abbildung 70: D2-Lastkollektiv A, C-mittig über LR-3 und B-rechts versetzt 160mm $\Delta\sigma_c = 40$ [N/mm²]

Fall 1	$\Delta\sigma_c = 100 \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$\Delta\sigma_c = 40 \text{ [N/mm}^2\text{]}$
Achse A, C-mittig über LR-3 und B links versetzt um 160 mm $\Delta\sigma_e$ bezogen auf 100LKW	64,08	73,02
Achse A, C-mittig über LR-3 und B rechts versetzt um 160 mm $\Delta\sigma_e$ bezogen auf 100LKW	63,19	72,13

Tabelle 17: D2-Darstellung der Ergebnisse für Fall 1

$\Delta\sigma_e = 64,66 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ } zentrische Überfahrt aller Achsen

Reduktion des schadensäquivalenten Einstufenkollektives durch Berücksichtigung realer Achsgeometrie (FALL 1): $\frac{64,08}{64,66} = 0,99$.

-Fall 2 – Achse B mittig und Achse A, C versetzt

In dem zweiten Fall wird das Kollektiv erstellt, wenn die Räder von der Achse B mittig über Längsrippe LR-3 fahren und die Räder der Achse C und A um 160mm in Brückenquerrichtung versetzt sind. Abbildung 71 zeigt die Querverteilungseinflusslinie für Detail D2 bezüglich Achse C und an der Position $x=800\text{mm}$ in Längsrichtung gemessen von der mittleren Querrippe QT-3.

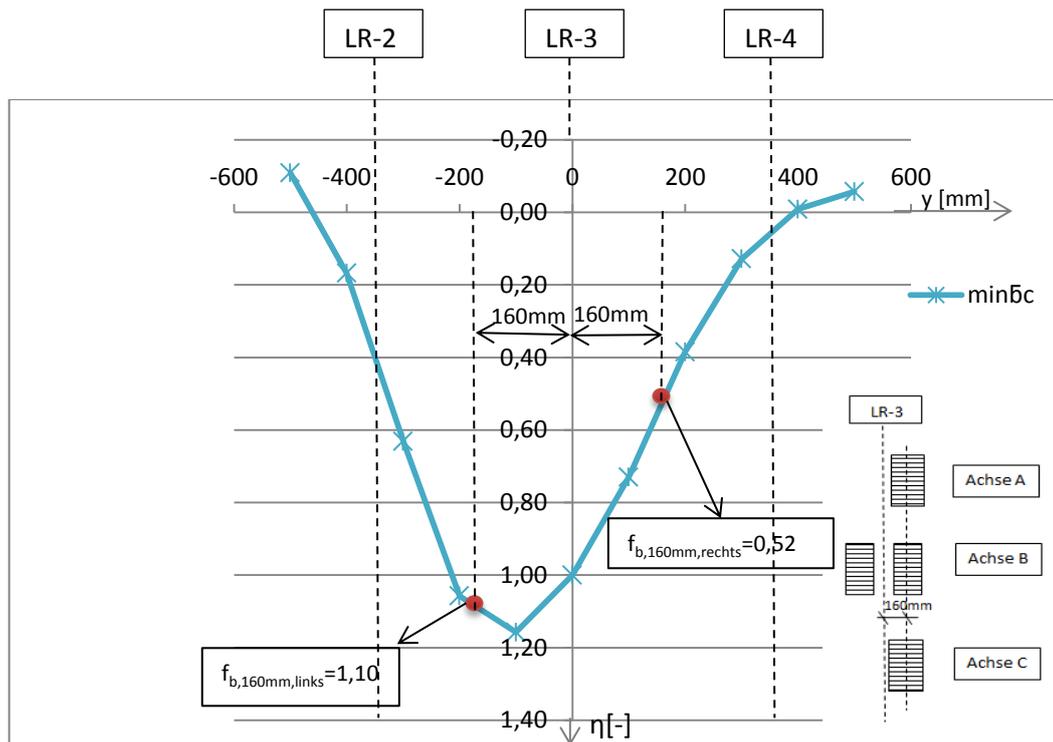


Abbildung 71: D2-Querverteilungseinflusslinie für σ_{\min} - Achse C

Aus der Abbildung 71 wird der maßgebende Faktor $f_{c,160\text{mm}}$ ausgelesen mit welchem die zutreffenden Kollektivteile bezüglich Achse C aus dem Basiskollektiv (zentrische Überfahrt-Abbildung 65) skaliert werden. Die Reduktionsfaktoren für Achse C sind: $f_{c,160\text{mm},\text{links}}=1,10$ und $f_{c,160\text{mm},\text{rechts}}=0,52$.

Abbildung 72 zeigt das Lastkollektiv für Detail D2-Fall 2, Achse C nach links versetzt (siehe Abbildung 71) unter dem Ansatz der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm²].

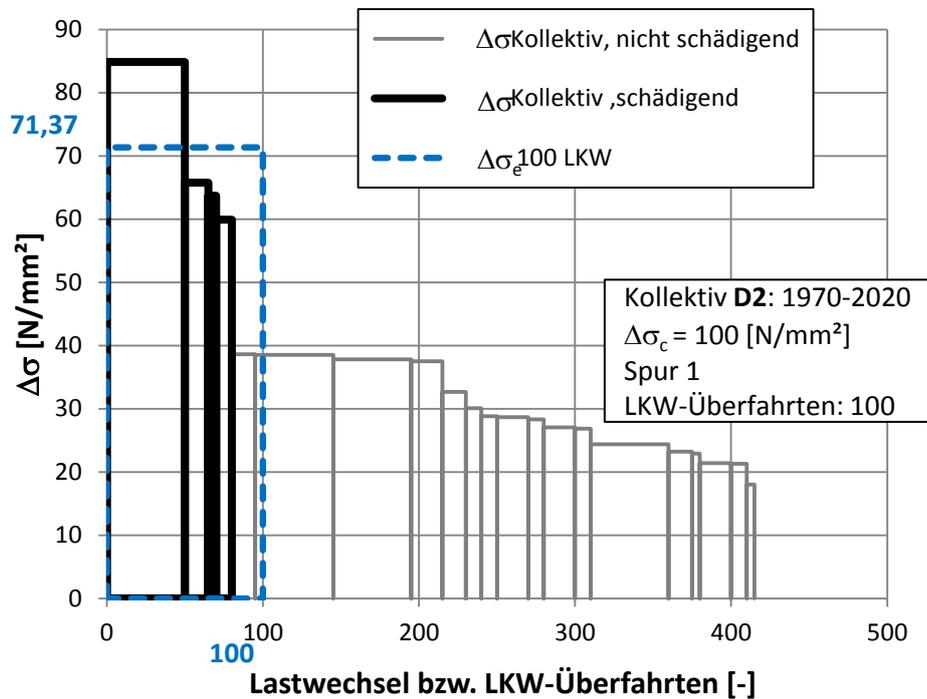


Abbildung 72: D2-Lastkollektiv B mittig über LR-3 und A, C links versetzt 160mm $\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm²]

Abbildung 73 zeigt das Lastkollektiv für Detail D2-Fall 2, Achse C nach links versetzt (siehe Abbildung 71) unter dem Ansatz der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c = 40$ [N/mm²].

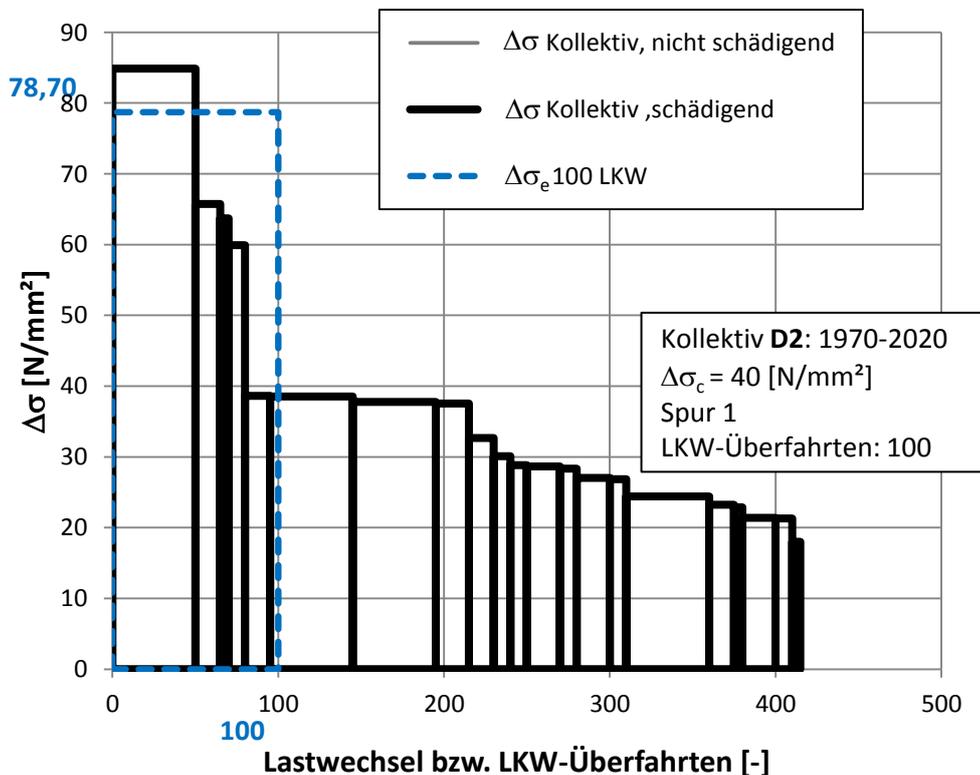


Abbildung 73: D2-Lastkollektiv B mittig über LR-3 und A, C-links versetzt 160mm $\Delta\sigma_c = 40$ [N/mm²]

Abbildung 74 zeigt das Lastkollektiv für Detail D2-Fall 2, Achse C nach rechts versetzt (siehe Abbildung 71) unter dem Ansatz der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm²].

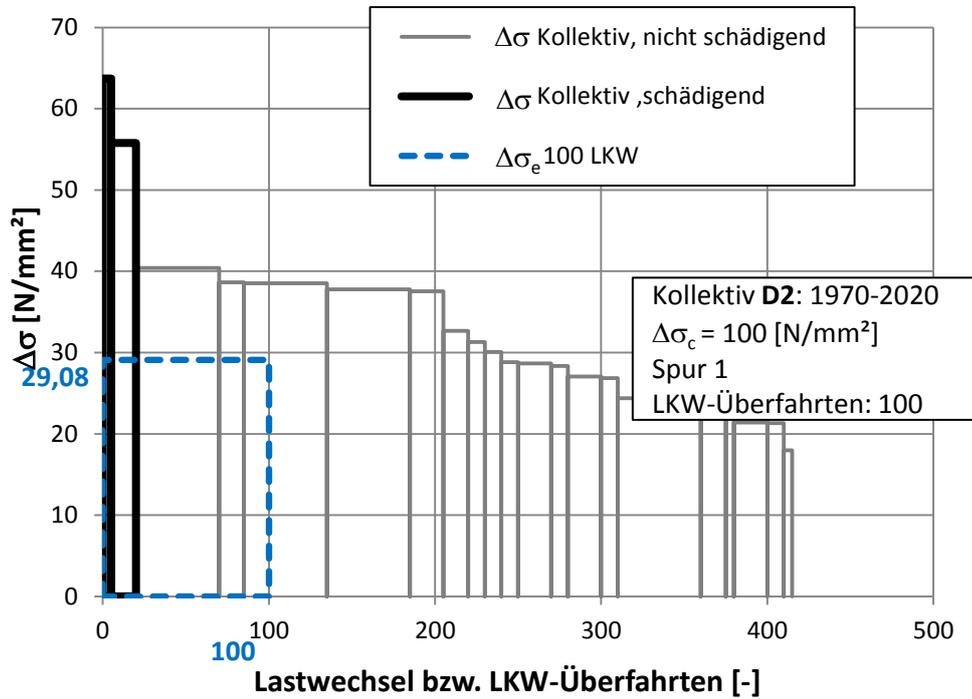
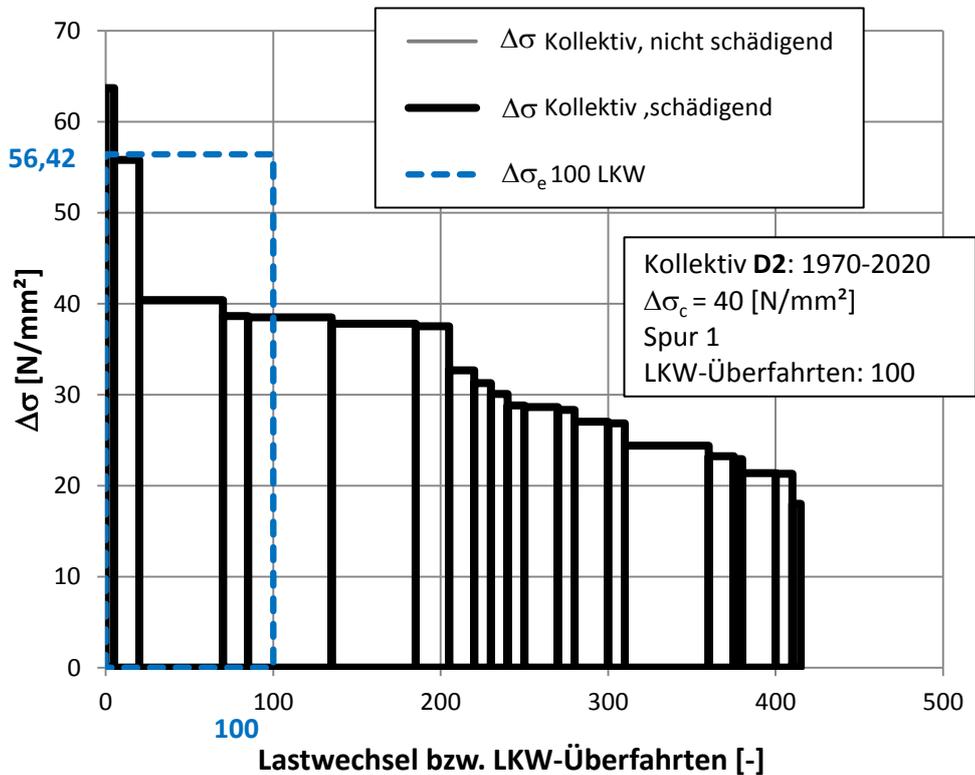


Abbildung 75 zeigt das Lastkollektiv für Detail D2-Fall 2, Achse C nach rechts versetzt (siehe Abbildung 71) unter dem Ansatz der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c = 40$ [N/mm²].



Fall 2	$\Delta\sigma_c = 100 \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$\Delta\sigma_c = 40 \text{ [N/mm}^2\text{]}$
Achse B-mittig über LR-3 und A, C links versetzt um 160 mm $\Delta\sigma_e$ bezogen auf 100LKW	71,37	78,70
Achse B-mittig über LR-3 und A, C rechts versetzt um 160 mm $\Delta\sigma_e$ bezogen auf 100LKW	29,08	56,42

Tabelle 18: D2-Darstellung der Ergebnisse für Fall 2

Maßgebende Achsgeometrie für Detail D2:

Achse B mittig und Achsen A, C links versetzt.

$\Delta\sigma_e = 64,66 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ – zentrische Überfahrt aller Achsen

Reduktion des schadensäquivalenten Einstufenkollektives durch Berücksichtigung realer Achsgeometrie (FALL 2): $\frac{71,37}{64,66} = 1,10$.

