



Spureinfluss beim Ermüdungsnachweis von orthotropen Fahrbahnplatten

Masterarbeit

verfasst von

Silke Kern

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, November 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

An dieser Stelle möchte ich Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Unterweger für das interessante Thema meiner Masterarbeit und die Bereitstellung eines Arbeitsplatzes danken. Insbesondere möchte ich mich bei Herrn Univ. Ass. Dipl.-Ing. Friedrich Novak für die hervorragende Betreuung bedanken.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Studienkolleginnen und -kollegen für die vielen schönen Momente bedanken. Besonders möchte ich mich bei Tanja und Andi bedanken, die mich ab den ersten Tag auf der Uni in ihren Freundeskreis aufnahmen und mich in schweren Stunden aufmunterten und unterstützten.

Der größte Dank gilt jedoch meinen Eltern, die es mir überhaupt erst ermöglichten zu studieren.

Kurzfassung

Orthotrope Platten wurden bei Straßenbrücken vor allem in den 1960er und 1970er Jahren als Fahrbahnplatten gebaut, um Gesamtgewicht einzusparen. Damals wurden die statischen Berechnungen jedoch nur für den Tragsicherheitsnachweis durchgeführt, das Ermüdungsverhalten wurde nicht näher betrachtet. Dies hat aus heutiger Sicht zur Folge, dass immer mehr Schäden durch Ermüdung auftreten. Daraus folgt die Notwendigkeit einer Beurteilung der Restlebensdauer bei Bestandsbrücken. Für die Berechnung der Lebensdauer sind im Eurocode Ermüdungslastmodelle angegeben. Diese haben allerdings den Nachteil, dass sie zwei Aspekte nicht realitätsnah beschreiben: die Achsgeometrie der „Normenfahrzeuge“ weicht von Schwerlastfahrzeugen in der Realität ab. Des Weiteren wird eine allzeit zentrische Spurlage aller Fahrzeuge innerhalb des Fahrstreifens angenommen, diese ist jedoch aufgrund des individuellen Fahrverhaltens der Schwerfahrzeuglenker nicht gegeben.

Da das Ermüdungsverhalten durch die lokalen Betriebsbeanspruchungen der maßgebenden Kerbdetails beeinflusst wird, wurde der Einfluss von realitätsnaher Achsgeometrie und des Fahrspurverhaltens an zwei maßgebenden Detailpunkten genauer untersucht. In dieser Masterarbeit wurden zwei repräsentative orthotrope Platten mit trapezförmigen Längsrippen und unterschiedlichen Querträgerabständen näher analysiert. Beide Geometrien wurden als Finite-Elemente-Modelle abgebildet und anschließend wurde mit dem zutreffenden Ermüdungslastmodell der Norm die Ermüdungsbeanspruchung der untersuchten Details ermittelt. Zusätzlich wurde, mit Hilfe von vorweg ermittelten Querverteilungseinflusslinien, diese Ermüdungsbeanspruchung unter Berücksichtigung realitätsnaher Achsgeometrien der Schwerfahrzeuge, sowie einer Häufigkeitsverteilung des Spurverhaltens in Brückenquerrichtung, modifiziert. Abschließend folgte eine Gegenüberstellung der schadensäquivalenten Einstufenkollektive, wobei günstige, als auch ungünstige Effekte aufgezeigt werden konnten.

Abstract

In the 1960s and 1970s road bridges with orthotropic steel decks were built for weight saving reasons. At that time static analysis was just done for structural safety. Fatigue behaviour was often neglected in design. Nowadays more and more damage caused by fatigue behaviour appears. The consequences are the need of calculating the remaining service life for existing bridges. The Eurocode provides fatigue load models for the calculation of service life. This load models assume that all vehicles pass bridges always in the centre of each lane, due to individual driving behaviours this aspect is not realistic. Another issue that is not pictured close to reality is the axle geometry of heavy-duty vehicles. Fatigue behaviour is affected by local stresses at the relevant notch-details. This is why the influence of realistic axle geometry and the lateral shift of the vehicles in the lanes is analysed in two decisive details. In this master thesis two representative bridge decks were modelled with trapezoidal longitudinal ribs and different cross girder distances. The geometries were designed as Finite-Element-Models. Afterwards fatigue behaviour was analysed with Eurocode's load models. Fatigue stress spectra were calculated with load influence lines, considering axle geometry and frequency distribution of the lane position in cross direction of the bridge. Finally, the damage equivalent stress ranges were compared with and without lane variation and real axle geometry, whereby both advantageous and disadvantageous impacts could be shown.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
1.1	BAUWEISE VON STÄHLERNEN ORTHOTROPEN PLATTEN	1
1.2	PROBLEMSTELLUNG BEI ÄLTEREN BESTANDSBRÜCKEN.....	2
2	MOTIVATION UND ZIELE DER ARBEIT	4
3	STAND DER TECHNIK	6
3.1	ZUTREFFENDES ERMÜDUNGSLASTMODELL	6
3.2	FÜHRUNG DES ERMÜDUNGSNACHWEISES	8
3.3	ANWENDUNG DES STRUKTURSPANNUNGSKONZEPTES	12
3.4	REALE ACHSGEOMETRIE	13
3.5	HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER ÜBERFAHRTEN	14
3.5.1	<i>Häufigkeitsverteilung nach Blab.....</i>	<i>15</i>
3.5.2	<i>Häufigkeitsverteilung nach EN 1991-2</i>	<i>20</i>
4	UNTERSUCHTE ORTHOTROPE PLATTEN – SYSTEMBESCHREIBUNG	21
4.1	UNTERSUCHTES KONSTRUKTIONSDetail D1.....	23
4.2	UNTERSUCHTES KONSTRUKTIONSDetail D2.....	24
4.3	MODELL 1: QUERRIPPENABSTAND $E_{QT} = 2 \text{ M}$	25
4.4	MODELL 2: QUERRIPPENABSTAND $E_{QT} = 4 \text{ M}$	26
5	KONZEPT DER ARBEIT	28
5.1	SCHRITT 1	28
5.2	SCHRITT 2	31
5.3	SCHRITT 3	32
5.4	SCHRITT 4	33
5.5	SCHRITT 5	35
5.6	SONDERFALL Detail 1B – ALTERNATIVE VORGEHENSWEISE.....	36
6	DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE.....	42
6.1	ERGEBNISSE FÜR MODELL 1 – QUERTRÄGERABSTAND $E_{QT} = 2\text{M}$	42
6.2	ERGEBNISSE FÜR MODELL 2 – QUERTRÄGERABSTAND $E_{QT} = 4\text{M}$	43
6.3	RESÜMEE	44
7	LITERATURVERZEICHNIS	45
ANHANG A.....		1
A	MODELL 1: ORTHOTROPE PLATTE – QUERTRÄGERABSTAND $E_{QT}=2\text{M}$	1
A.1	GEOMETRIE	1
A.2	FINITE-ELEMENTE-MODELLIERUNG	3
A.2.1	<i>Materialeigenschaften.....</i>	<i>3</i>
A.2.2	<i>Bauteileigenschaften - Variante A.....</i>	<i>3</i>
A.2.3	<i>Netzgenerierung – Variante A</i>	<i>6</i>
A.2.4	<i>Bauteilkopplungen – Variante A.....</i>	<i>8</i>
A.2.5	<i>Variante B.....</i>	<i>9</i>

A.3	EINFLUSSLINIEN	10
A.3.1	Detail D1a – Einflusslinie in Brückenlängsrichtung	10
A.3.1	Detail D1a – Einflusslinie in Brückenquerrichtung	12
A.3.2	Detail D1b – Einflusslinie in Brückenlängsrichtung	13
A.3.3	Detail D1b – Einflusslinie in Brückenquerrichtung	15
A.3.4	Detail 2 – Einflusslinie in Brückenlängsrichtung	17
A.3.5	Detail 2 – Einflusslinie in Brückenquerrichtung	18
A.4	SPANNUNGSVERLÄUFE UND LASTSPIELE	20
A.4.1	Detail D1a	20
A.4.2	Detail D1b	25
A.4.3	Detail 2	30
A.5	LASTKOLLEKTIVE	35
A.5.1	Detail 1a	35
A.5.2	Detail 1b	43
A.5.3	Detail 2	55
ANHANG B	1
B	MODELL 2: ORTHOTROPE PLATTE – QUERTRÄGERABSTAND $E_{QT}=4M$	1
B.1	GEOMETRIE	1
B.2	FINITE-ELEMENTE-MODELLIERUNG	3
B.2.1	Materialeigenschaften	3
B.2.2	Bauteileigenschaften – Variante A	3
B.2.3	Netzgenerierung – Variante A	7
B.2.4	Bauteilkopplungen – Variante A	8
B.2.5	Variante B	9
B.3	EINFLUSSLINIEN	10
B.3.1	Detail D1a – Einflusslinie in Brückenlängsrichtung	10
B.3.2	Detail D1a – Einflusslinie in Brückenquerrichtung	12
B.3.3	Detail D1b – Einflusslinie in Brückenlängsrichtung	14
B.3.4	Detail D1b – Einflusslinie in Brückenquerrichtung	16
B.3.5	Detail D2 – Einflusslinie in Brückenlängsrichtung	18
B.3.6	Detail D2 – Einflusslinie in Brückenquerrichtung	20
B.4	SPANNUNGSVERLÄUFE UND LASTSPIELE	22
B.4.1	Detail D1a	22
B.4.2	Detail D1b	27
B.4.3	Detail 2	32
B.5	LASTKOLLEKTIVE	37
B.5.1	Detail 1a	37
B.5.2	Detail 1b	43
B.5.3	Detail 2	48

1 Einleitung

1.1 Bauweise von stählernen orthotropen Platten

Als orthotrope Platten werden Fahrbahnplatten bezeichnet, die aus einem Fahrbahnblech und daran angeschweißten Längsrippen und Querrippen bzw. -trägern bestehen. Der Name „orthotrop“ ist eine Wortkombination aus orthogonal (senkrecht, rechtwinkelig) und anisotrop (richtungsabhängig). Dies weist auf die unterschiedliche Tragwirkung in Längs- und Querrichtung bei lokaler Biegebeanspruchung infolge vertikaler Verkehrslasten hin. Die Vorteile dieser Bauweise sind vor allem die Gewichts- und Materialeinsparung bei den Hauptträgern, was zur Möglichkeit von großen Spannweiten führt. Im Laufe der Jahre haben sich die Formen der Längsrippen weiterentwickelt. Auf Abbildung 1 ist eine Auswahl an Längsrippentypen zu sehen. Im Zuge dieser Masterarbeit wird nur der heutige Standard, also trapezförmige Rippen, betrachtet.