5.3 Zusammenfassende Beurteilung

$\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm ²]		$\Delta\sigma_{e,D1}$ [N/mm ²] n=100LKW		$\Delta\sigma_{e,D2}$ [N/mm ²] n=100LKW	
FALL 1	B links	151,77	0,87	64,08	0,99
	B rechts	152,23	0,87	63,19	0,98
FALL 2	A, C links	155,49	0,89	71,37	1,10
	A, C rechts	161,62	0,90	29,08	0,45
zentrische Überfahrt		174,04	1,00	64,66	1,00

Tabelle 19: $\Delta\sigma_{e,i}$ bezogen auf n=100LKW unter Berücksichtigung realer Achsgeometrie (Fall 1 und Fall 2) für D1 und D2 mit $\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm²]

$\Delta\sigma_c = 40$ [N/mm ²]		$\Delta\sigma_{e,D1}$ [N/mm ²] n=100LKW		$\Delta\sigma_{e,D2}$ [N/mm ²] n=100LKW	
FALL 1	B links	152,23	0,87	73,02	0,99
	B rechts	155,87	0,89	72,13	0,98
FALL 2	A, C links	156,84	0,90	78,70	1,07
	A, C rechts	162,45	0,93	56,42	0,77
zentrische Überfahrt		174,18	1,00	73,48	1,00

Tabelle 20: $\Delta\sigma_{e,i}$ bezogen auf n=100LKW unter Berücksichtigung realer Achsgeometrie (Fall 1 und Fall 2) für D1 und D2 mit $\Delta\sigma_c = 40$ [N/mm²]

Tabelle 19 und 20 zeigen die Ergebnisse der Analysen zur Berücksichtigung realer Achsgeometrien für die Details D1 und D2 anhand der ermittelten schadensäquivalenten Einstufenkollektive $\Delta\sigma_{e,i}$. Es wurden mehrere Möglichkeiten der Achslastpositionen untersucht und anhand Tabelle 19 und 20 kann für beide Detailpunkte jeweils die maßgebende Achslaststellung in Querrichtung gefunden werden.

Für beide Detailpunkte D1 und D2 ergibt sich die größte schädigende Wirkung, wenn die Achse B (Zwillingsrad) sich unmittelbar über der betrachteten Längsrippe bewegt und die Achsen A und C (Einzelrad) dementsprechend versetzt, sodass die Außenknoten aller Radaufstandsflächen in einer Linie fluchten. Die maßgebende Achslastposition wird in Abbildung 76 nochmals grafisch dargestellt und anhand dessen erfolgten alle weiteren Berechnungen.

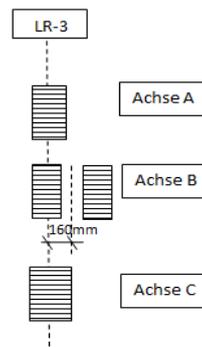


Abbildung 76: Achse B mittig über LR-3 und A, C versetzt 160mm

6 Ergebnisse bezüglich realer Achsgeometrie und einer Häufigkeitsverteilung in Brückenquerrichtung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse unter Berücksichtigung realer Achsgeometrie sowie einer Häufigkeitsverteilung in Brückenquerrichtung zur Abbildung des Fahrspurverhaltens mit zwei verschiedenen Verteilungen dargestellt. Die Analysen bezüglich der realen Achsgeometrie befinden sich im Abschnitt 5. Die zwei Häufigkeitsverteilungen sind in Abschnitt 3.2 näher beschrieben. Im ersten Teil sind die Ergebnisse für Detail D1 und Detail D2 mit der Verteilung nach Blab [3] und nachfolgenden die Ergebnisse mit der Verteilung nach EN1991-2 [7] dargestellt.

6.1 Ergebnisse für Detail D1

Für die Darstellung der Kollektive bezüglich der Häufigkeitsverteilung wird das Gesamtkollektiv aus dem Kapitel 5 (Abbildung 43) wieder als Basis herangezogen, welches in weiterer Folge anhand der zutreffenden Faktoren skaliert wurde. Dieses Lastkollektiv resultiert aus der zentralen Überfahrt aller Achsen unmittelbar über Längsrippe LR-3 aus Abschnitt 5.1.3. Abbildung 43 zeigt nochmals dieses Lastkollektiv, wobei die einzelnen Kollektivteile betreffend des Fahrzeugtyps eingefärbt wurden und mit folgender Kennzeichnung versehen wurden:

T i - j - a (i - Fahrzeugtyp, j - Achsnummer, a - Achsart (A, B, C)).

Anhand der Kennzeichnung der Kollektivteile ist um eine Zuordnung von Fahrzeugtyp sowie Achse zu Kollektivteil möglich. Ein Beispiel der Kennzeichnung befindet sich in Abschnitt 5.1.5.

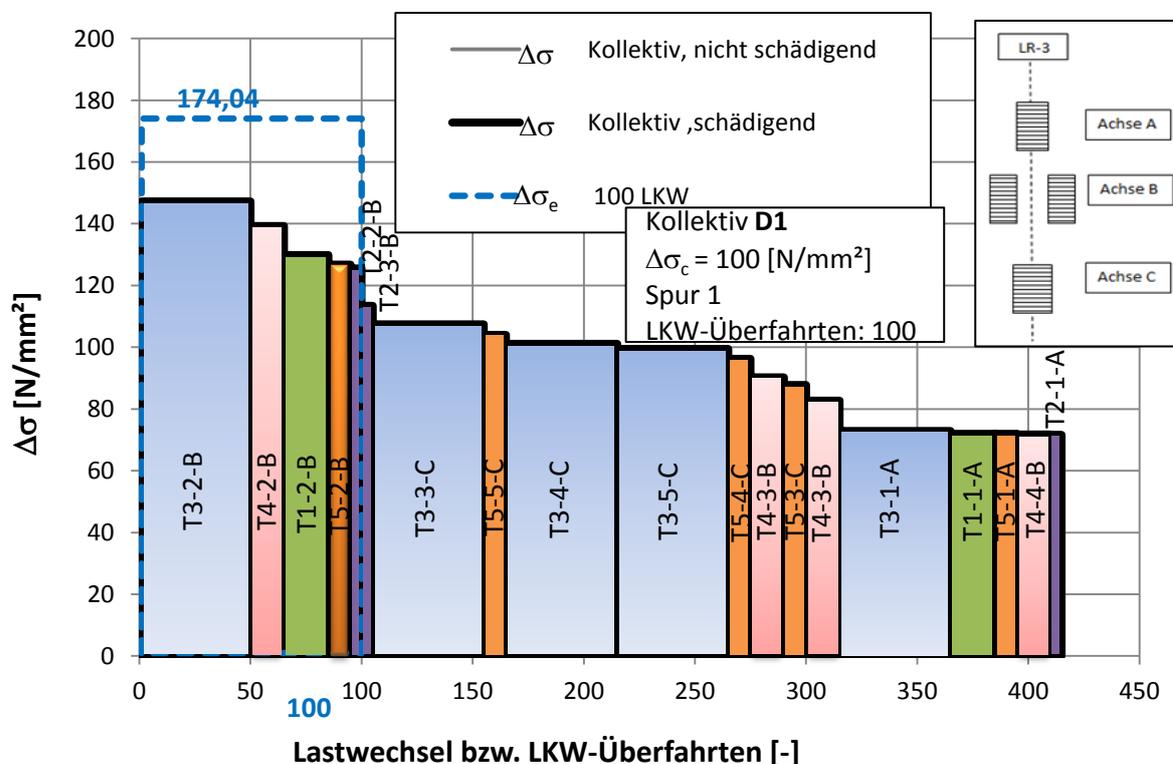


Abbildung 43: D1 - Lastkollektiv zentrische Spurlage $\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm²]

6.1.1 Häufigkeitsverteilung nach Blab für Detail D1 und Achse C um 160mm versetzt

Die prinzipielle Vorgehensweise für jeden Kollektivteil aus dem Lastkollektiv der zentrischen Überfahrt (siehe Abbildung 43) ist grafisch in Abbildung 77 dargestellt.

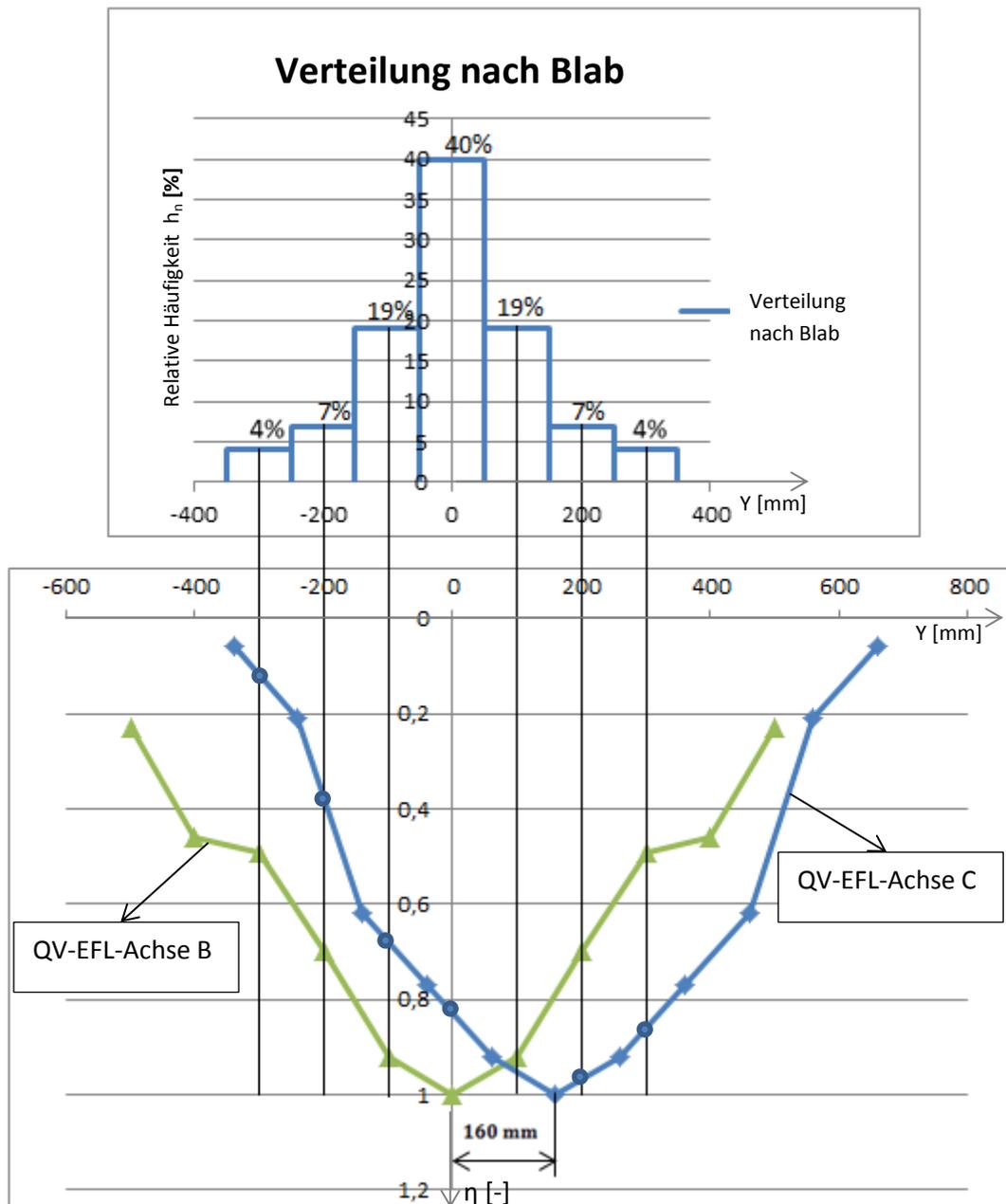
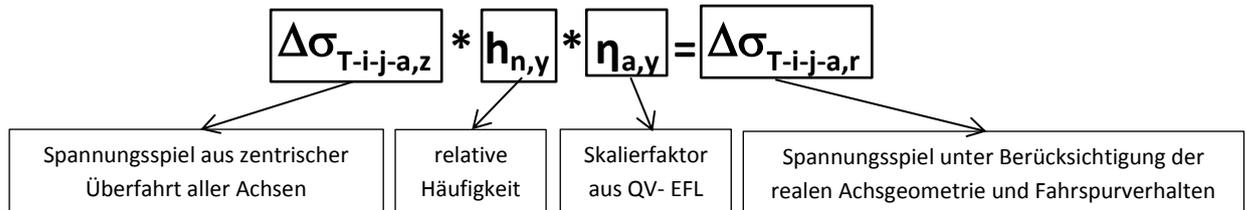


Abbildung 77: D1- Einflusslinien in Querrichtung bei $X_{(\min\sigma)}=360\text{mm}$ (B-mittig und C-160mm versetzt) und Häufigkeitsverteilung nach Blab [3]

ACHSE	-300mm	-200mm	-100mm	0mm	100mm	200mm	300mm
B	0,49	0,70	0,92	1,00	0,92	0,70	0,49
C	0,12	0,37	0,68	0,83	0,95	0,97	0,86

Tabelle 21: Werte der Skalierfaktoren η aus der Abbildung 77

Nachfolgend wird an einem Beispiel dargestellt, wie die Ermittlung des Lastkollektives unter Berücksichtigung von realer Achsgeometrie und Fahrspurverhalten durchgeführt wurde. Aus dem Lastkollektiv der zentrischen Überfahrt (siehe Abbildung 43) wird als Beispiel das größte Spannungsspiel $\Delta\sigma_{T-3-2-B} = 147,24 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ infolge Achse B herangezogen:



i – Fahrzeugtyp

z – zentrische Überfahrt aller Achsen

j – Achsnummer

r – Berücksichtigung realer Achsgeometrie und Fahrspurverhalten

a – Achsart

y – Lage in Brückenquerrichtung bezogen auf Längsrippe LR-3

$$\Delta\sigma_{T-3-2-1} = 147,24 * 0,04 * 0,49 = 2,89 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\Delta\sigma_{T-3-2-2} = 147,24 * 0,07 * 0,70 = 7,21 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\Delta\sigma_{T-3-2-3} = 147,24 * 0,19 * 0,92 = 25,74 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\Delta\sigma_{T-3-2-4} = 147,24 * 0,40 * 1,00 = 58,89 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\Delta\sigma_{T-3-2-5} = 147,24 * 0,19 * 0,92 = 25,74 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\Delta\sigma_{T-3-2-6} = 147,24 * 0,07 * 0,70 = 7,21 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\Delta\sigma_{T-3-2-7} = 147,24 * 0,04 * 0,49 = 2,89 \text{ [N/mm}^2\text{]}.$$

Alle Spannungsspiele wurden auf diese Art skaliert. Für Spannungsspiele infolge Achse B erfolgte die Skalierung unter Anwendung der QV-EFL-Achse B (Zwillingsrad) und für Spannungsspiele infolge Achse A und C erfolgte sinngemäß die Skalierung unter Anwendung der QV-EFL-Achse C (Einzelrad).

Abbildung 78 zeigt nun das resultierende Lastkollektiv für Detail D1 unter Berücksichtigung realer Achsgeometrie und Fahrspurverhalten nach der Häufigkeitsverteilung nach Blab [3] unter dem Ansatz der Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 100 \text{ [N/mm}^2\text{]}$. Das ermüdungsäquivalente Einstufenkollektiv beträgt $\Delta\sigma_e = 150,56 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ (siehe Abbildung 78). Dies entspricht einer Reduktion von $\frac{150,56}{174,04} = 0,87$, bezogen auf die rein zentrische Überfahrt aller Achsen.

Ergänzend erfolgte die Ermittlung des Lastkollektives für Detail D1 unter denselben Bedingungen für eine Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 40 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ (siehe Abbildung 79).

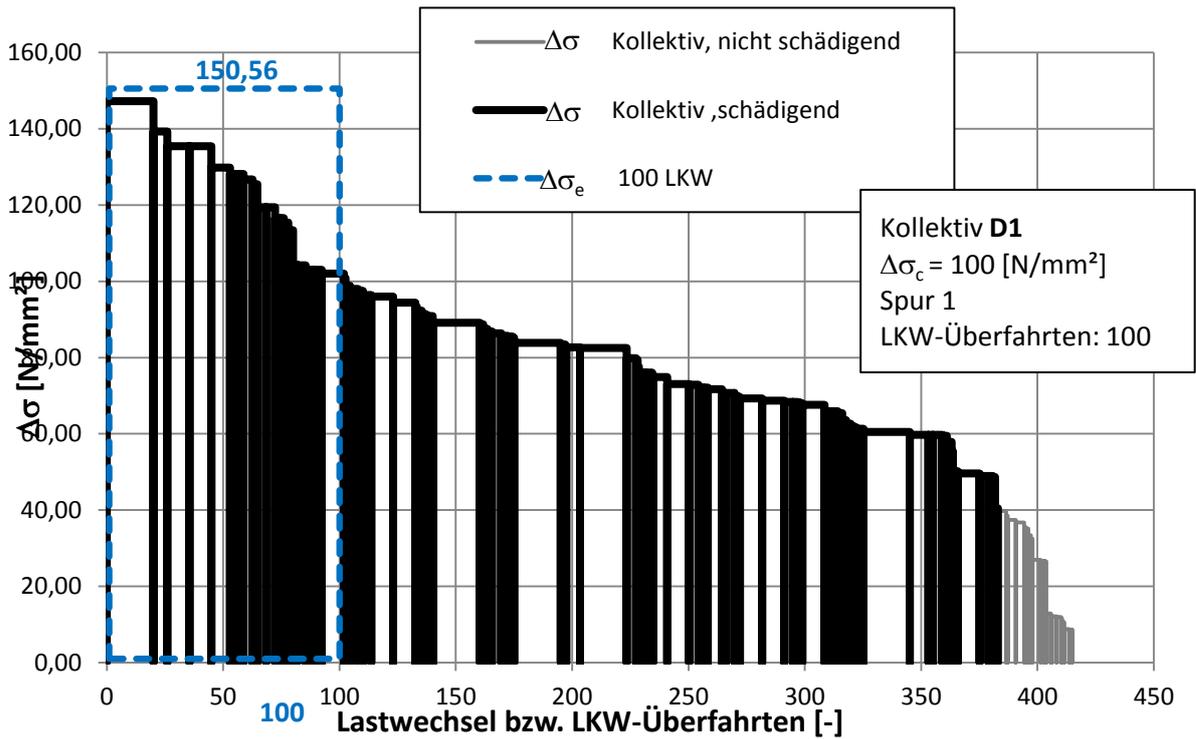


Abbildung 78: Lastkollektiv für D1 unter Berücksichtigung realer Achsgeometrie und Fahrspurverhalten mit Verteilung nach Blab ($\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm²])

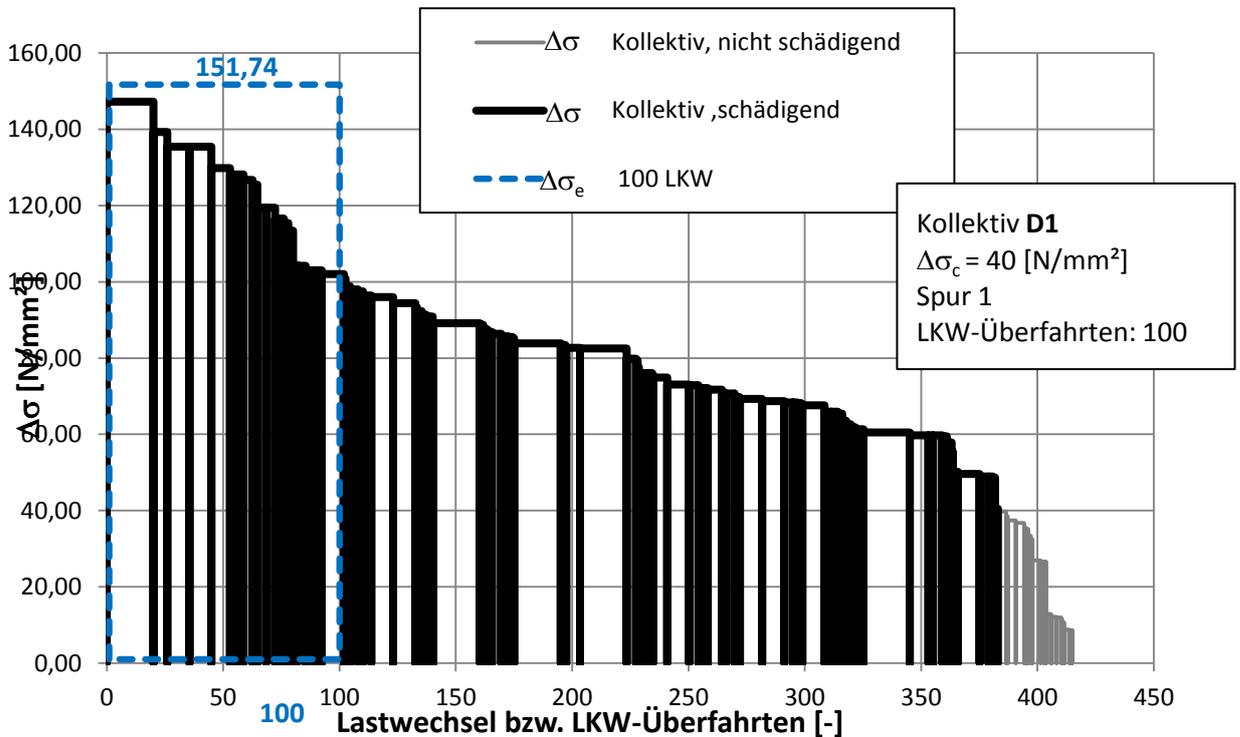


Abbildung 79: Lastkollektiv für D1 unter Berücksichtigung realer Achsgeometrie und Fahrspurverhalten mit Verteilung nach Blab ($\Delta\sigma_c = 40$ [N/mm²])

6.1.2 Häufigkeitsverteilung nach EN 1991-2 für Detail D1 und Achse C um 160mm versetzt

Die prinzipielle Vorgehensweise für jeden Kollektivteil aus dem Lastkollektiv der zentrischen Überfahrt (siehe Abbildung 43) ist grafisch in Abbildung 80 dargestellt.

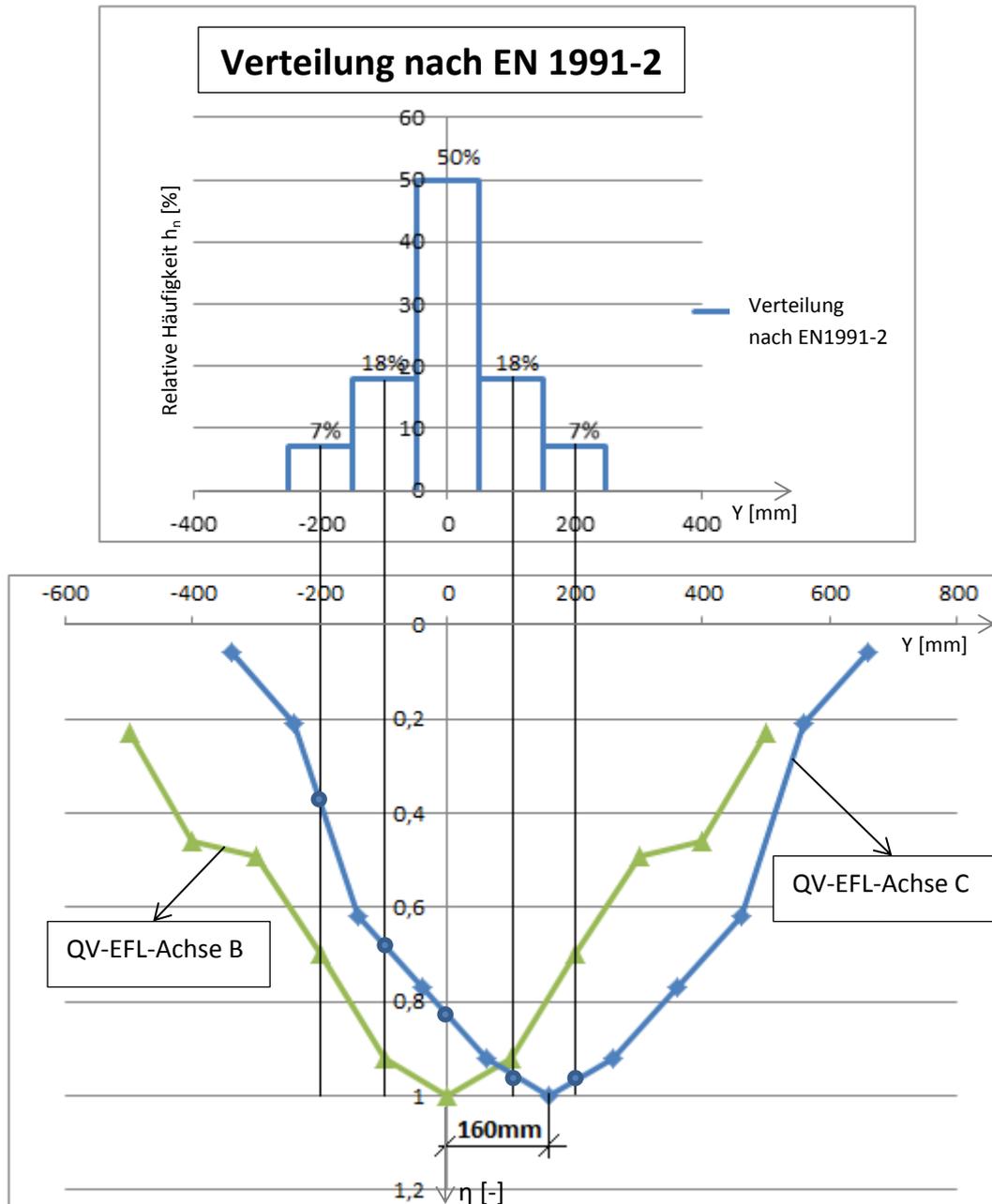
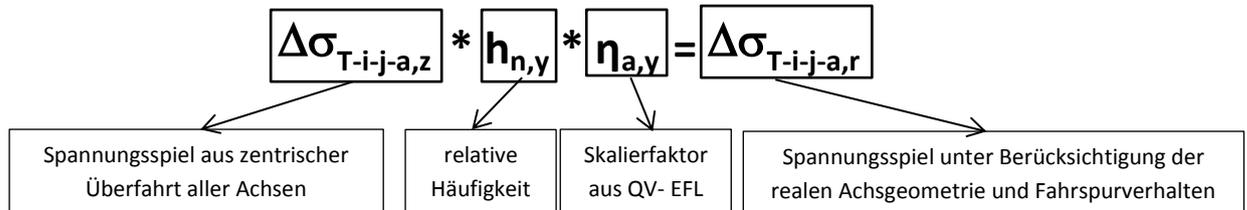


Abbildung 80: D1- Einflusslinien in Querrichtung bei $X_{(\min\sigma)}=360\text{mm}$ (B-mittig und C-160mm versetzt) und Häufigkeitsverteilung nach 1991-2 [7]

ACHSE	-200mm	-100mm	0mm	100mm	200mm
B	0,70	0,92	1,00	0,92	0,70
C	0,37	0,68	0,83	0,95	0,97

Tabelle 22: Werte der Skalierfaktoren η aus der Abbildung 80

Nachfolgend wird an einem Beispiel dargestellt, wie die Ermittlung des Lastkollektives unter Berücksichtigung von realer Achsgeometrie und Fahrspurverhalten durchgeführt wurde. Aus dem Lastkollektiv der zentrischen Überfahrt (siehe Abbildung 43) wird als Beispiel das größte Spannungsspiel $\Delta\sigma_{T-3-2-B} = 147,24 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ infolge Achse B herangezogen:



i – Fahrzeugtyp

z – zentrische Überfahrt aller Achsen

j – Achsnummer

r – Berücksichtigung realer Achsgeometrie und Fahrspurverhalten

a – Achsart

y – Lage in Brückenquerrichtung bezogen auf Längsrippe LR-3

$$\Delta\sigma_{T-3-2-1} = 147,24 * 0,07 * 0,70 = 7,21 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\Delta\sigma_{T-3-2-2} = 147,24 * 0,18 * 0,92 = 24,38 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\Delta\sigma_{T-3-2-3} = 147,24 * 0,50 * 1,00 = 73,62 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\Delta\sigma_{T-3-2-4} = 147,24 * 0,18 * 0,92 = 24,38 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\Delta\sigma_{T-3-2-5} = 147,24 * 0,07 * 0,70 = 7,21 \text{ [N/mm}^2\text{]}.$$

Alle Spannungsspiele wurden auf diese Art skaliert. Für Spannungsspiele infolge Achse B erfolgte die Skalierung unter Anwendung der QV-EFL-Achse B (Zwillingsrad) und für Spannungsspiele infolge Achse A und C erfolgte sinngemäß die Skalierung unter Anwendung der QV-EFL-Achse C (Einzelrad).

Abbildung 81 zeigt nun das resultierende Lastkollektiv für Detail D1 unter Berücksichtigung realer Achsgeometrie und Fahrspurverhalten nach der Häufigkeitsverteilung nach EN 1991-2 [7] unter dem Ansatz der Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 100 \text{ [N/mm}^2\text{]}$. Das ermüdungsäquivalente Einstufenkollektiv beträgt $\Delta\sigma_e = 154,43 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ (siehe Abbildung 81). Dies entspricht einer Reduktion von $\frac{154,43}{174,04} = 0,89$ bezogen auf die rein zentrische Überfahrt aller Achsen.

Ergänzend erfolgte die Ermittlung des Lastkollektives für Detail D1 unter denselben Bedingungen für eine Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 40 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ (siehe Abbildung 82).

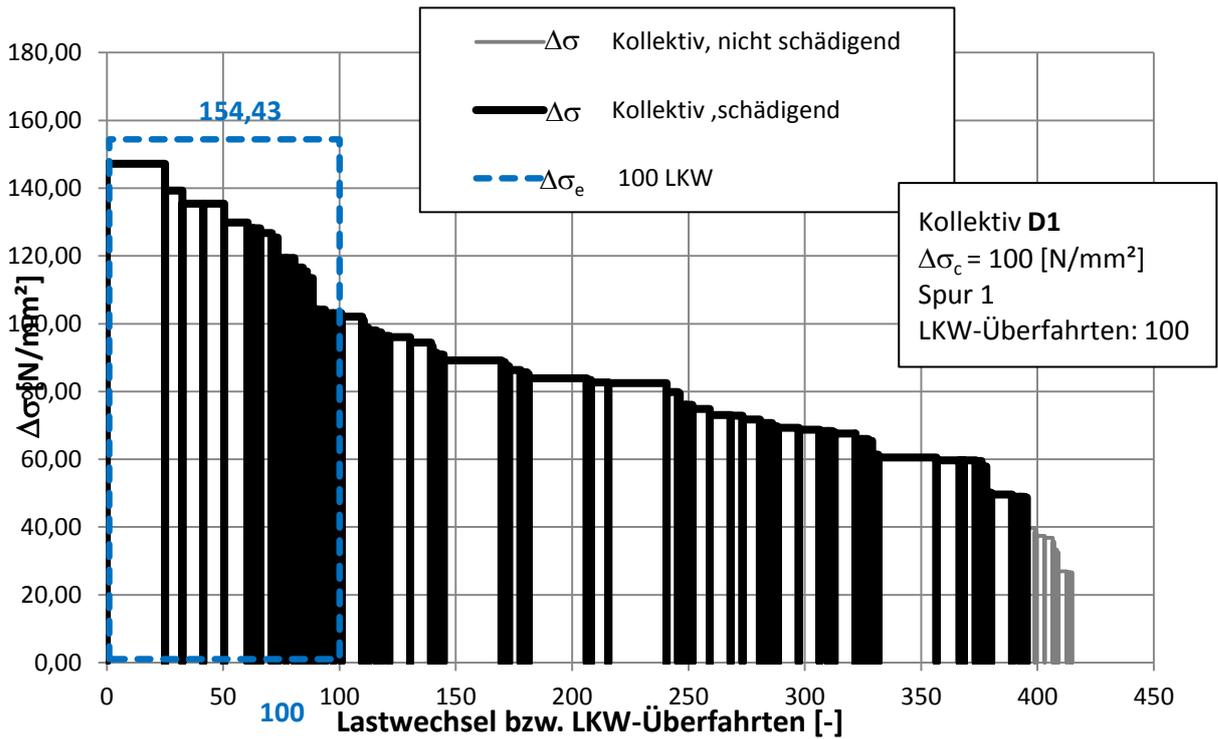


Abbildung 81: Lastkollektiv für D1 unter Berücksichtigung realer Achsgeometrie und Fahrspurverhalten mit Verteilung nach EN 1991-2 ($\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm²])