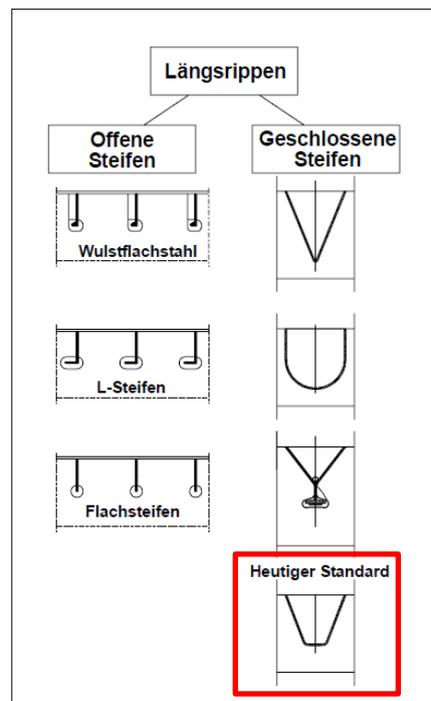


Abbildung 1: Typen von Längsrippen, aus [1]

Abbildung 2 zeigt die schematische Darstellung eines Ausschnittes einer orthotropen Platte und deren Bestandteile.

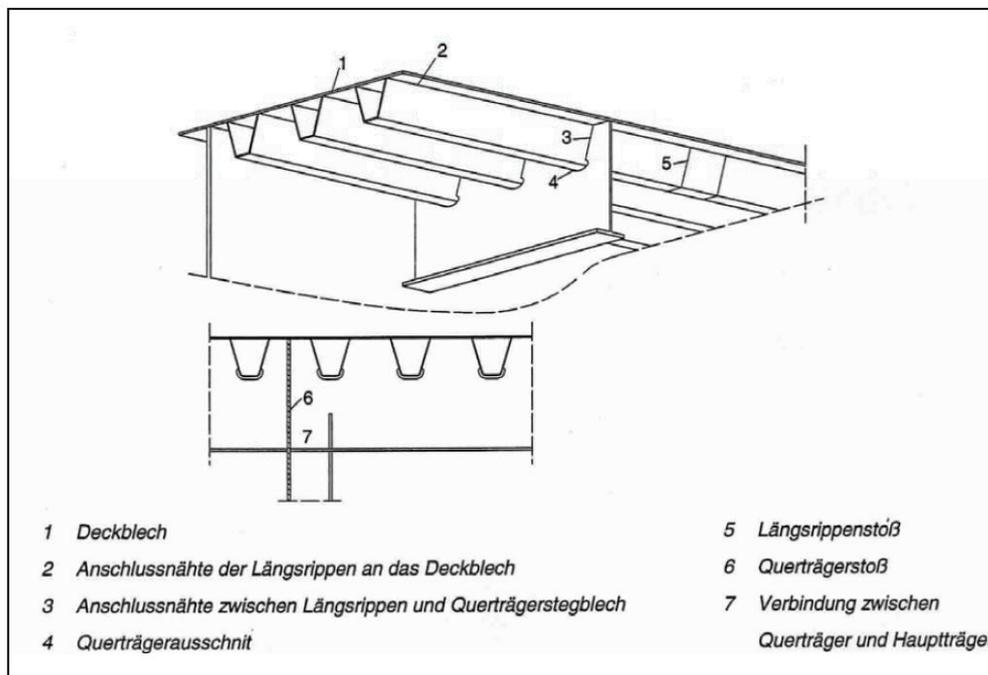


Abbildung 2: Bestandteile von orthotropen Platten, aus [1]

1.2 Problemstellung bei älteren Bestandsbrücken

Vor allem in den 1960er und 1970er Jahren wurden Fahrbahnen von Brückentragwerken besonders häufig als orthotrope Platten ausgeführt [2]. Damals wurden die Brücken nur auf ihre statische Tragfähigkeit berechnet. Das Ermüdungsverhalten des Stahls wurde bei Straßenbrücken rechnerisch noch nicht berücksichtigt. Dies hatte zur Folge, dass bei einigen Brücken beispielweise Ermüdungsrisse an den Schweißnähten der Längsrippen am Fahrbahnblech und am Anschlussdetail der Längsrippe zur Querrippe festgestellt wurden.

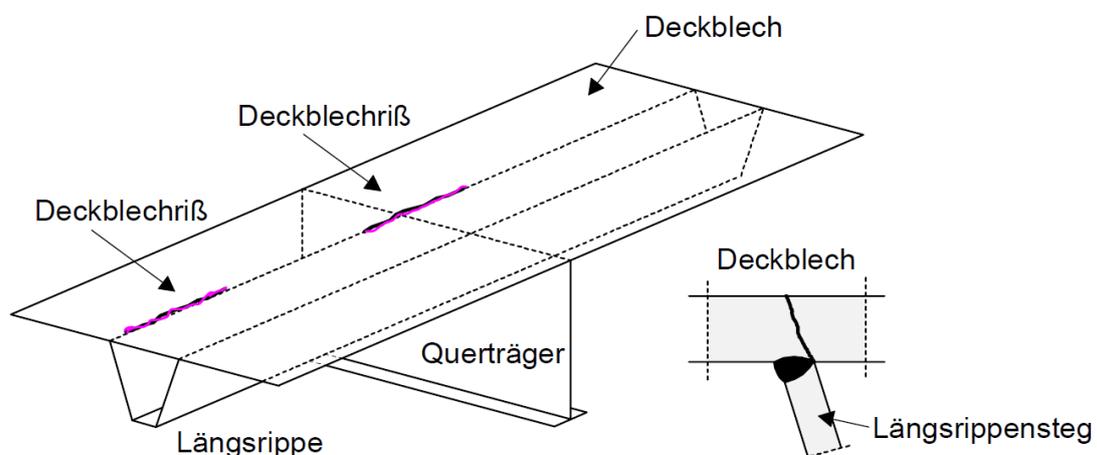


Abbildung 3: Beispiel für Ermüdungsrisse an Bestandstragwerken – Anschlussbereich der Längsrippe zum Deckblech, aus [13]

Abbildung 4 zeigt einen Ermüdungsriss im Deckblech, an der Anschlussschweißnaht des Längsrippensteiges, wobei die Rissinitiation an der Deckblechunterseite zufolge der Querbiegespannungen im Deckblech stattfand. Unter weiterer Betriebsbeanspruchung erfolgte ein stabiles Risswachstum über die gesamte Deckblechdicke, bis das Blech entlang einer Länge von ca. 65 cm vollständig durchgerissen war, wie in der Abbildung ersichtlich.

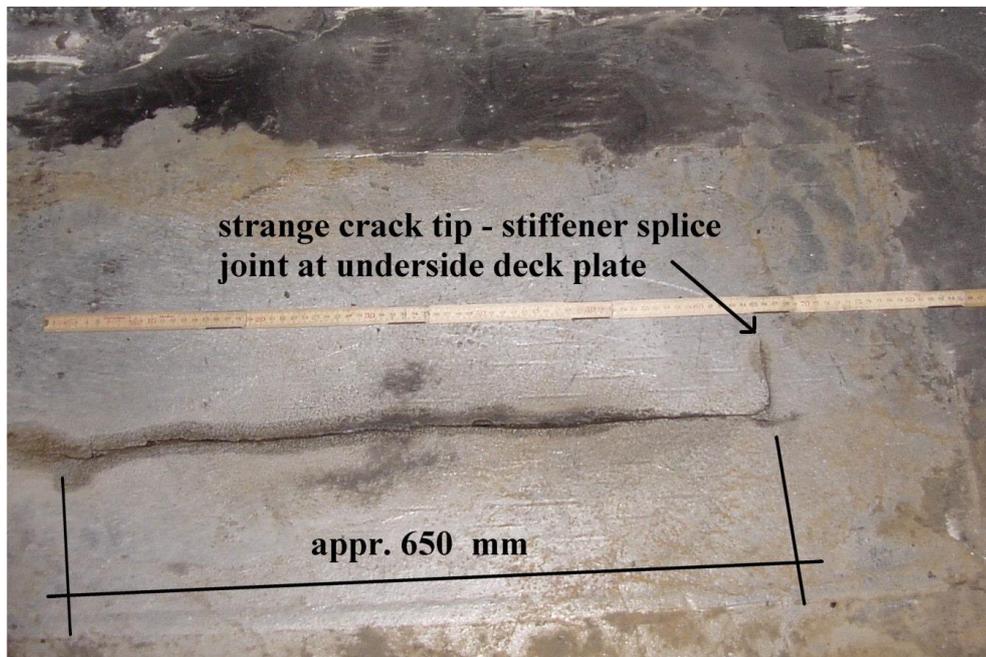


Abbildung 4: Draufsicht der Ermüdungsrisse an der Schweißnaht von Längsrippe und Deckblech, aus [13]

Auf Abbildung 5 ist das Anschlussdetail zwischen Längsrippe und Querträger dargestellt. Hier sind Ermüdungsrisse, ausgehend von der Schweißnaht an der Längsrippe, zu sehen.

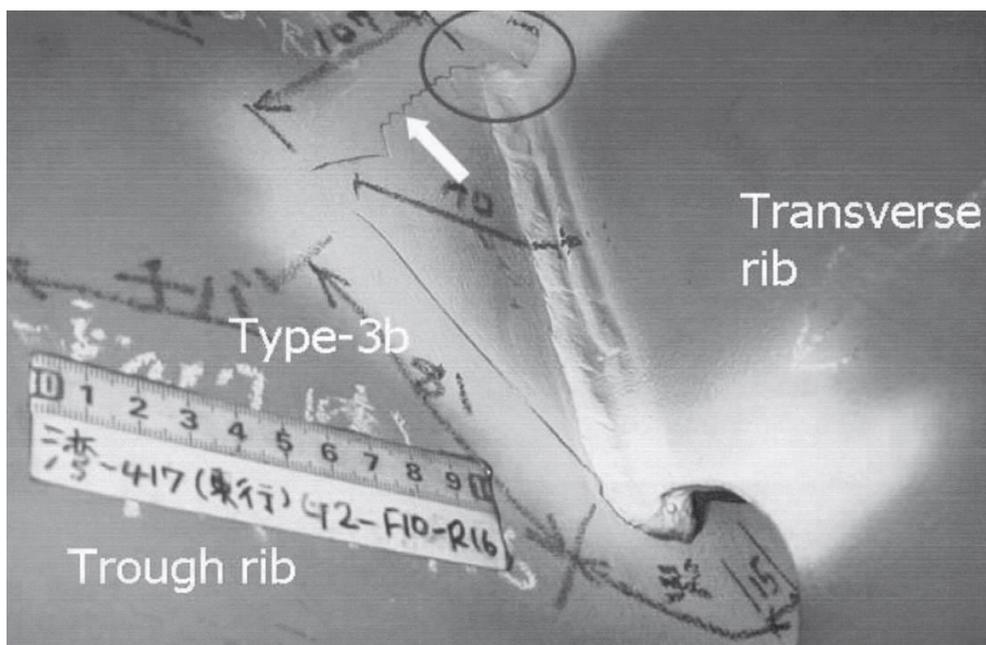


Abbildung 5: Ermüdungsrisse ausgehend von der Schweißnaht beim Anschlussdetail von Längsrippe zur Querrippe, aus [14]

2 Motivation und Ziele der Arbeit

Ermüdungsrisse werden vor allem durch lokale Spannungsspitzen an Kerbstellen hervorgerufen. Das heißt, dass, insbesondere bei Konstruktionsdetails der Fahrbahn, Laststellung und Lastfläche von großer Bedeutung für die lokalen Spannungen sind. Dies führt auch zu einer Konzentration von Schäden im Radlastbereich der Schwerverkehrsspur. In Abbildung 6 ist ein Querschnitt eines Brückendecks dargestellt, rot markiert wurden die Bereiche der Rissbildung.

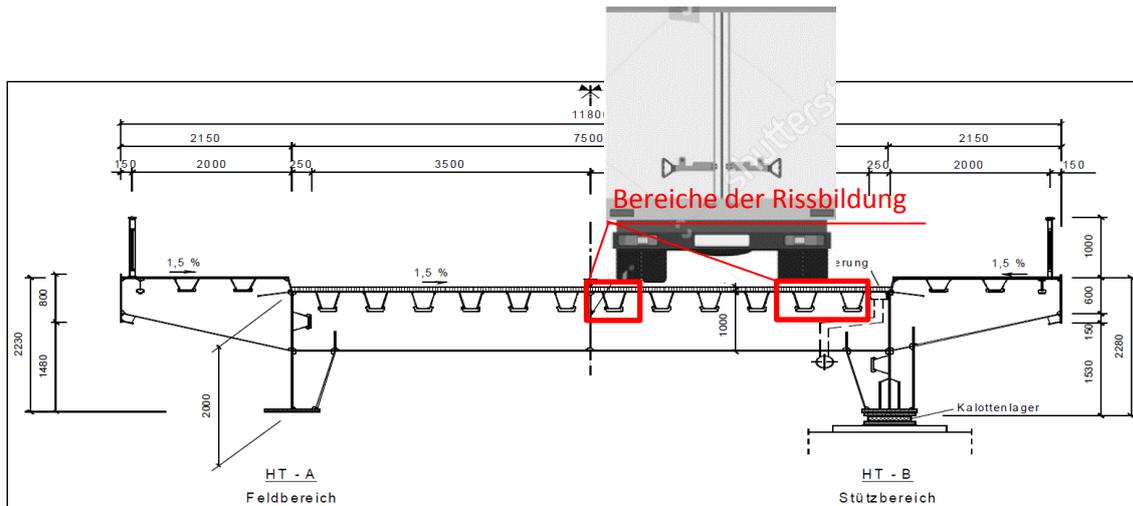


Abbildung 6: Bereiche der Ermüdungsrissbildung an einer Bestandsbrücke, aus [1]

Wie in Abbildung 6 ersichtlich, treten Ermüdungsrisse sehr lokal, im Bereich der Lastangriffsfläche der Räder von Schwerfahrzeugen auf. Diese Beobachtung erfordert eine möglichst realitätsnahe Modellierung des Brückendecks, sowie der zutreffenden Achslasten und -geometrien. Aus diesem Grund sind folgende zwei Aspekte zu berücksichtigen, um die Spannungsspitzen an den Kerbstellen möglichst realitätsnah ermitteln zu können:

- **Die reale Achsgeometrie**

In EN 1991-2, Tabelle 4.8 sind, für das vereinfachte Ermüdungslastmodell ELM4 für Straßenbrücken, die geometrischen Abmessungen der Achsen und deren Radaufstandsfläche für 5 Typen von Schwerlastfahrzeugen angegeben. Es werden 3 Achstypen (A,B,C) angeführt, wobei A und C einzelbereifte und Achstyp B zwillingsbereifte Achsen sind.

Laut Norm haben alle Achsen denselben Radabstand, bezogen auf die Flächenschwerpunkte der Radaufstandsflächen (siehe Abbildung 7, links). Diese rein zentrische Lage führt zur maximalen Beanspruchung des Deckblechs am Brückendeck. Beobachtungen und Messungen an aktuellen Schwerlastfahrzeugen zeigten, dass diese vereinfachte Modellbildung keine realitätsgetreue Abbildung darstellt. In Abbildung 7 werden die Resultierenden der Achslasten dargestellt. Links wie in der Norm beschrieben, rechts die reale Achsstellung mit außen bündiger Lage der Reifen. Durch die Verschiebung der Resultierenden der Zwillingsreifen um 16 cm, kommt es zu einem in der Regel positiven Effekt bei Betrachtung der Deckblechbeanspruchungen.

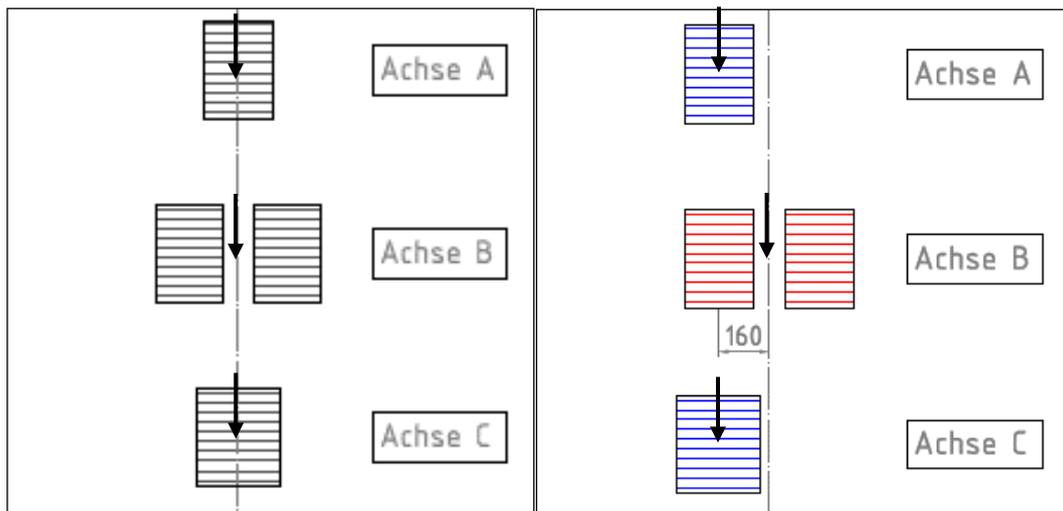


Abbildung 7: Vergleich der verschiedenen Radlaststellungen, links alle Resultierenden treten mittig auf (EN 1991-2), rechts real mit einer Einrückung der Achse B um etwa 16 cm

- **Häufigkeitsverteilung der Überfahrten**

Das Fahrverhalten innerhalb eines Fahrstreifens ist individuell, weshalb die Überfahrten der Fahrzeuge in Brückenquerrichtung variieren. Dieser Effekt kann durch die Berücksichtigung einer Häufigkeitsverteilung in Brückenquerrichtung erfasst werden. Diese Verteilung wurde beispielweise von Ronald Blab in seiner Dissertation [8] untersucht. Abbildung 8 wurde aus dieser Dissertation entnommen und zeigt beispielhaft eine solche Häufigkeitsverteilung am Fahrstreifen.

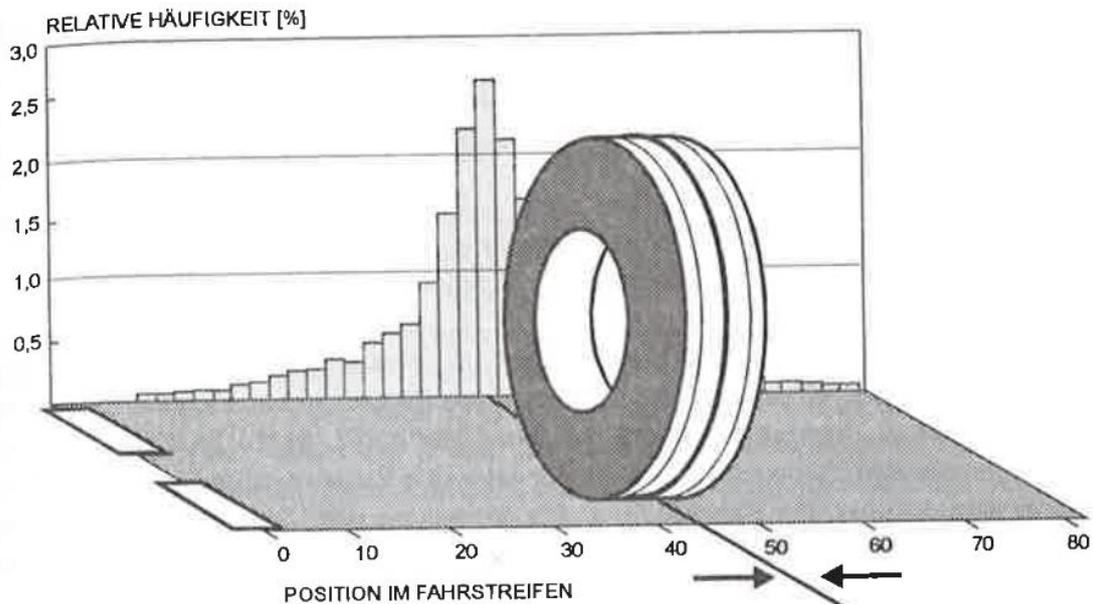


Abbildung 8: Häufigkeitsverteilung der Fahrspurlage, aus [8]

Ziel dieser Arbeit war es, diese beiden Aspekte (tatsächliche Achsgeometrie nach Abbildung 7, Variation der Fahrspurlage nach Abbildung 8) bei der Ermittlung der Betriebsbeanspruchung, an zwei wesentlichen Kerbdetails zu berücksichtigen, um die Auswirkungen dessen quantifizieren zu können.