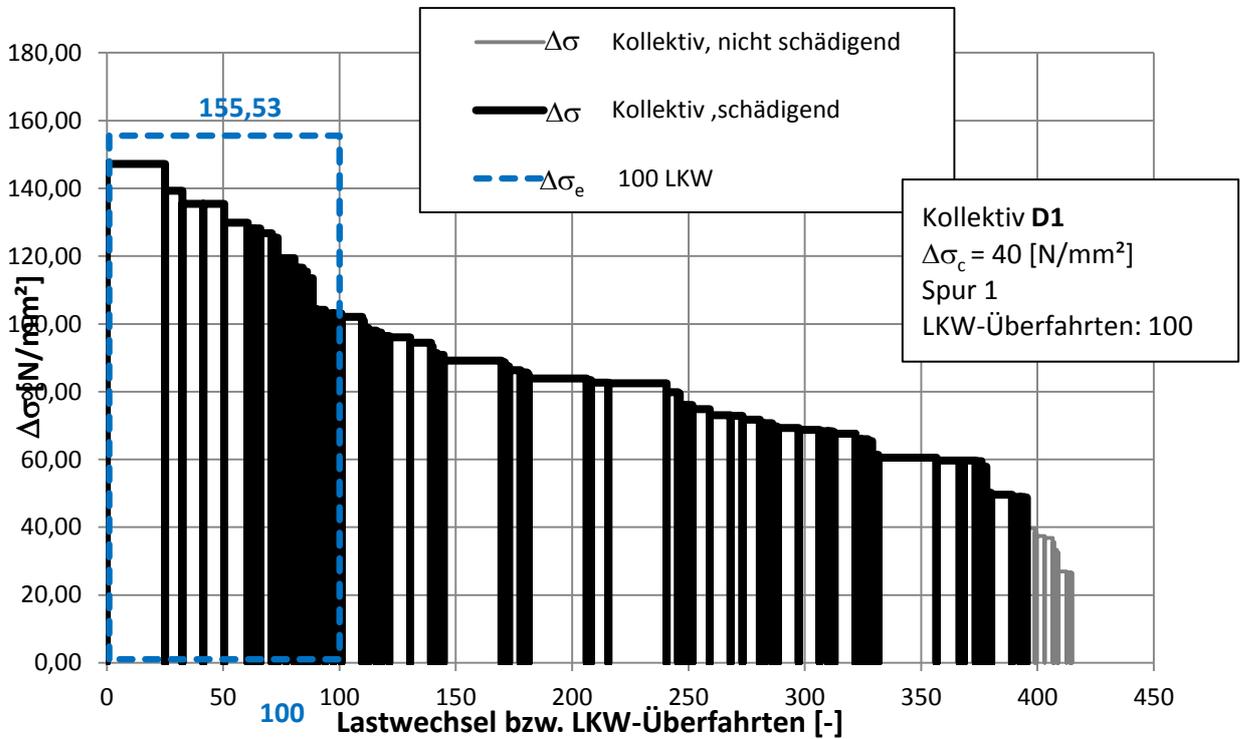


Abbildung 82: Lastkollektiv für D1 unter Berücksichtigung realer Achsgeometrie und Fahrspurverhalten mit Verteilung nach EN 1991-2 ($\Delta\sigma_c = 40$ [N/mm²])

6.2 Ergebnisse für Detail D2

Für die Darstellung der Kollektive bezüglich der Häufigkeitsverteilung wird das Gesamtkollektiv aus dem Kapitel 5 (Abbildung 65) wieder als Basis herangezogen, welches in weiterer Folge anhand der zutreffenden Faktoren skaliert wurde. Dieses Lastkollektiv resultiert aus der zentrischen Überfahrt aller Achsen unmittelbar über Längsrippe LR-3 aus Abschnitt 5.2.3. Abbildung 65 zeigt nochmals dieses Lastkollektiv, wobei die einzelnen Kollektivteile betreffend des Fahrzeugtyps eingefärbt wurden und mit folgender Kennzeichnung versehen wurden:

T i - j (i - Fahrzeugtyp, j - Achsart (A, B, C)).

Anhand der Kennzeichnung der Kollektivteile ist um eine Zuordnung von Fahrzeugtyp sowie Achse zu Kollektivteil möglich. Ein Beispiel der Kennzeichnung befindet sich in Abschnitt 5.2.5.

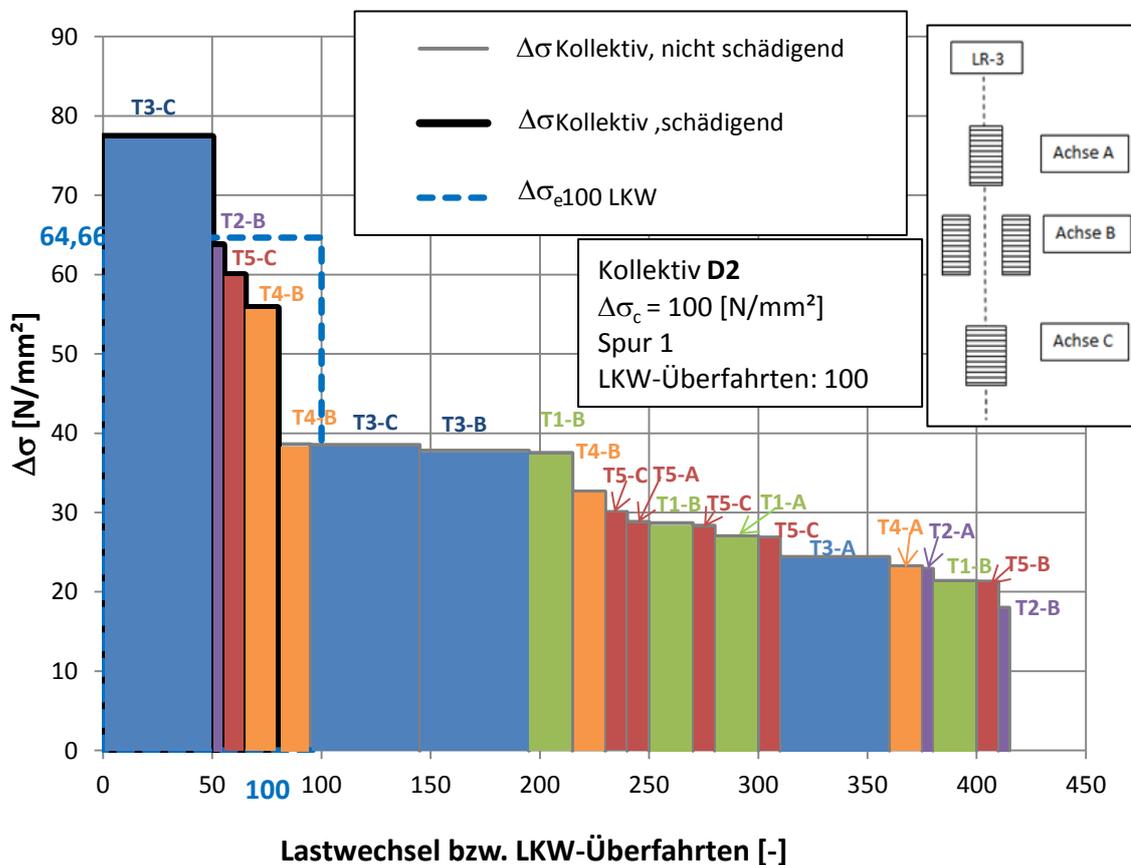


Abbildung 65: D2 - Lastkollektiv zentrische Spurlage $\Delta\sigma_c = 100 \text{ [N/mm}^2\text{]}$

6.2.1 Häufigkeitsverteilung nach Blab für Detail D2 und Achse C um 160mm versetzt

Die prinzipielle Vorgehensweise für jeden Kollektivteil aus dem Lastkollektiv der zentrischen Überfahrt (siehe Abbildung 65) ist grafisch in Abbildung 83 dargestellt.

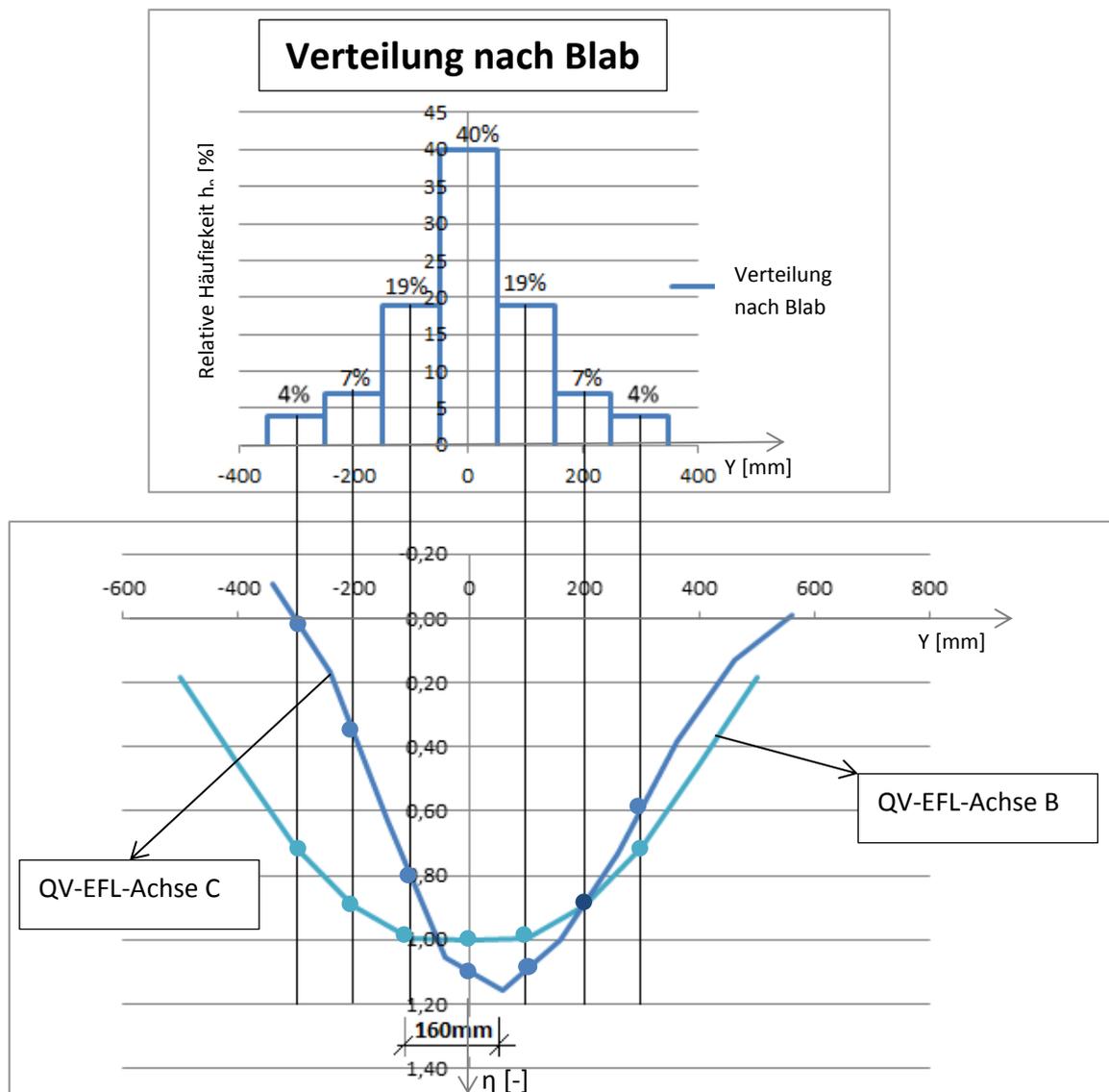
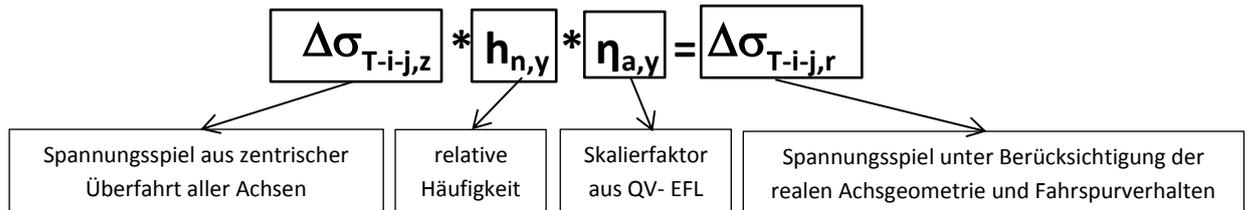


Abbildung 83: D2- Einflusslinien in Querrichtung bei $X_{(\min\sigma)}=800\text{mm}$ (B-mittig und C-160mm versetzt) und Häufigkeitsverteilung nach Blab [3]

ACHSE	-300mm	-200mm	-100mm	0mm	100mm	200mm	300mm
B	0,71	0,89	0,99	1,00	0,99	0,89	0,71
C	0,02	0,35	0,81	1,10	1,09	0,89	0,59

Tabelle 23: Werte der Skalierfaktoren η aus der Abbildung 83

Nachfolgend wird an einem Beispiel dargestellt, wie die Ermittlung des Lastkollektives unter Berücksichtigung von realer Achsgeometrie und Fahrspurverhalten durchgeführt wurde. Aus dem Lastkollektiv der zentrischen Überfahrt (siehe Abbildung 65) wird als Beispiel das größte Spannungsspiel $\Delta\sigma_{T-3-2-B} = 77,37 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ infolge Achse B herangezogen:



i – Fahrzeugtyp

z – zentrische Überfahrt aller Achsen

j – Achsart

r – Berücksichtigung realer Achsgeometrie und Fahrspurverhalten

y – Lage in Brückenquerrichtung bezogen auf Längsrippe LR-3

$$\Delta\sigma_{T3-C-1} = 77,37 * 0,04 * 0,02 = 0,06 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\Delta\sigma_{T3-C-2} = 77,37 * 0,07 * 0,35 = 1,89 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\Delta\sigma_{T3-C-3} = 77,37 * 0,19 * 0,81 = 11,90 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\Delta\sigma_{T3-C-4} = 77,37 * 0,40 * 1,10 = 34,04 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\Delta\sigma_{T3-C-5} = 77,37 * 0,19 * 1,09 = 16,02 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\Delta\sigma_{T3-C-6} = 77,37 * 0,07 * 0,89 = 4,82 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\Delta\sigma_{T3-C-7} = 77,37 * 0,04 * 0,59 = 1,82 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Alle Spannungsspiele wurden auf diese Art skaliert. Für Spannungsspiele infolge Achse A und C erfolgte die Skalierung unter Anwendung der QV-EFL-Achse C (Einzelrad) und für Spannungsspiele infolge Achse B erfolgte sinngemäß die Skalierung unter Anwendung der QV-EFL-Achse B (Zwillingsrad).

Abbildung 84 zeigt nun das resultierende Lastkollektiv für Detail D2 unter Berücksichtigung realer Achsgeometrie und Fahrspurverhalten nach der Häufigkeitsverteilung nach Blab [3] unter dem Ansatz der Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 100 \text{ [N/mm}^2\text{]}$. Das ermüdungsäquivalente Einstufenkollektiv beträgt $\Delta\sigma_e = 66,89 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ (siehe Abbildung 84). Dies entspricht einer Reduktion von $\frac{66,89}{64,66} = 1,03$, bezogen auf die rein zentrische Überfahrt aller Achsen.

Ergänzend erfolgte die Ermittlung des Lastkollektives für Detail D2 unter denselben Bedingungen für eine Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 40 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ (siehe Abbildung 85).