3 Stand der Technik

Für die Ermittlung der Ermüdungsbeanspruchung bei stählernen Brücken ist diverses Normenwerk notwendig. Auf den folgenden Seiten werden die wichtigsten Details aus den Normen zusammengefasst, um einen Überblick über den Stand der Technik zu geben.

3.1 Zutreffendes Ermüdungslastmodell

Zur Ermüdungsbemessung von Brücken gibt es in der EN 1991-2 [4] fünf Lastmodelle, die sich anhand der Abmessungen der Ersatzfahrzeuge, der Achslasten und der Verkehrszusammensetzung unterscheiden. Aufgrund der genauen Verkehrszusammensetzung der Ersatzfahrzeuge wurde **Ermüdungslastmodell 4 (ELM 4)** gewählt.

Anmerkung: Die Ermüdungslastmodelle 1, 2 und 3 sind nicht für die Ermittlung der Kerbspannungen der untersuchten Details geeignet. Ermüdungslastmodell 5 wäre eine Modifikation von ELM4, auf Basis von in Situ aufgenommenen Verkehrsdaten.

In Tabelle 1 ist das untersuchte Ermüdungslastmodell ELM4 dargestellt, mit der Verkehrsmischung „Große Entfernung“, welche den Aufteilungsschlüssel für den Schwerverkehrsanteil der einzelnen Fahrzeugtypen anzeigt. Diese Tabellenwerte wurden aus der Tabelle 4.7 der EN 1991-2 [4] entnommen. Hier ist zu sehen, dass das ELM4 drei verschiedene Reifenarten A, B, C, später auch als Achsart bezeichnet, vorgibt.

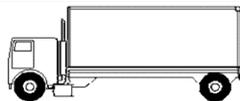
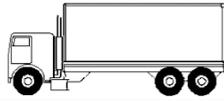
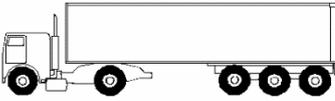
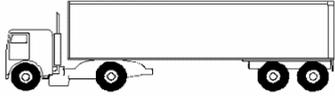
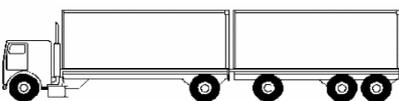
	Schwerfahrzeug	Achsabstand [m]	Reifenart	Ersatzachslast [kN]	Schwerverkehrsanteil [-]
T1		4,5	A B	70 130	20,0
T2		4,2 1,3	A B B	70 120 120	5,0
T3		3,2 5,2 1,3 1,3	A B C C C	70 150 90 90 90	50,0
T4		3,4 6,0 1,8	A B B B	70 140 90 90	15,0
T5		4,8 3,6 4,4 1,3	A B C C C	70 130 90 80 80	10,0

Tabelle 1: Fahrzeugtypen und -häufigkeiten für Ermüdungslastmodell ELM4, nach „Große Entfernung“ (EN 1991-2, Tabelle 4.7 [4])

In Tabelle 2 sind die geometrischen Achsabstände und Radaufstandsflächen der drei verschiedenen Achstypen ersichtlich. Diese sind ebenfalls dem Ermüdungslastmodell 4 entnommen.

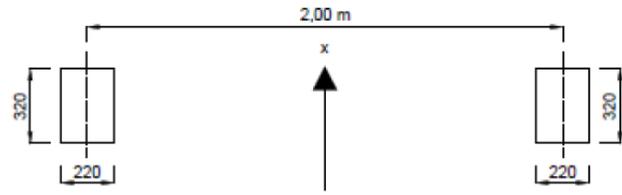
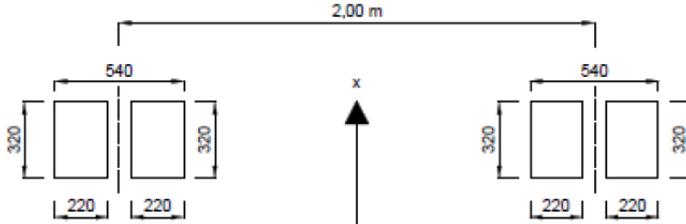
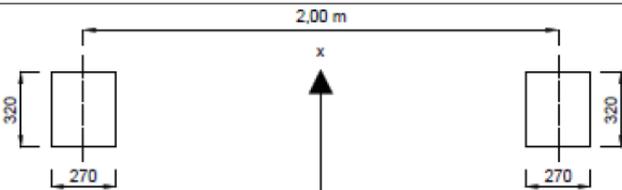
Definition der Reifenarten/Achsabstände	
Reifen/Achsart	Geometrische Abmessungen
A	
B	
C	

Tabelle 2: Achsabstände und –maße, laut EN 1991-2, Tabelle 4-8 [4]

Zur Berücksichtigung der Mitwirkung des Asphaltbelages bei der Spannungsberechnung im Fahrbahndeck, wurde eine Lastausbreitung von 45 Grad über die Höhe des Belages ($t_{\text{Belag}} = 7 \text{ cm}$) angesetzt. Dies führt zu einer vergrößerten Lastaufstandsfläche und einer reduzierten Flächenpressung auf dem Stahldeckblech. Diese Vorgehensweise wurde durch numerische Berechnungen erarbeitet und bildet das Verhalten an heißen Sommertagen ab [16]. Der Effekt der Lastausbreitung ist auch in der EN 1991-2, Bild 4.5 und in Abbildung 9 beschrieben. Die dadurch vergrößerten Lastflächen sind in Abbildung 10 dargestellt. Der Asphaltbelag selbst wurde nicht modelliert.

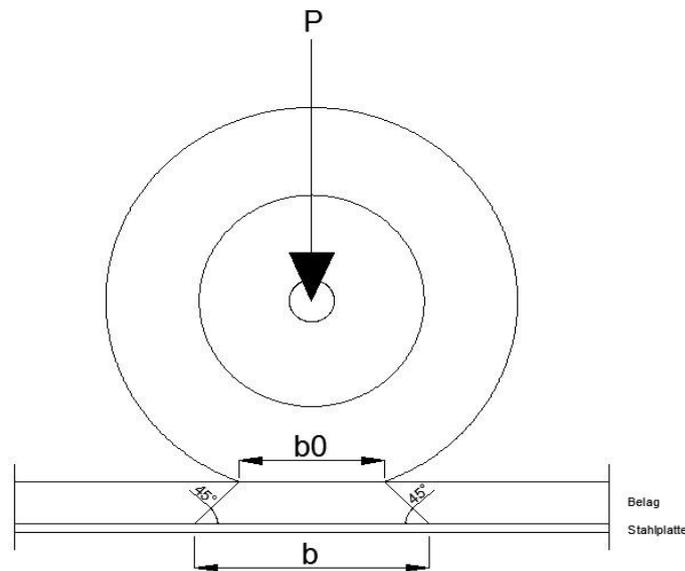
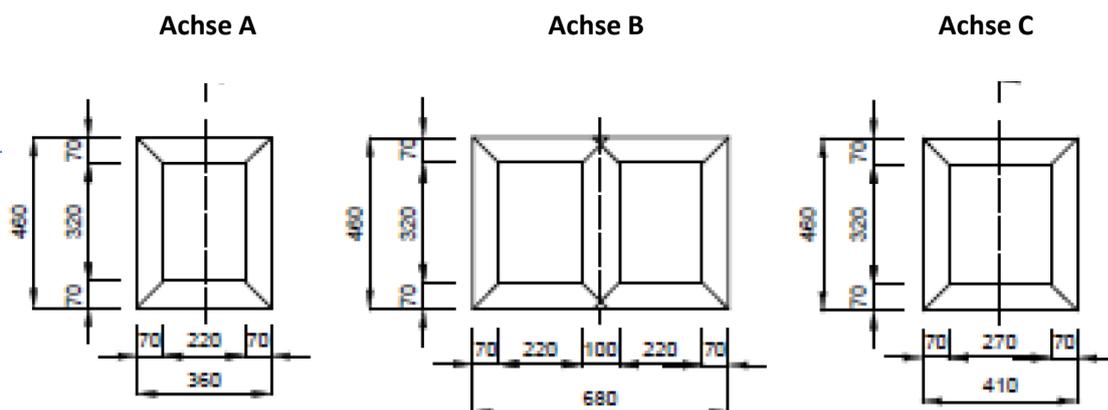


Abbildung 9: Vereinfachte Lastausbreitung zur Erfassung der Asphaltmitwirkung

Abbildung 10: Vergrößerte Lastflächen für $t_{\text{Belag}} = 7 \text{ cm}$

3.2 Führung des Ermüdungsnachweises

Der Ermüdungsnachweis wird in der EN 1993-1-9 [6], EN 1991-2 [4] und EN 1993-2 [7] geregelt. Es ist eine Überfahrt der Fahrzeuge von ELM4 zu simulieren, wodurch im jeweiligen Kerbdetail Spannungsspiele entstehen. Die Überfahrt jedes Fahrzeugs ist isoliert durchzuführen. Diese Spannungsspiele, auch Spannungsschwingspiele genannt, werden anhand von Spannungs-Zeitverlaufdiagrammen für die einzelnen Überfahrten ermittelt. Spannungsspiele werden entweder durch die Reservoir- oder die Rainflow-Methode (Abbildung 11) ausgezählt und zu Spannungs- bzw. Lastkollektiven (Abbildung 12) summiert. Bei Lastkollektiven werden die Spannungsspiele in absteigender Reihenfolge dargestellt.

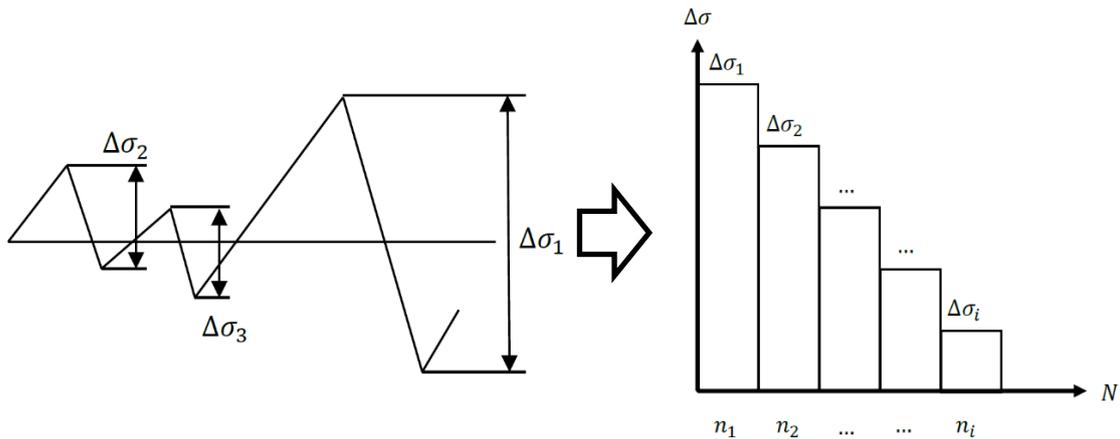


Abbildung 11: Auszählen von Spannungsspielen mit der Reservoir-Methode

Abbildung 12: Beispiel eines Spannungskollektives

Für den Ermüdungsnachweis eines bestimmten Kerbdetails erfolgt die Zuweisung zur zutreffenden Festigkeits-Wöhlerlinie in EN 1993-1-9 [6]. Als Wöhlerlinie bezeichnet man die quantitative Beziehung zwischen den Spannungsschwingbreiten ($\Delta\sigma_i$), eines Einstufenkollektives $\Delta\sigma_e$ und der Anzahl der zugehörigen Spannungsspiele (n_i), die zum Versagen durch Ermüdung führen.

In der Norm ist die Wöhlerlinie bei doppelt logarithmischer Achsskalierung eine Gerade, die an zwei Stellen einen Knickpunkt aufweist, wo sich die Steigung der Geraden ändert. $\Delta\sigma_c$ beschreibt den Kerbfall als Ermüdungsfestigkeit bei $2 \cdot 10^6$ Spannungsschwingspielen. $\Delta\sigma_D$ ist der Wert der Dauerfestigkeit bei $5 \cdot 10^6$ Spannungsschwingspielen und $\Delta\sigma_L$ ist der Schwellwert der Ermüdungsfestigkeit bei $1 \cdot 10^8$ Spannungsschwingspielen. In Abbildung 13 ist ein Beispiel eines Lastkollektives mit zugehöriger Wöhlerlinie dargestellt.

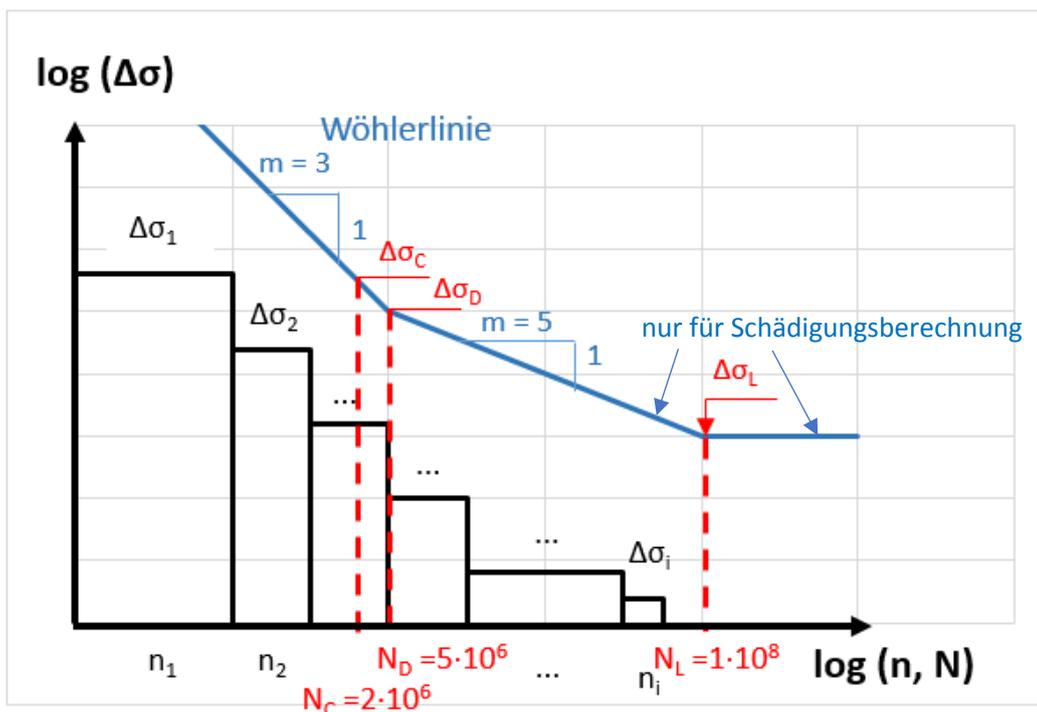


Abbildung 13: Spannungskollektiv mit Wöhlerlinie

Um die Schädigung eines Last- bzw. Spannungskollektives festzustellen, wird das Kollektiv in ein schadensäquivalentes Einstufenkollektiv $\Delta\sigma_e$ umgerechnet, das zur gleichen Lebensdauer führt wie die tatsächlichen Belastungszyklen. Dies geschieht anhand der linearen Schadensakkumulation nach Miner-Palmgren, entsprechend Gleichung {1}

$$\Delta\sigma_e = \sqrt[3]{\left(\sum_{\Delta\sigma_i > \Delta\sigma_D} \Delta\sigma_i^3 \cdot n_i + \frac{1}{\Delta\sigma_D^2} \sum_{\Delta\sigma_D > \Delta\sigma_i > \Delta\sigma_L} \Delta\sigma_j^5 \cdot n_j\right) \cdot \frac{1}{n_{LKW}}} \quad \{1\}$$

- mit $\Delta\sigma_e$ Einstufenkollektiv
- $\Delta\sigma_D$ Dauerfestigkeit bei $N_D = 5 \cdot 10^6$ Schwingspielen
- $\Delta\sigma_L$ Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit bei $N_L = 1 \cdot 10^8$ Schwingspielen
- n_i Anzahl der einwirkenden Spannungsschwingspiele für $\Delta\sigma_i > \Delta\sigma_D$
- n_j Anzahl der einwirkenden Spannungsschwingspiele, wobei gilt $\Delta\sigma_D > \Delta\sigma_j > \Delta\sigma_L$
- n_{LKW} Anzahl der bezogenen Lastwechsel des Einstufenkollektives

Für diese Masterarbeit werden schadensäquivalente Einstufenkollektive für die Überfahrt von jeweils $n_{LKW} = 100$ gebildet. Daraus folgt aus oben beschriebener Formel:

$$\Delta\sigma_e = \sqrt[3]{\left(\sum_{\Delta\sigma_i > \Delta\sigma_D} \Delta\sigma_i^3 \cdot n_i + \frac{1}{\Delta\sigma_D^2} \sum_{\Delta\sigma_D > \Delta\sigma_i > \Delta\sigma_L} \Delta\sigma_j^5 \cdot n_j\right) \cdot \frac{1}{100}} \quad \{2\}$$

Abbildung 14 zeigt das gebildete Einstufenkollektiv.

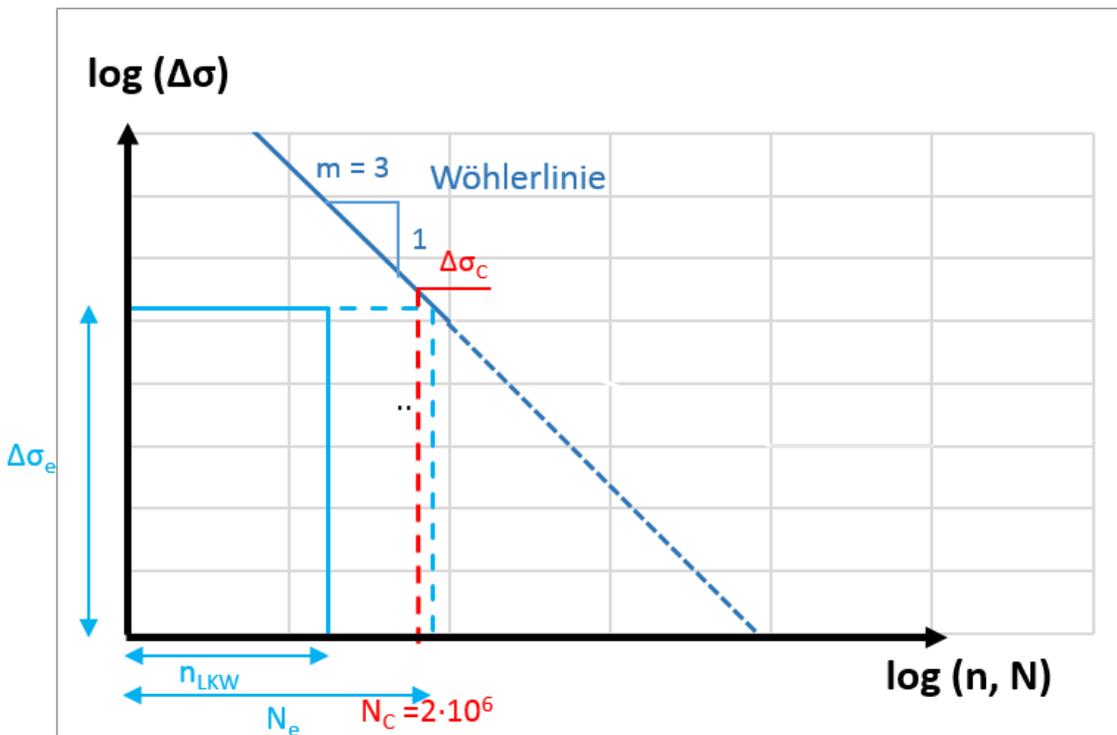


Abbildung 14: Schadensäquivalentes Einstufenkollektiv $\Delta\sigma_e$ mit Wöhlerlinie

Der Ermüdungsnachweis wird anhand folgender Formel geführt:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{e,2} \leq \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}} \quad \{3\}$$

- mit γ_{Ff} γ -Faktor (1,0 wird empfohlen) für die schadensäquivalente Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_e$
 γ_{Mf} γ -Faktor für die Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c$ (üblicherweise $\gamma_{Mf}=1,15$, da Details regelmäßig inspiziert werden)
 $\Delta\sigma_{e,2}$ Schadensäquivalente konstante Spannungsschwingbreite bezogen auf $2 \cdot 10^6$ Schwingspiele
 $\Delta\sigma_c$ Bezugswert für die Ermüdungsfestigkeit bei $N_c = 2 \cdot 10^6$ Schwingspielen