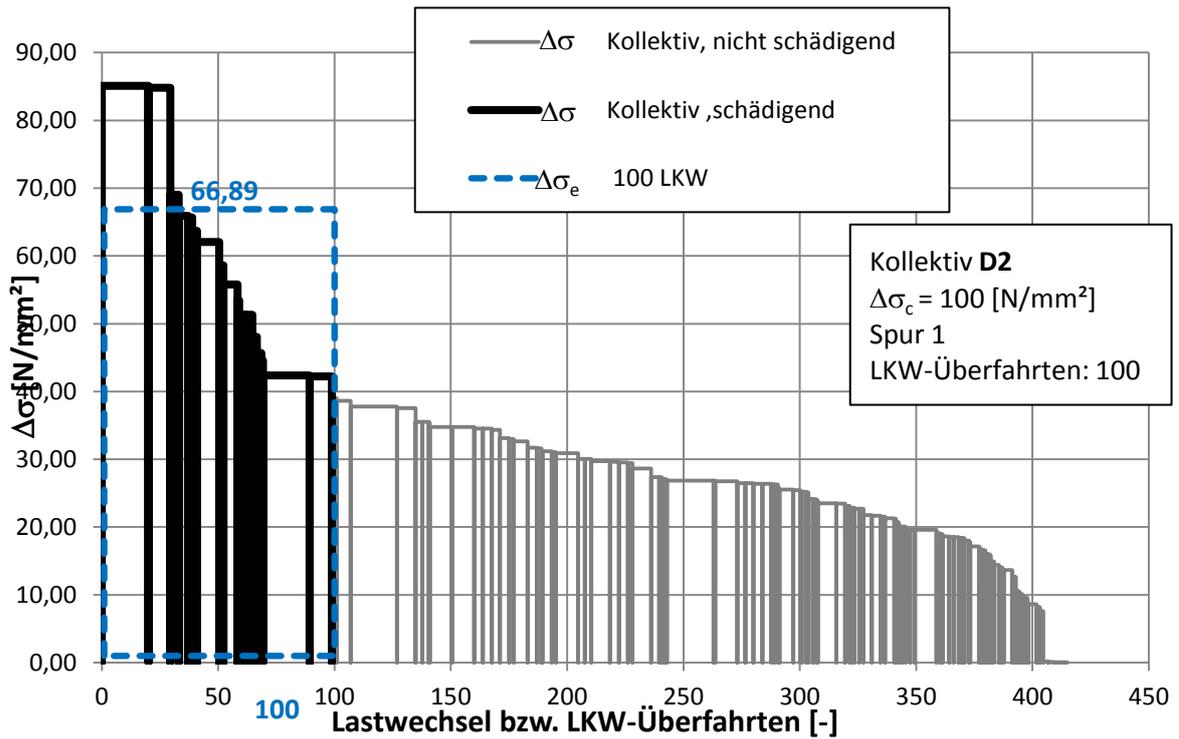


Abbildung 84: Lastkollektiv für D2 unter Berücksichtigung realer Achsgeometrie und Fahrspurverhalten mit Verteilung nach Blab ($\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm²])

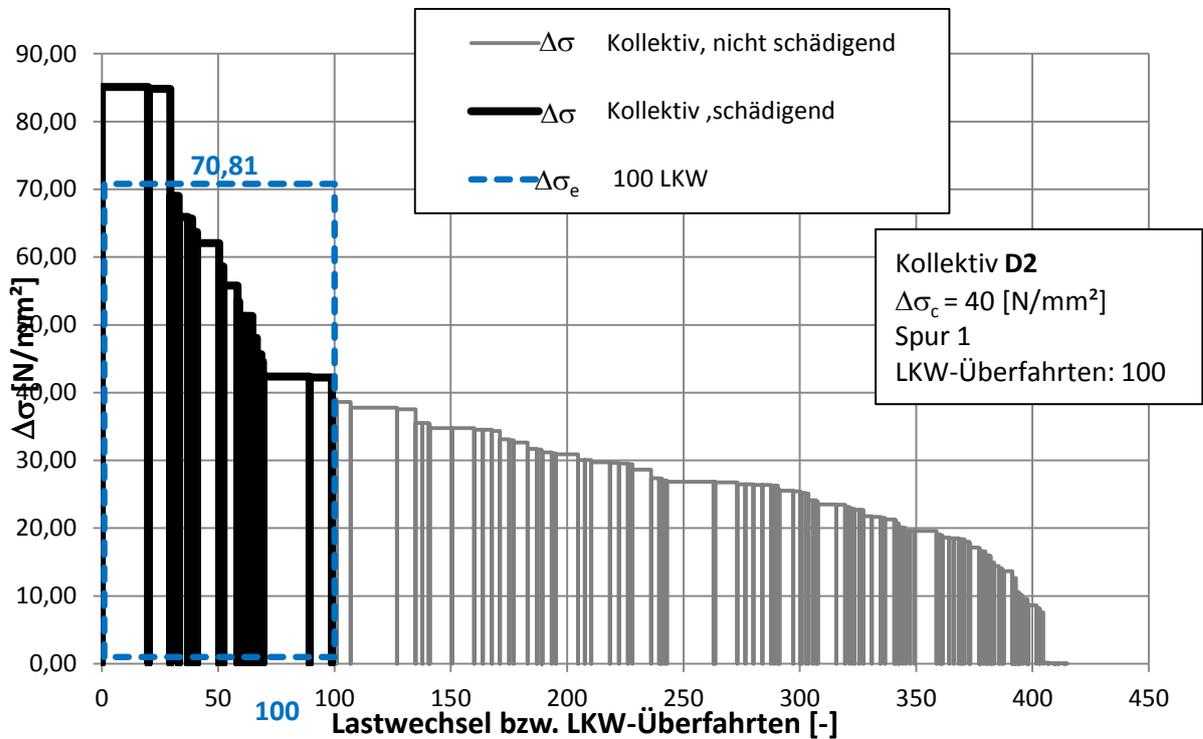


Abbildung 85: Lastkollektiv für D2 unter Berücksichtigung realer Achsgeometrie und Fahrspurverhalten mit Verteilung nach Blab ($\Delta\sigma_c = 40$ [N/mm²])

6.2.2 Häufigkeitsverteilung nach EN 1991-2 für Detail D2 und Achse C um 160mm versetzt

Die prinzipielle Vorgehensweise für jeden Kollektivteil aus dem Lastkollektiv der zentrischen Überfahrt (siehe Abbildung 65) ist grafisch in Abbildung 86 dargestellt.

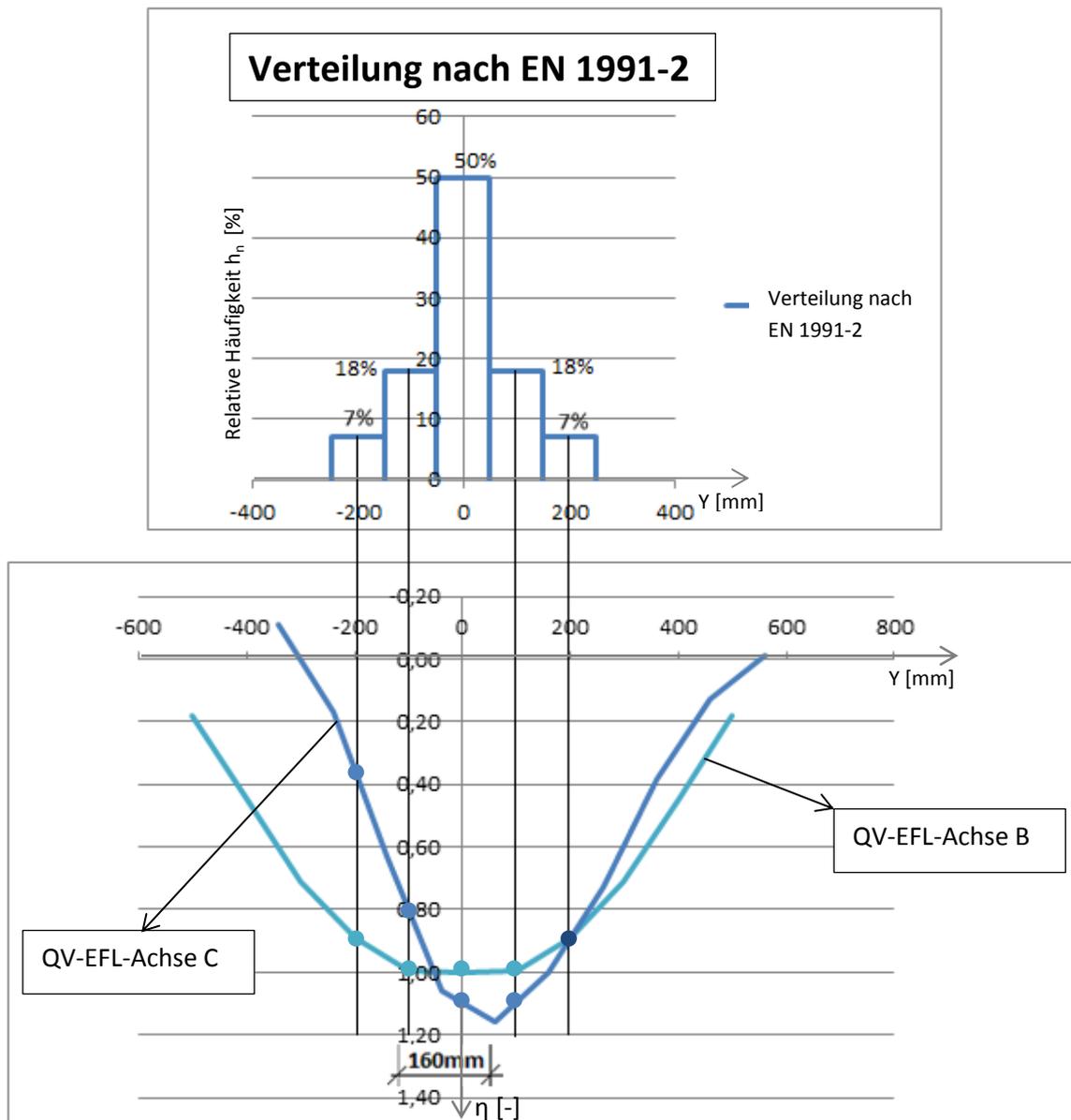
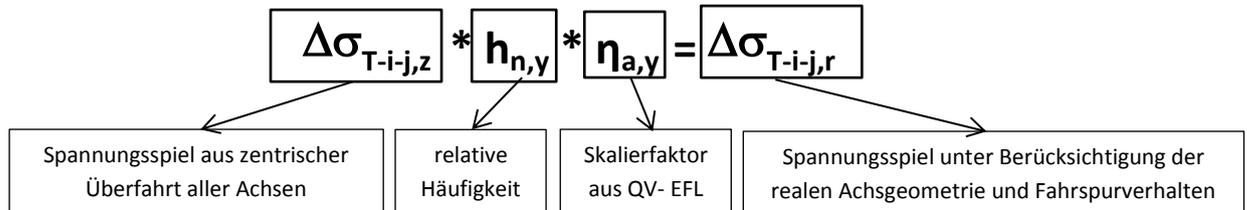


Abbildung 86: D2- Einflusslinien in Querrichtung bei $X_{(\min\sigma)}=800\text{mm}$ (B-mittig und C-160mm versetzt) und Häufigkeitsverteilung nach 1991-2 [7]

ACHSE	-200mm	-100mm	0mm	100mm	200mm
B	0,89	0,99	1,00	0,99	0,89
C	0,35	0,81	1,10	1,09	0,89

Tabelle 24: Werte der Skalierfaktoren η aus der Abbildung 86

Nachfolgend wird an einem Beispiel dargestellt, wie die Ermittlung des Lastkollektives unter Berücksichtigung von realer Achsgeometrie und Fahrspurverhalten durchgeführt wurde. Aus dem Lastkollektiv der zentrischen Überfahrt (siehe Abbildung 65) wird als Beispiel das größte Spannungsspiel $\Delta\sigma_{T-3-2-B} = 77,37 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ infolge Achse B herausgezogen:



i – Fahrzeugtyp

z – zentrische Überfahrt aller Achsen

j – Achsart

r – Berücksichtigung realer Achsgeometrie und Fahrspurverhalten

y – Lage in Brückenquerrichtung bezogen auf Längsrippe LR-3

$$\Delta\sigma_{T3-C-1} = 77,37 * 0,07 * 0,35 = 1,89 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\Delta\sigma_{T3-C-2} = 77,37 * 0,18 * 0,81 = 11,28 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\Delta\sigma_{T3-C-3} = 77,37 * 0,50 * 1,10 = 42,55 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\Delta\sigma_{T3-C-4} = 77,37 * 0,18 * 1,09 = 15,18 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\Delta\sigma_{T3-C-5} = 77,37 * 0,07 * 0,89 = 4,82 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Alle Spannungsspiele wurden auf diese Art skaliert. Für Spannungsspiele infolge Achse A und C erfolgte die Skalierung unter Anwendung der QV-EFL-Achse C (Einzelrad) und für Spannungsspiele infolge Achse B erfolgte sinngemäß die Skalierung unter Anwendung der QV-EFL-Achse B (Zwillingsrad).

Abbildung 87 zeigt nun das resultierende Lastkollektiv für Detail D2 unter Berücksichtigung realer Achsgeometrie und Fahrspurverhalten nach der Häufigkeitsverteilung nach EN 1991-2 [7] unter dem Ansatz der Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 100 \text{ [N/mm}^2\text{]}$. Das ermüdungsäquivalente Einstufenkollektiv beträgt $\Delta\sigma_e = 68,51 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ (siehe Abbildung 87). Dies entspricht einer Reduktion von $\frac{68,51}{64,66} = 1,06$, bezogen auf die rein zentrische Überfahrt aller Achsen.

Ergänzend erfolgte die Ermittlung des Lastkollektives für Detail D2 unter denselben Bedingungen für eine Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 40 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ (siehe Abbildung 88).

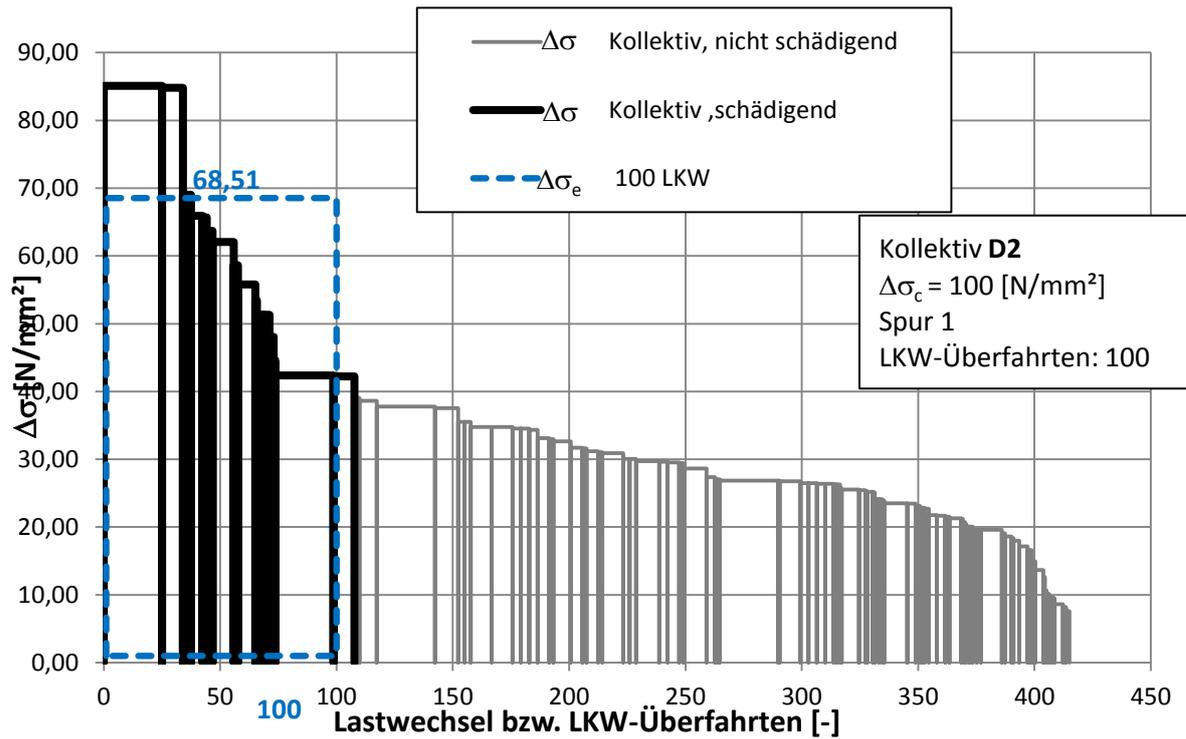


Abbildung 87: Lastkollektiv für D2 unter Berücksichtigung realer Achsgeometrie und Fahrspurverhalten mit Verteilung nach EN 1991-2 ($\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm²])