Hierfür ist noch die Umrechnung der schädigungsäquivalenten Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_e$ von der Bezugsgröße n_{LKW} auf $N_e = 2 \cdot 10^6$ Lastwechsel, für einen Bezugszeitraum von 100 Jahren, erforderlich (vgl. Abbildung 15). Mit den Vorgaben in EN 1993-2 ergibt sich bei alleiniger Ermüdungsbeanspruchung auf der Hauptspur ($\lambda_4 = 1,0$) und der Simulationsberechnung für $n_{LKW} = 100$ Fahrzeuge:

$$\Delta\sigma_{e,2} = \Delta\sigma_e \cdot \left(\frac{n_{ges}}{2 \cdot 10^6}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \{4\}$$

$$n_{ges} = 100 \cdot f_{Anzahl} \quad \{5\}$$

$$f_{Anzahl} = \frac{N_{Obs} \cdot 100}{100} \quad \{6\}$$

- mit $\Delta\sigma_{e,2}$ Einstufenkollektiv mit $N_c = 2 \cdot 10^6$ Lastwechsel (Schwingspiele)
 n_{ges} Gesamtanzahl an Schwerfahrzeugen in der Hauptspur innerhalb von 100 Jahren
 N_{obs} Jährliche Schwerfahrzeuganzahl in der Hauptspur

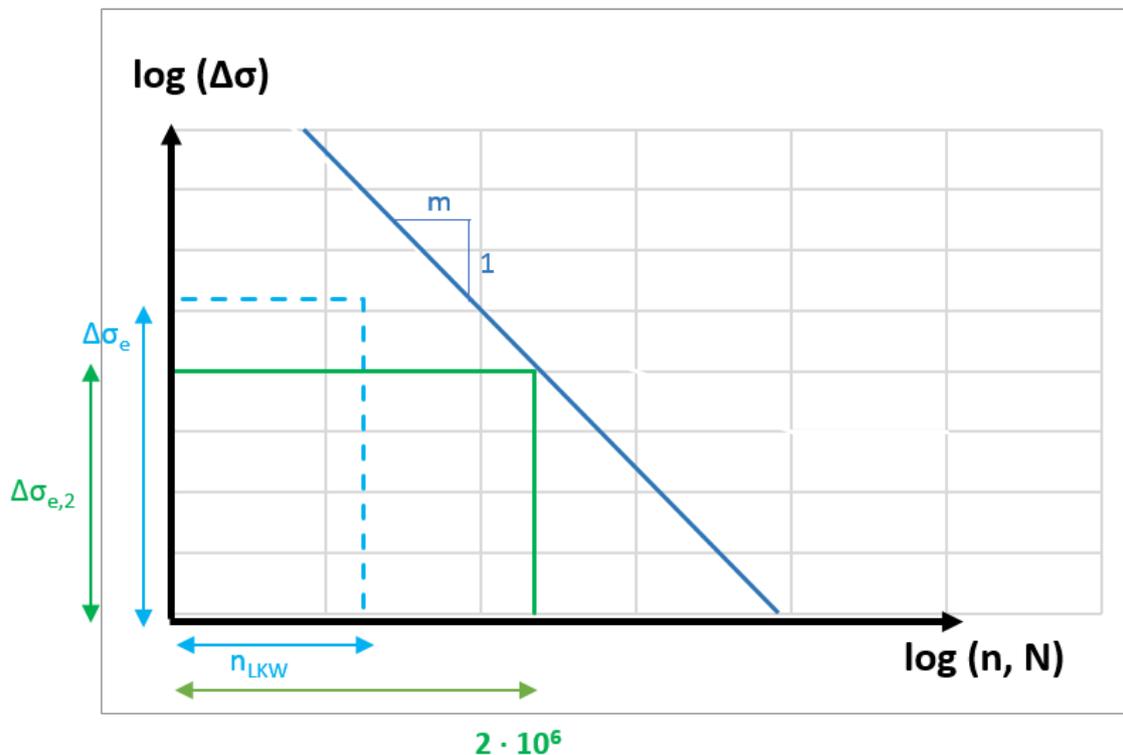


Abbildung 15: Einstufenkollektiv $\Delta\sigma_{e,2}$ mit Wöhlerlinie

3.3 Anwendung des Strukturspannungskonzeptes

Nach EN 1993-1-9 [6] kann der Ermüdungsnachweis auch mit Strukturspannungen geführt werden, insbesondere wenn große Spannungsgradienten am Schweißnahtübergang auftreten. Da dies bei den untersuchten Details der Fall ist, wird das Strukturspannungskonzept, auch als „Hot-Spot-Konzept“ bezeichnet, angewandt. Dieses ist im Dokument *Recommendations for fatigue design of weld joints and components* [9] des *International Institute of Welding* beschrieben. Um die Spannung am gewünschten Punkt (σ_{HS}), in diesem Fall am Nahtübergang zu ermitteln, werden an zwei Punkten, die 0,4-mal der Dicke des Bleches (σ_2 in Abbildung 16) und 1-mal der Dicke des Bleches (σ_1 in Abbildung 16) entfernt sind, die Spannungen ausgelesen und dann auf den Nahtübergang linear extrapoliert (siehe Abbildung 16).

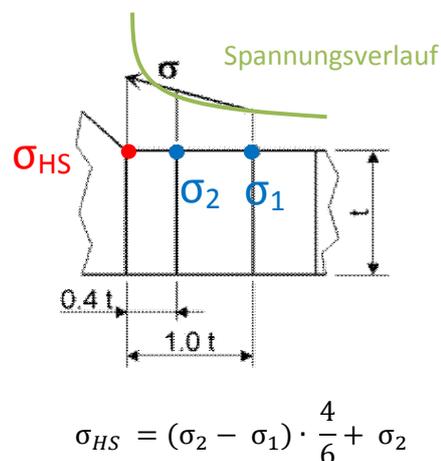


Abbildung 16: Hotspot-Methode [9] und dazugehörige Berechnung

3.4 Reale Achsgeometrie

Betrachtet man reale Schwerfahrzeuge, so stellt man fest, dass die Reifenaußenseiten außen bündig sind, wie auf Abbildung 17 ersichtlich. Die Radabstände der Achsen sind daher nicht alle gleich:

$e_A \neq e_B$.

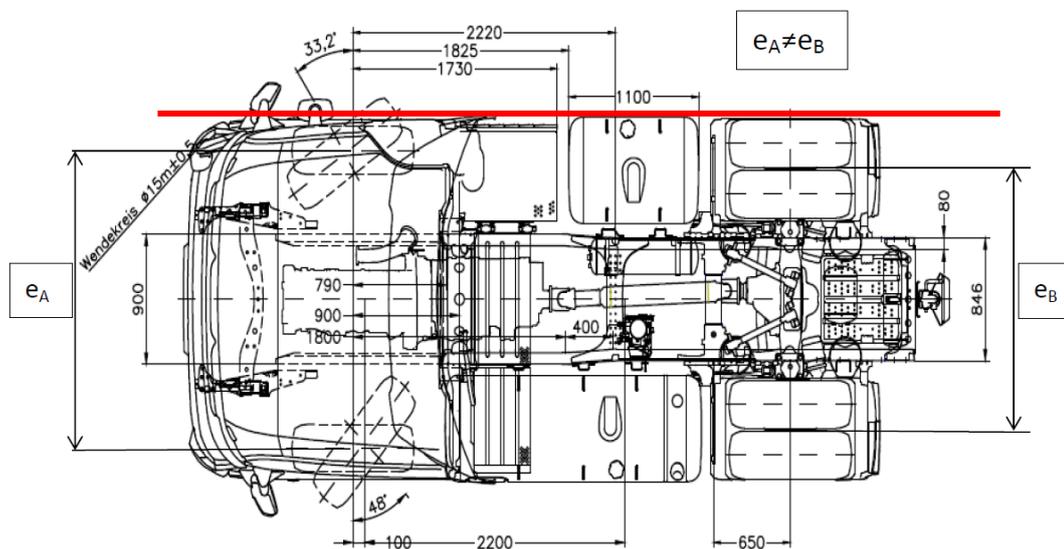


Abbildung 17: Grundriss des Zugfahrzeuges eines Sattelschleppers, Fabrikat Mercedes-Benz [10]

Im Ermüdungslastmodell des Eurocodes EN 1991-2 werden drei Achsgeometrien A, B, C vorgegeben. Dabei wird für jeden Achstyp ein Achsabstand von 2 m vorgegeben (siehe Tabelle 3). Hier ist gut ersichtlich, dass vor allem die Achse B nicht realistisch dargestellt ist. In den Berechnungen wird nachfolgend mit einer Radverschiebung nach innen der Achse B mit $\Delta e_B = 16$ cm gearbeitet. (Die Radabstände von Achse A und C entsprechen annähernd den realen Verhältnissen)

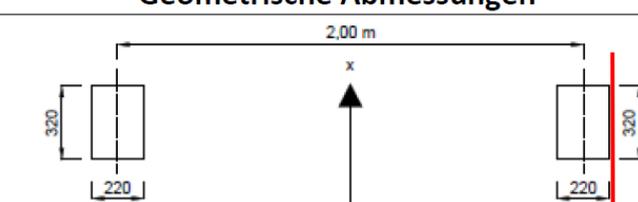
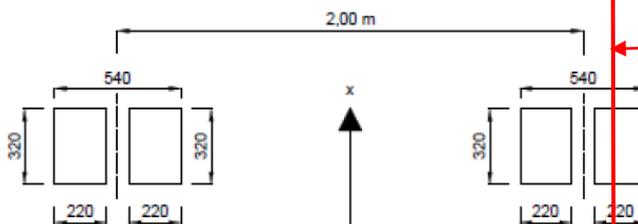
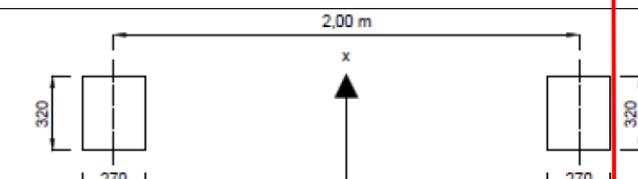
Reifen/Achsart	Geometrische Abmessungen
A	
B	
C	

Tabelle 3: Achsabstände lt. EN 1991-2 Tabelle 4-8 und gewählte Modifikation

3.5 Häufigkeitsverteilung der Überfahrten

Eine weitere Annahme, die häufig angewandt wird, ist, dass alle Fahrzeuge zentrisch innerhalb der Fahrspur über Brückentragwerke fahren. An den Bildern von Abbildung 18, die verschiedenen Lastkraftwagen beim Überqueren einer Brücke zeigen, erkennt man jedoch, dass dies nicht der Fall ist.