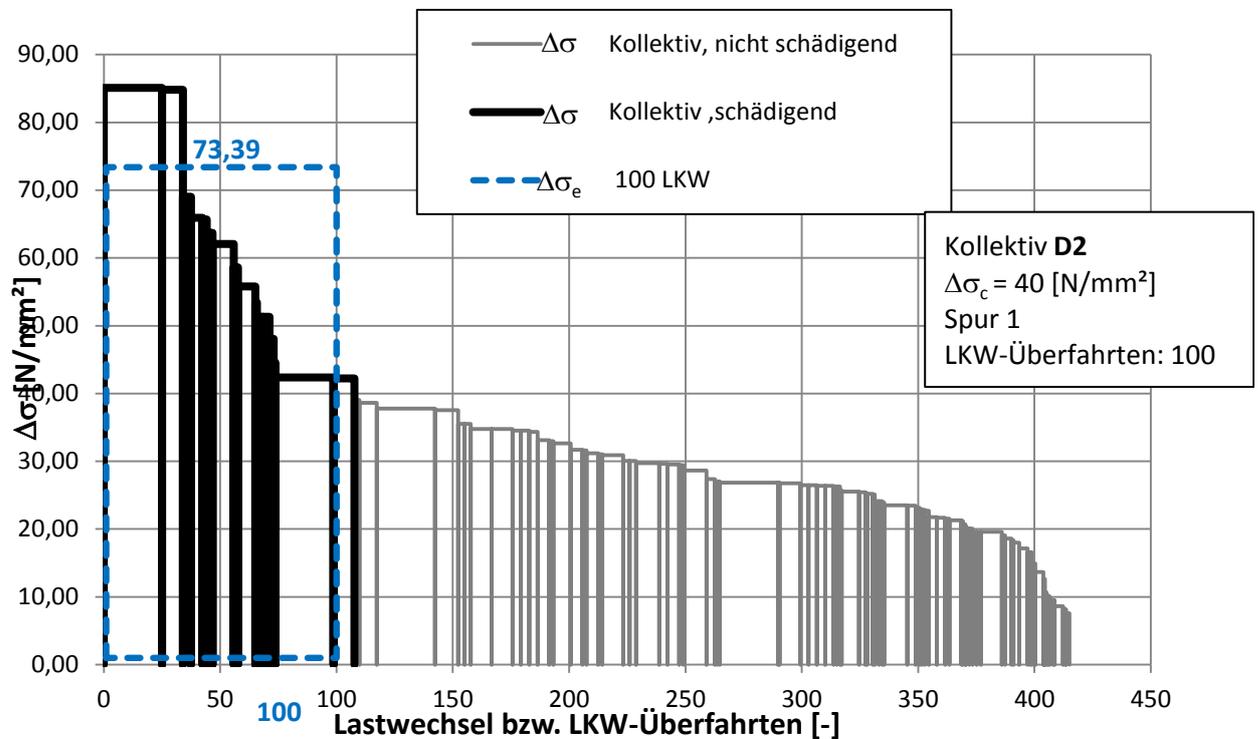


Abbildung 88: Lastkollektiv für D2 unter Berücksichtigung realer Achsgeometrie und Fahrspurverhalten mit Verteilung nach EN 1991-2 ($\Delta\sigma_c = 40$ [N/mm²])

6.3 Zusammenfassende Beurteilung

$\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm ²]	$\Delta\sigma_{e,D1}$ [N/mm ²] n=100LKW		$\Delta\sigma_{e,D2}$ [N/mm ²] n=100LKW	
Verteilung nach Blab [3]	150,56	0,87	66,89	1,03
Verteilung nach 1991-2	154,43	0,89	68,51	1,06
zentrische Überfahrt	174,04	1,00	64,66	1,00

Tabelle 25: $\Delta\sigma_{e,i}$ bezogen auf n=100LKW unter Berücksichtigung realer Achsgeometrie und Fahrverhalten für D1 und D2 mit $\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm²]

Tabelle 25 zeigt die Ergebnisse der Analysen zur Berücksichtigung realer Achsgeometrien, sowie Fahrspurverhalten für die Details D und D2 anhand der ermittelten schadensäquivalenten Einstufenkollektive $\Delta\sigma_{e,i}$. Bei Vergleich der Werte aus Tabelle 25 mit den Werten aus Tabelle 19 (siehe Abschnitt 5.3) lässt sich feststellen, dass hauptsächlich die Berücksichtigung realer Achsgeometrien einen Einfluss auf die schädigende Wirkung der Detailpunkte D1 und D2 hat.

Bei Detailpunkt D1 kann somit eine Reduktion des schadensäquivalenten Einstufenkollektives $\Delta\sigma_{e,D1}$ (n=100LKW), bezogen auf eine rein zentrische Überfahrt aller Achsen über die Längsrippe, um 11% bis 13% festgestellt werden.

Bei detailpunkt D2 kann eine Erhöhung des schadensäquivalenten Einstufenkollektives $\Delta\sigma_{e,D2}$ (n=100LKW), bezogen auf eine rein zentrische Überfahrt aller Achsen über die Längsrippe, um 3% bis 6% festgestellt werden. Ohne Berücksichtigung des Fahrspurverhaltens ergaben die Untersuchungen für D2 eine Erhöhung von $\Delta\sigma_{e,D2}$ (n=100LKW) um 10%. Diese Erhöhung der Spannungsspiele bei D2 gelten für offene Längsrippen und resultieren aus Erhöhung der Querbiegung der LR infolge exzentrischer Beanspruchung.

$\Delta\sigma_c = 40$ [N/mm ²]	$\Delta\sigma_{e,D1}$ [N/mm ²] n=100LKW		$\Delta\sigma_{e,D2}$ [N/mm ²] n=100LKW	
Verteilung nach Blab [3]	151,74	0,87	70,81	0,96
Verteilung nach 1991-2	155,73	0,89	73,39	1,00
zentrische Überfahrt	174,18	1,00	73,48	1,00

Tabelle 26: $\Delta\sigma_{e,i}$ bezogen auf n=100LKW unter Berücksichtigung realer Achsgeometrie und Fahrverhalten für D1 und D2 mit $\Delta\sigma_c = 40$ [N/mm²]

Die Berechnung unter dem Ansatz einer Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c=100$ [N/mm²] zeigen, wie in Tabelle 26 zu sehen ist, für D1 idente Ergebnisse. Für D2 gibt es unter dem Ansatz von $\Delta\sigma_c=40$ [N/mm²] keine Erhöhung des schadensäquivalenten Einstufenkollektives.

-Detail D1

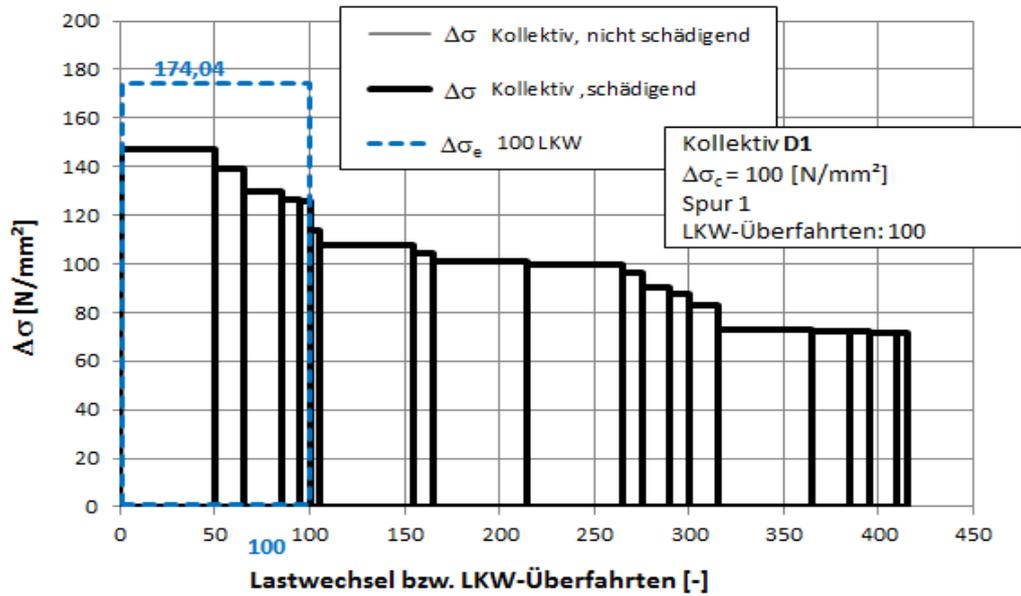


Abbildung 40: D1 - Lastkollektiv zentrische Spurlage $\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm²]

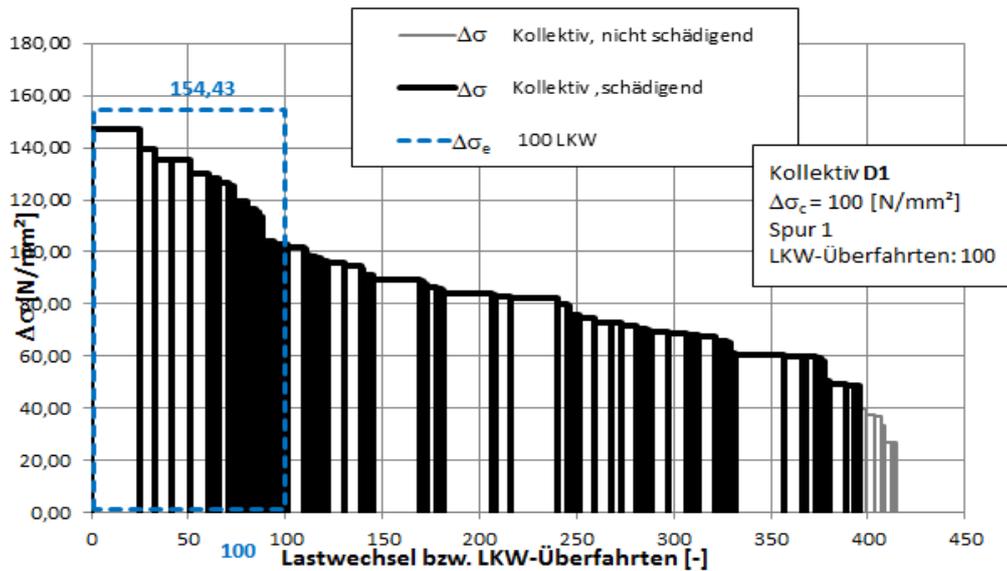


Abbildung 81: Lastkollektiv für D1 unter Berücksichtigung realer Achsgeometrie und Fahrspurverhalten mit Verteilung nach EN 1991-2 ($\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm²])

-Detail D2

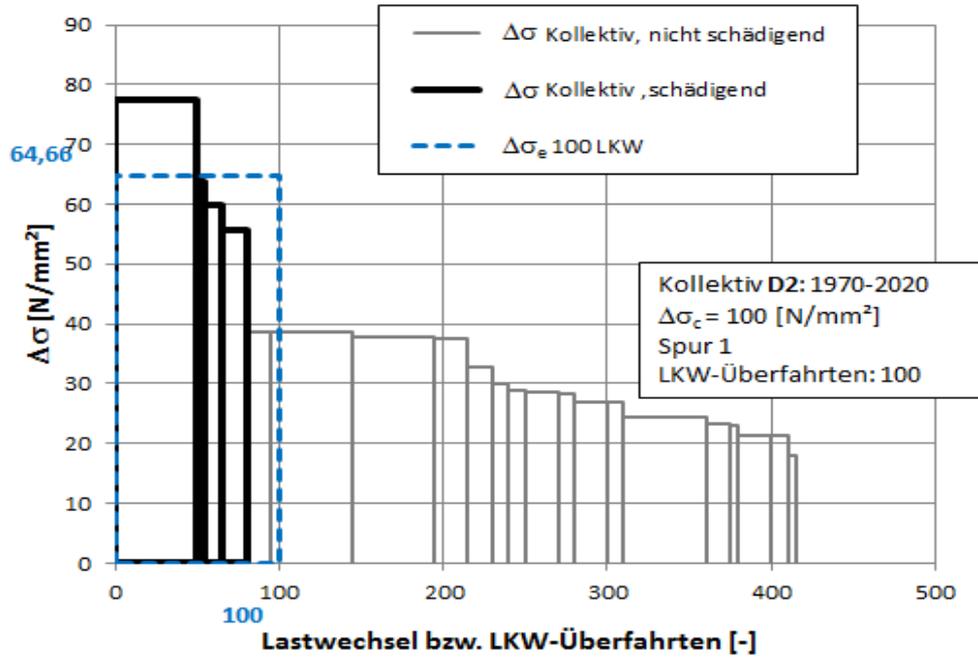


Abbildung 62: D2 - Lastkollektiv zentrische Spurlage $\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm²]

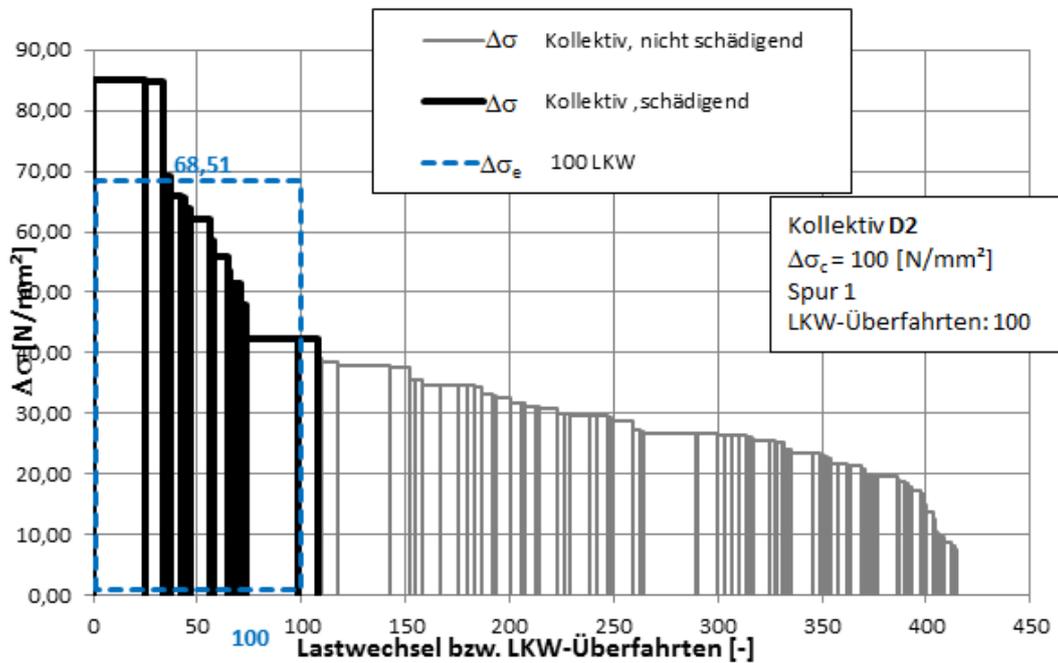


Abbildung 87: Lastkollektiv für D2 unter Berücksichtigung realer Achsgeometrie und Fahrspurverhalten mit Verteilung nach EN 1991-2 ($\Delta\sigma_c = 100$ [N/mm²])

A Anhang A : FEM- Modell aus ABAQUS

Bei der Berechnung wurde eine orthotrope Platte mit offenen Längsrippen benutzt. Das FEM-Modell wurde im Software Programm ABAQUS/CAE 6.10-1 erstellt. Das fertige Modell, das in dieser Arbeit für die Untersuchungen benutzt wurde, wurde aus dem FFG-Forschungsprojekt Nr. 840487: "Verstärkung orthotroper Stahlfahrbahnplatten mit Hochleitungsbetonen zur Erzielung einer deutlichen erhöhten Restlebensdauer" [1] genommen.

Die globale Tragwirkung der Brücke ist bei dem Modell nicht berücksichtigt. Die Ermüdung der Spannungen kommt aus der lokalen Tragwirkung der Fahrbahndecke, deshalb wurde nur ein Brückendeck zwischen den Hauptträger der orthotropen Fahrbahnplatte betrachtet.