Abbildung 18: Beispielfoto von LKWs, die in verschiedenen Fahrspurlagen eine Brücke überqueren

Um die Variation der Überfahrten pro Fahrspur realitätsnah darzustellen, wurden zwei Verteilungen herangezogen:

3.5.1 Häufigkeitsverteilung nach Blab

Ronald Blab hat für die Bemessung des Straßenoberbaus in seiner Dissertation im Jahr 1995 die Spurverteilung an österreichischen Straßen untersucht [8]. Auf Abbildung 19 ist das angewandte Messprinzip mit Hilfe von Messmatten schematisch dargestellt:

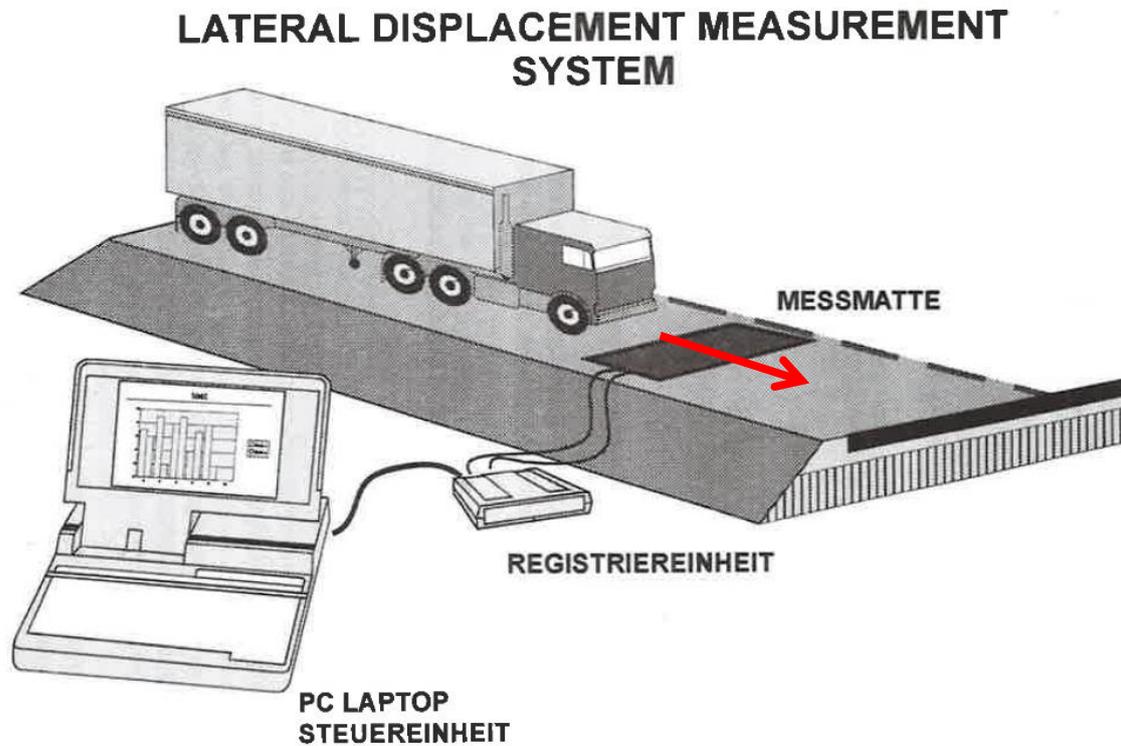


Abbildung 19: Schematische Darstellung des Messprinzips aus [8].

Aus vorhergegangener Literaturstudie legte er folgende vier Parameter fest, die als Einflussgrößen für die Wahl der Fahrspur im Fahrstreifen gelten:

- Fahrstreifenbreite
- Fahrzeugbreite
- Spurrinnenausbildung
- Fahrzeuggeschwindigkeit

Abbildung 20 und Abbildung 21 dienen zur Ermittlung der Standardabweichung, diese beschreibt die Streuung der Werte. In dieser Diplomarbeit werden diese vier Parameter aufgrund folgender Überlegungen aus [8] gewählt: Exemplarisch wurden die Fahrbahnbreiten von 3,50 m und 4,00 m untersucht. Um konservative Ergebnisse zu erzielen, wurde eine Spurrinnentiefe kleiner als 10 mm gewählt. Desweiteren wurde Schwerverkehr auf Straßen mit einer Maximalgeschwindigkeit von 100 km/h analysiert.

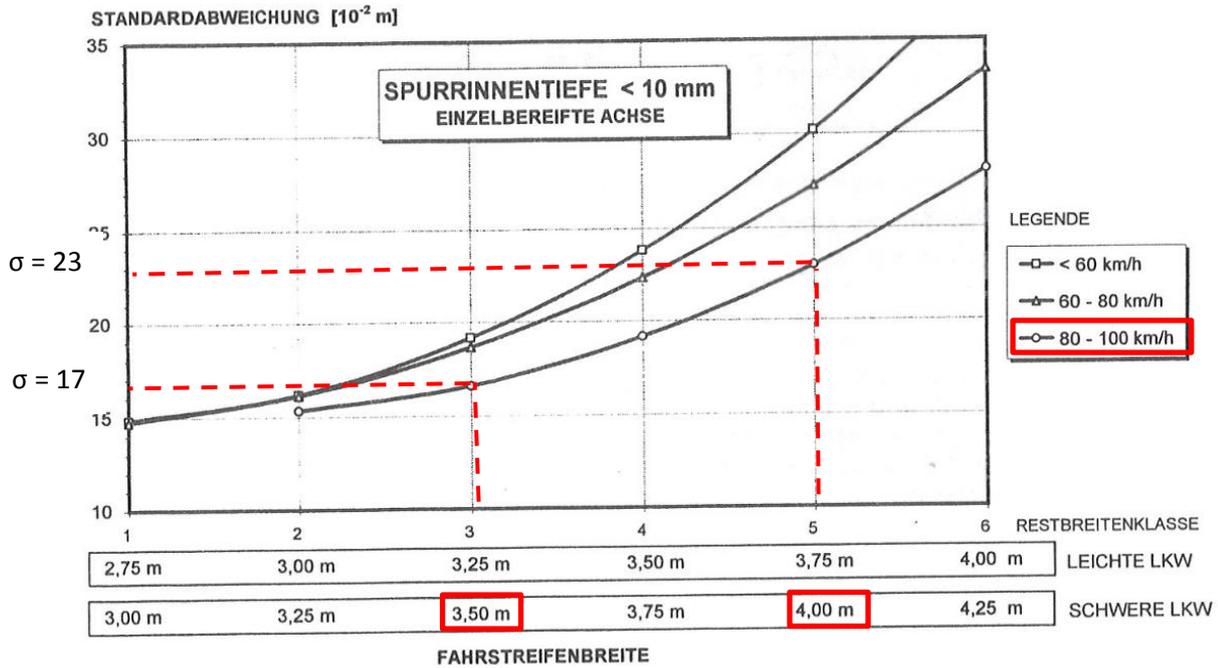


Abbildung 20: Standardabweichung der Spurabweichung nach Blab [8] bei einer einzelbereiften Achse

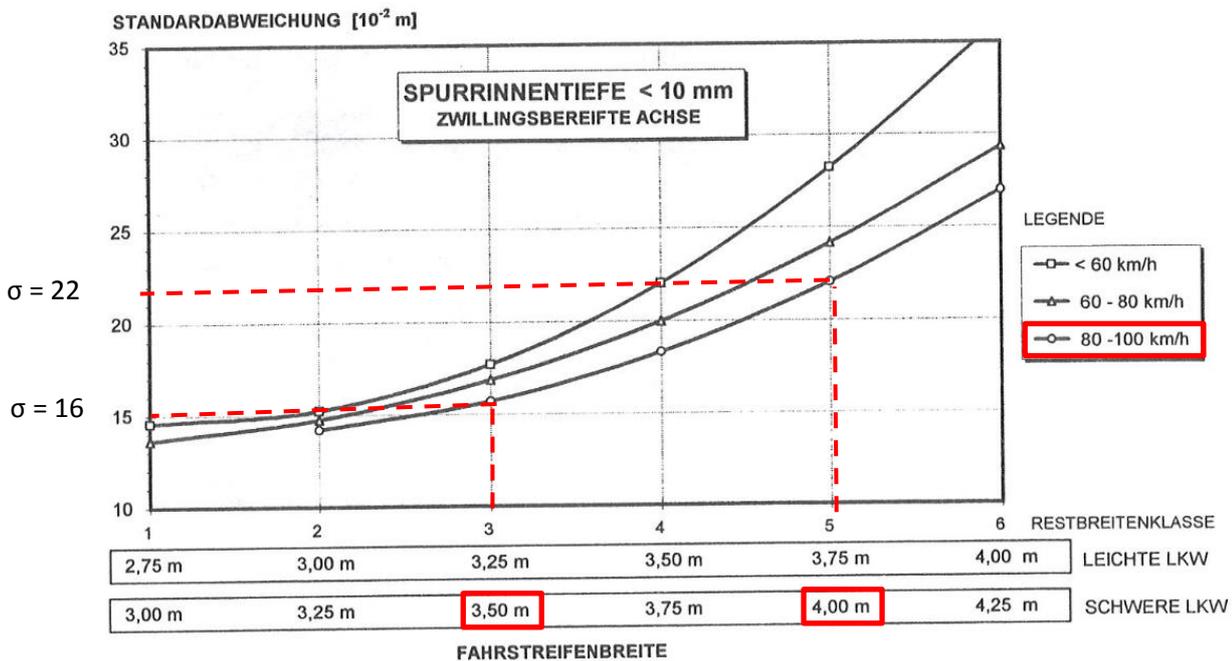


Abbildung 21: Standardabweichung der Spurabweichung nach Blab [8] bei einer zwillingsbereiften Achse

Aus dieser Dissertation geht hervor, dass die Überfahrten der LaPlace'schen Verteilung folgen, wie man am Vergleich mit der Normalverteilung und Messdaten in Abbildung 22 gut erkennen kann.