A.1 Brückendeck der Straßenbrücke

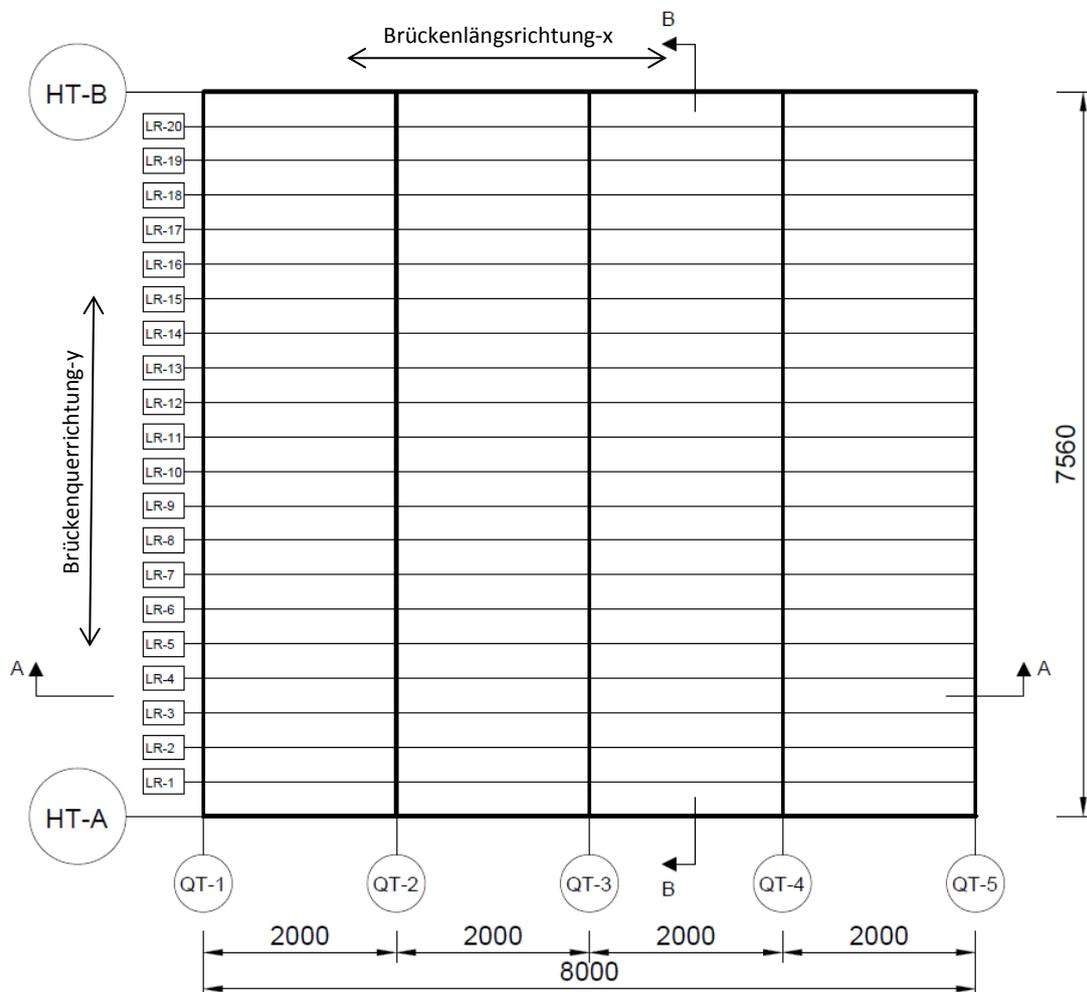


Abbildung A-1: Grundriss der Brückendecke [1]

Im Grundriss (Abbildung A-1) ist zu sehen, dass die Abmessungen der Brückendecke 8,00 m und 7,56 m sind. Die Brückendecke besteht aus:

- zwei Hauptträgern (HT-A und HT-B)
- fünf Querträgern (QT 1 bis QT 5)
- Zwanzig Längsrippen (LR-1 bis LR-20).

Die Länge der Hauptträger und der Längsrippen ist identisch und beträgt 8 m. Am Grundriss ist zu bemerken, dass die Querrippen oder Querträger ein bisschen kürzer als die Längsrippen sind und deren Länge 7,56 m beträgt. Der Abstand zwischen den Hauptträgern ist 7,56m und zwischen den Querträgern 2m. Längsrippenabstand ist viel kleiner und beträgt 0,36m. An der Abbildung A-2 aus Abaqus ist genauer darstellt wie die Brückendecke modelliert ist.

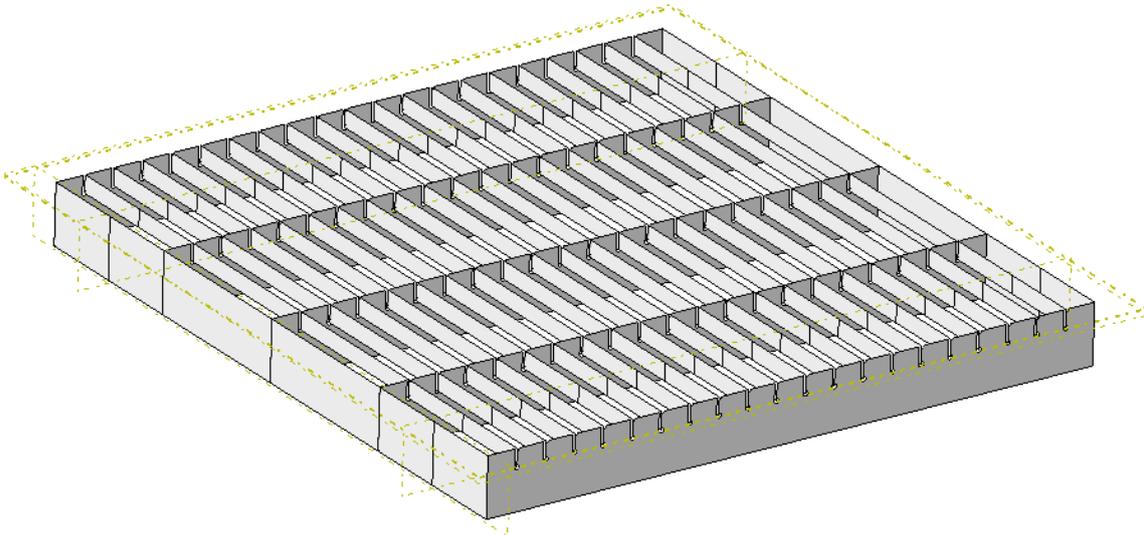


Abbildung A-2: Brückendecke aus Abaqus [6]

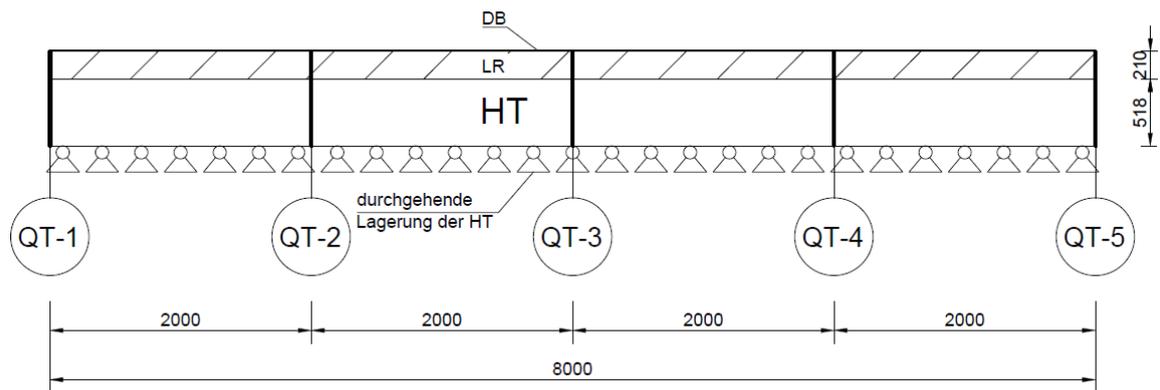


Abbildung A-3: Schnitt A-A in der Längsrichtung [5]

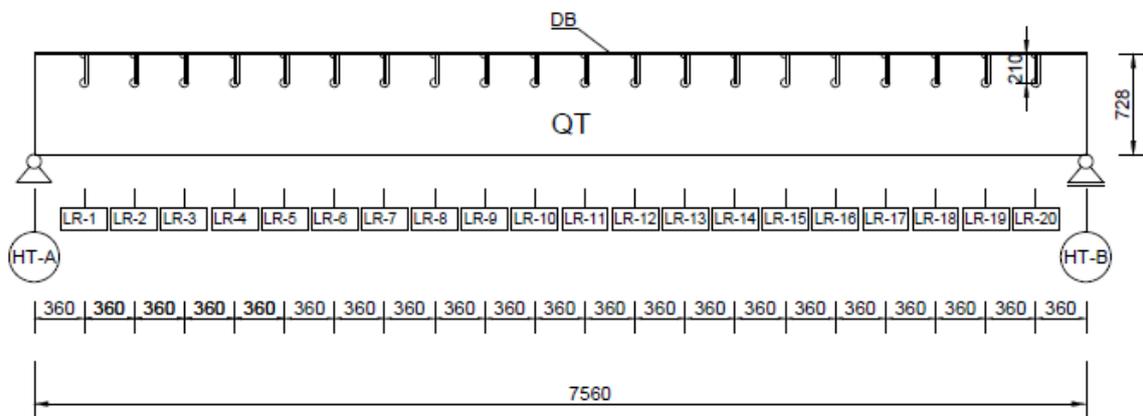


Abbildung A-4: Schnitt B-B in der Querrichtung [5]

Die Längsrippe hat eine Höhe von $h_{LR}=21\text{cm}$ und die Querrippe eine Höhe von $h_{QT}= 72,8\text{ cm}$. Die Stege vom Hauptträger sind bis zum Untergurt der Querrippen modelliert und in einer Linienform gelagert. Am Brückendeck sind die Längsrippen über die ganze Länge aufgestellt und an die Querrippen angeschlossen. Nach der Norm EN 1993-2 [10] ist eine Deckblechslankheit von $e/t \leq 25$ vorgesehen und bei diesem Modell ist das Verhältnis $e_{LR}/t_{DB} = 36$, was viel größer ist, als Vorgesehen. Die Blechstärken der Elemente sind verschieden: Hauptträger $t_{HT} = 12\text{ mm}$, Querträger $t_{QT} = 8\text{ mm}$ und Längsrippe $t_{LR} = 10\text{ mm}$.

A.2 Modellierung der Fahrbahnplatte

Das Modell, wie schon gesagt, ist aus dem Bericht [1] übernommen. An diesem wurden die Simulationen der Überfahrten erstellt. In diesem Teil der Arbeit wird das Modell näher beschrieben wie es modelliert ist. Im nachfolgenden Abschnitt sind die Bauteile des FEM Modells genau angegeben und das Material aus dem sie bestehen.

A.2.1 Materialeigenschaften der Brückendecke

Die betrachtete Brückendecke ist aus Stahl konstruiert und nach EN 1993-1-1 3.2.6 [8] Materialeigenschaften modelliert. Die verwendeten Materialwerte für die Modellierung in Abaqus sind: $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$ - Modul der Elastizität und $\nu = 0,3$ - Zahl der Querdehnung, auch Poisson'sche Zahl genannt.

A.2.2 Bauteile der Brückendecke

Die Varianten für die Modellierung der einzelnen Bauteile sind sehr verschieden. Bei dieser Brückendecke sind die Bauteile als Schalenelemente, Stabelemente und Volumenelemente modelliert. Hauptträger ($t_{HT} = 12 \text{ mm}$), Querträger ($t_{QT} = 8 \text{ mm}$) und Längsrippen ($t_{LR} = 10 \text{ mm}$) sind im Abaqus als Schalenelemente modelliert. Der Querträger Untergurt mit den Abmessungen 160x8 ist ein Stabelement. Als Volumenelement sind das Deckblech sowie die Schweißnähte zwischen Längsrippe und Deckblech modelliert.

A.2.3 Schalenelemente

Die Schalenelemente werden auch Shell Elemente genannt. Der Vorteil bei der Modellierung der Shell Elemente ist, dass man nur die Geometrie und die Dicke eingeben muss und ein Rechenaufwand von Abaqus wird, im Gegensatz zu Volumenelementen minimiert. Diese Art der Modellierung ist sehr gut geeignet für Hauptträger, Längsrippen und Querrippen. In den nachfolgenden Abbildungen A-5, A-6, A-7 sind die Shell Elemente aus Abaqus dargestellt.



Abbildung A-5: Hauptträger-Shell Element $l=8 \text{ m}$ [6]

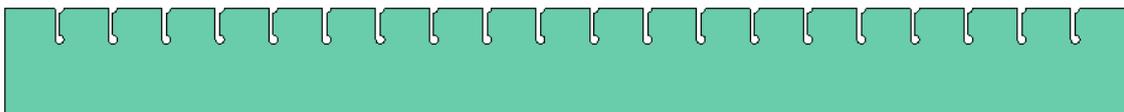


Abbildung A-6: Querträger-Shell Element $l = 7,65 \text{ m}$ [6]



Abbildung A-7: Längsrippe-Shell Element $l = 8 \text{ m}$ [6]

A.2.4 Stabelemente

Bei Modellierung im Abaqus ist nur der Querträger Untergurt als Stab-Element modelliert. Für die Erstellung eines Stabelements ist es notwendig nur die Länge und das gewünschte Profil einzugeben. Die Länge von diesem Stab-Element beträgt 7650mm und es wurde ein Querschnittprofil (160x8) ausgewählt (siehe Abbildung A-8).

Abbildung A-8: Querträger Untergurt-Stab-Element $l = 7,65 \text{ m}$ [6]

A.2.5 Volumenelemente

Im Teil A.2.2 ist schon angegeben das das Deckblech und die Schweißnaht als Volumen-Element modelliert sind. Die Modellierung dieser Art ist sehr komplex, da die Anzahl der Freiheitsgrade größer ist, als bei den anderen Elementen ist. Bezüglich der größeren Anzahl der Freiheitsgrade ist die Zeit für die Rechnung auch viel größer. Daher sind nur die Schweißnähte und das Deckblech auf diese Art modelliert (siehe Abbildung A-9 und A-10).

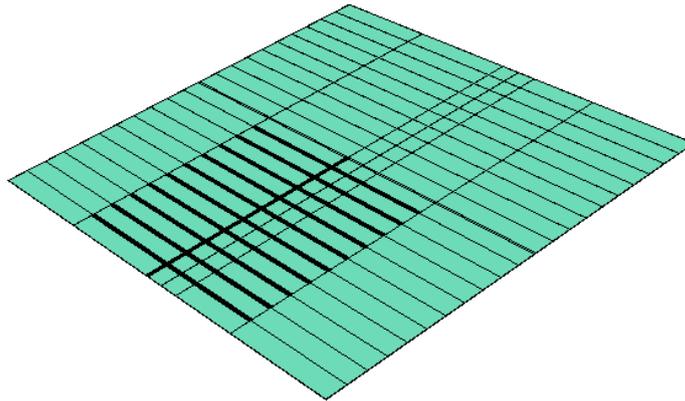


Abbildung A-9: Deckblech- Volumen Element $l=8 \text{ m}$ und $b=7,65$ [6]

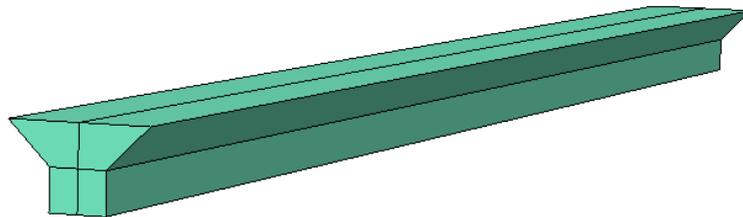


Abbildung A-10: Schweißnaht-Volumen Element [6]

An der Längsrippe sind die Schweißnähte nur auf der inneren Seite des Deckblechs modelliert und nicht auf der ganzen Länge. Die Spannungen sind an dem Anschluss an das Deckblech abgelesen.

A.2.6 Netzaufstellung

Im Abaqus ist das Deckblech bei der Modellierung in zwei Bereiche geteilt. Der erste Bereich ist die Außenseite mit einer Elementgröße von 80 mm mit einem gröberen Netz. Beim zweiten Bereich, die Innenseite, ist eine Elementgröße von 20 mm vorgegeben. Für den zweiten Bereich ist ein feineres Netz gewählt, damit man die Spannungen an den Schweißnähten auch auslesen kann. Mit der Funktion "structured" im Programm Abaqus bei der Netzaufstellung versucht man gleichmäßige Elemente zu bekommen. Aufgrund der automatischen Verteilung ist die Elementgröße unterschiedlich. Die Verfeinerungen des Netzes haben auch Einfluss bei der Darstellung der Geometrie des Elementes. In der nachfolgenden Abbildung A-11 ist das generierte Netz-Modell mit den Elementgrößen zu sehen.

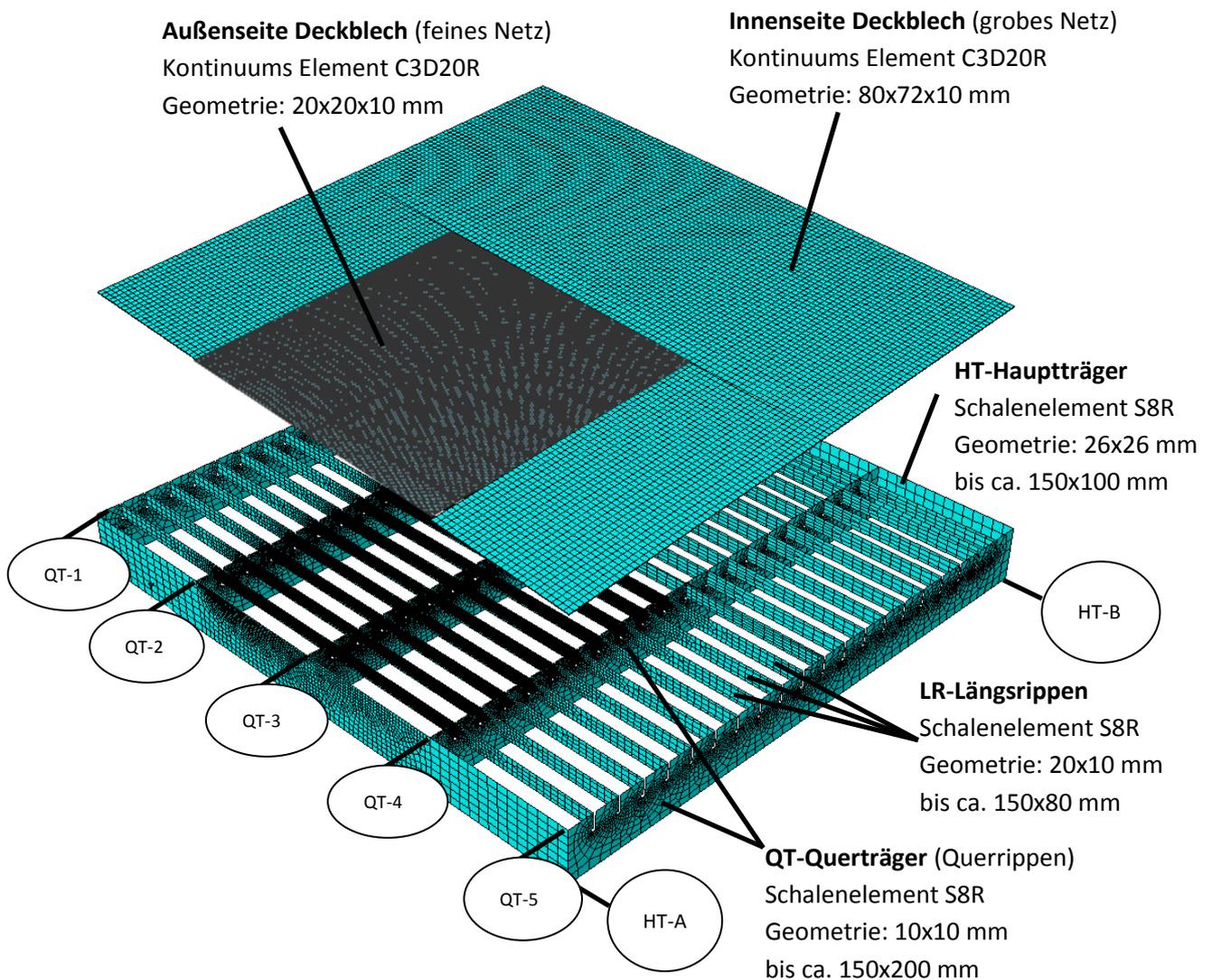


Abbildung A-11:FEM-Modell aus Abaqus mit Netzaufstellung [5]

An der nachfolgenden Abbildung A-12 ist der Schnitt durch QT 3 mit der FE-Netzaufstellung dargestellt.

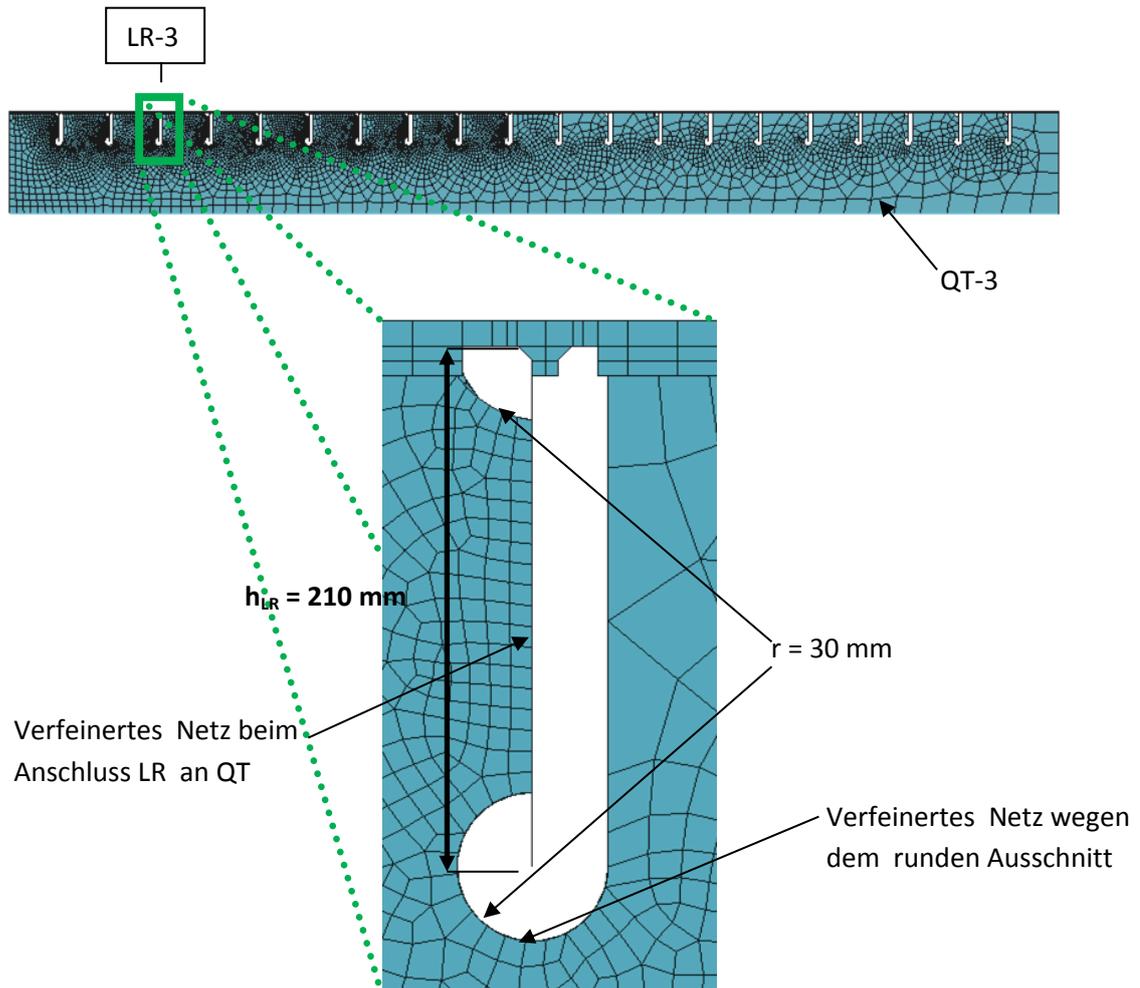


Abbildung A-12: Schnitt 1-1 durch den QT 3 mit der Netzaufstellung

Bei der dritten Längsrippe im Bereich des Querträgers drei sind die Spannungen abgelesen (siehe Kapitel 5). Das Netz wurde manuell an der Innenseite des Deckblechs sowie am Querträger und an den Längsrippen aufgrund der Ablesung der Spannungen verfeinert. An der Abbildung A-12 ist der Anschluss LR-3 an den QT-3 deutlicher ausgesetzt damit die feinere Netzverteilung an der Ausrundung zu sehen ist. Mit so feiner Netzverteilung an der Ausrundung ist es möglich ausgekräftigte Spannungen abzulesen.

A.2.7 Verbindung der Bauteile-Kopplungsbedingungen

Um ein Modell zu generieren, das für die Berechnungen verwendet wird, ist es notwendig Bauteile unter Kopplungsbedingungen zu verbinden. Im Abaqus sind die Kopplungsbedingungen zu beachten damit es möglich ist die Verdrehungen und Verschiebungen der Knoten übertragen zu können. Die Schweißverbindungen die nicht modelliert wurden werden mit der Kopplung auch berücksichtigt. Wie schon in Abschnitt A.2.3 gesagt, sind die Hauptträger, Querträger und Längsrippen als Schalenelemente modelliert und im Abaqus mit dem Befehl "Merge" alle zusammen verbunden. Die Einzelteile sind als ein Teil gebunden und die verschiedenen Bauteile wurden starr miteinander verbunden. Auf die gleiche Art sind die Volumenelemente (Deckblech, Schweißnähte) verbunden. Mit einer starren Verbindung, in Abaqus "Tie" genannt, sind die zwei Deckblechteile verbunden. Mit der Bedingung "Shell-to-solid coupling" ist das Deckblech mit den Rippen verbunden. Die Untergurte wurden mit "Tie" (starre Verbindung) an die passenden Querrippen gebunden.

Eine kurze Darstellung der Bauteile und der verwendeten Methoden für ihre Verbindung ist nachfolgend zu sehen (siehe Tabelle A-1).

1	2	Verbindung
Hauptträger	Querträger, Längsrippe	Merge
Außenseite Deckblech	Schweißnähte	Merge
Innenseite Deckblech	Außenseite Deckblech	Tie
Rippen (HT,QT,LR)	Deckblech	Shell-to-solid coupling
Querträger	QT-Untergurt	Tie

Tabelle A-1: Bauteile mit den Verbindungen

A.2.8 Darstellung der Lagerung

In den nachfolgenden Abbildungen A-13 und A-14 ist sichtbar, dass die Hauptträger gelenkig durch die ganze Länge gelagert sind. Die Modellierung der beiden Hauptträger A und B ist mit gesperrten Freiheitsgraden ($U_x = U_y = U_z = Rot_z = 0$) gemacht.

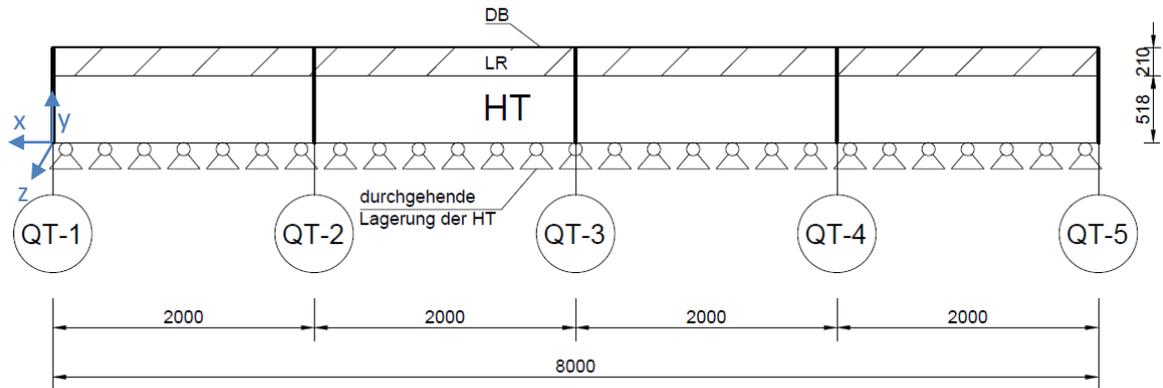


Abbildung A-13: Darstellung der Lagerung von Hauptträgern [5]

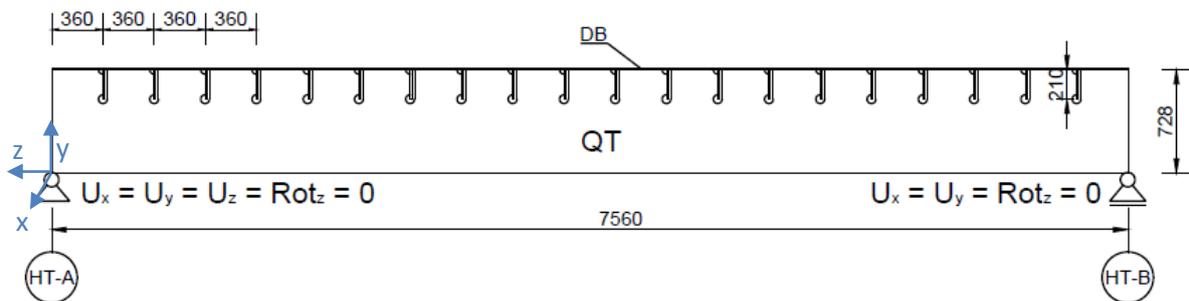


Abbildung A-14: Darstellung der Lagerung von Querträgern [5]

B Literaturverzeichnis

- [1] Unterweger, Harald; Nguyen, Viet Tue; Freytag, Bernhard: Verstärkung orthotroper Stahlfahrbahnplatten mit Hochleistungsbetonen zur Erzielung einer deutlich erhöhten Restlebensdauer, FFG-Forschungsprojekt Nr. 840487. Graz. Technische Universität Graz, 2015.
- [2] Weitz, Fritz R.: Entwurfsgrundlagen und Entscheidungskriterien für Konstruktionssysteme im Großbrückenbau unter besonderer Berücksichtigung der Fertigung. Dissertation. Darmstadt. Technische Hochschule Darmstadt, 1975.
- [3] Ronald Blab: Die Fahrspurverteilung als Einflussgröße bei der Bemessung des Straßenoberbaus. Dissertation. Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung. Technische Universität Wien, 1995.
- [4] Mercedes-Benz, Abtg. (dept.) TE/SOD 70546 Stuttgart
- [5] Ogris A.: "Betriebsfaktoren zur Ermüdungsbeanspruchung von stählernen orthotropen Fahrbahnplatten bei Straßenbrücken" Masterarbeit, TU Graz 2016
- [6] Abaqus/CAE 6.10-1, Softwarepaket, Dassault Systèmes Simulia Corp., 2010.
- [7] ÖNORM EN 1991-2, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke: Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken. Wien. Österreichisches Normungsinstitut, 01.03.2012.
- [8] ÖNORM EN 1993-1-1, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten: Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Wien. Österreichisches Normungsinstitut, 15.10.2014.
- [9] ÖNORM EN 1993-1-9, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten: Teil 1-9: Ermüdung. Wien. Österreichisches Normungsinstitut, 01.04.2013.
- [10] ÖNORM EN 1993-2, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten: Teil 2: Stahlbrücken. Wien. Österreichisches Normungsinstitut, 15.08.2010.
- [11] D. Radaj, C. M. Sonsino, W. Fricke, Fatigue assessment of welded joints by local approaches, Second edition, ISBN: 978-1-85573-948-2, 2006.