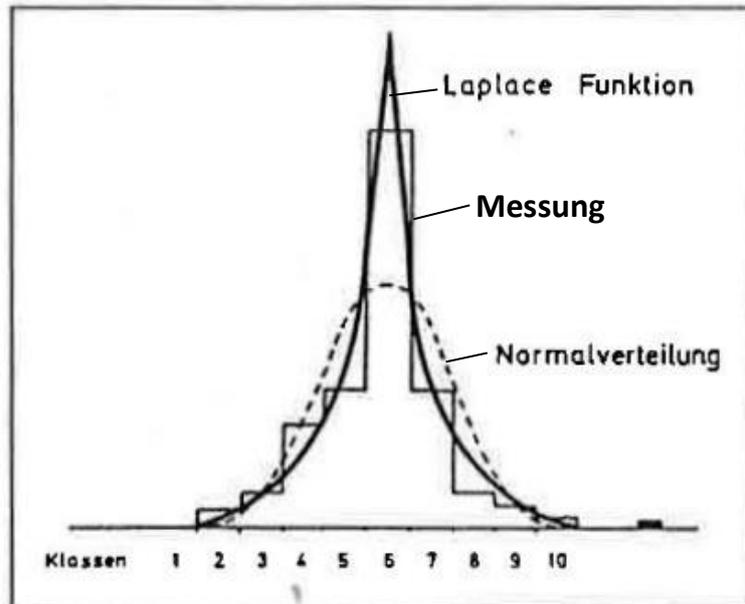


Abbildung 22: Variation der Fahrspurweite - Vergleich Laplace Funktion und Normalverteilung

Anhand der Standardabweichungen σ aus Abbildung 20 und Abbildung 21 wurden Verteilungen für die Fahrbahnbreiten von 3,5 und 4 m berechnet und in den Diagrammen Abbildung 23 bis Abbildung 26 blau dargestellt, die dazugehörigen Formeln sind in den Diagrammen zu finden. Durch Integration der Verteilung wurde die prozentuelle Aufteilung in einzelne Fahrspurklassen vorgenommen, diese sind in Abbildung 23 bis Abbildung 26 als rote Balken graphisch dargestellt:

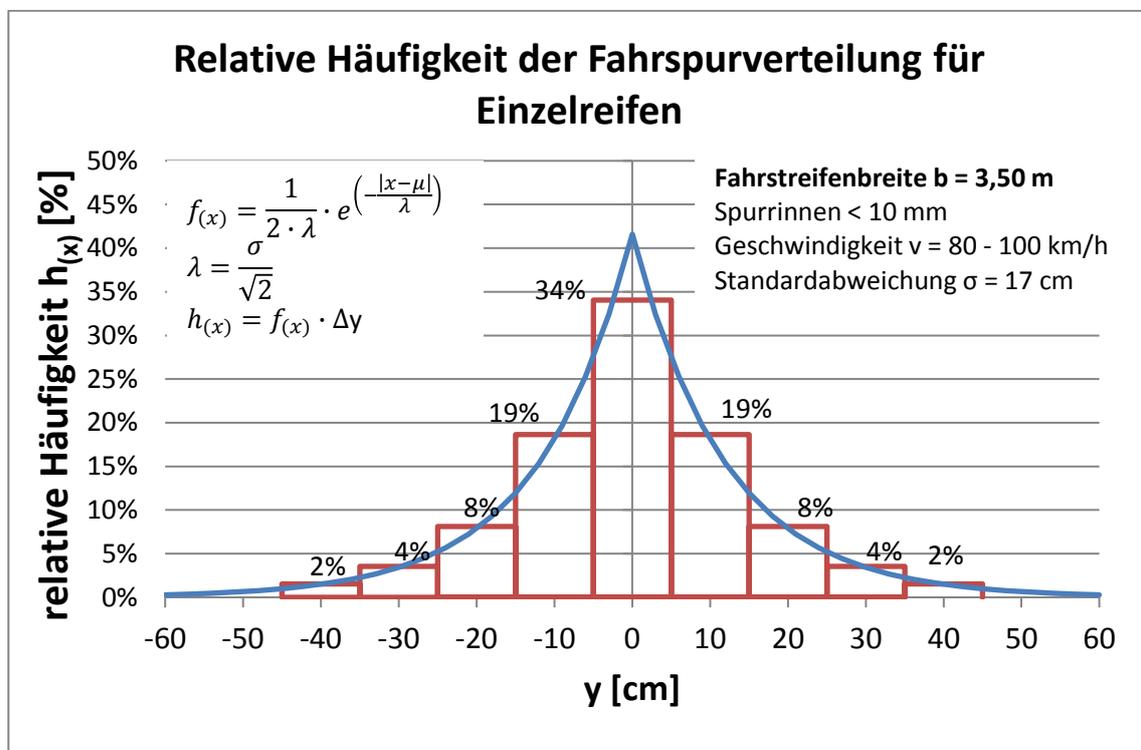


Abbildung 23: Häufigkeitsverteilung der Fahrspurweite für Einzelreifen bei Fahrstreifenbreite b = 3,5 m

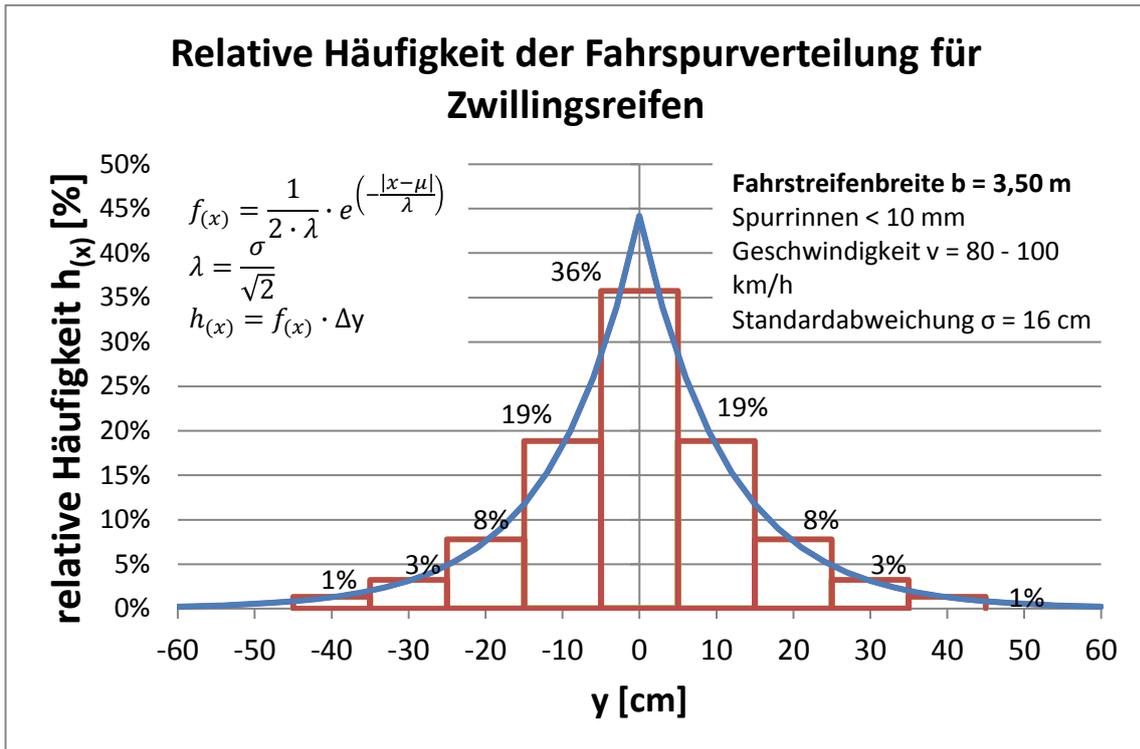


Abbildung 24: Häufigkeitsverteilung der Fahrspurverteilung für Zwillingsreifen bei Fahrstreifenbreite $b = 3,5$ m

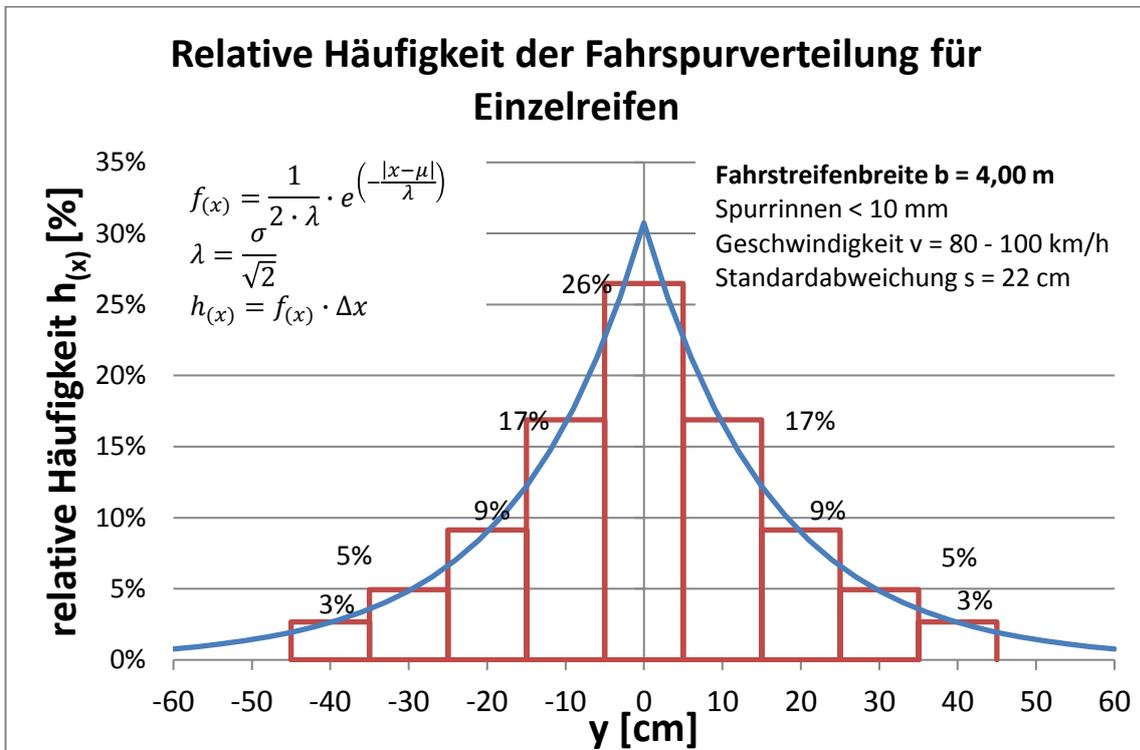


Abbildung 25: Häufigkeitsverteilung der Fahrspurverteilung für Einzelreifen bei Fahrstreifenbreite $b = 4,0$ m

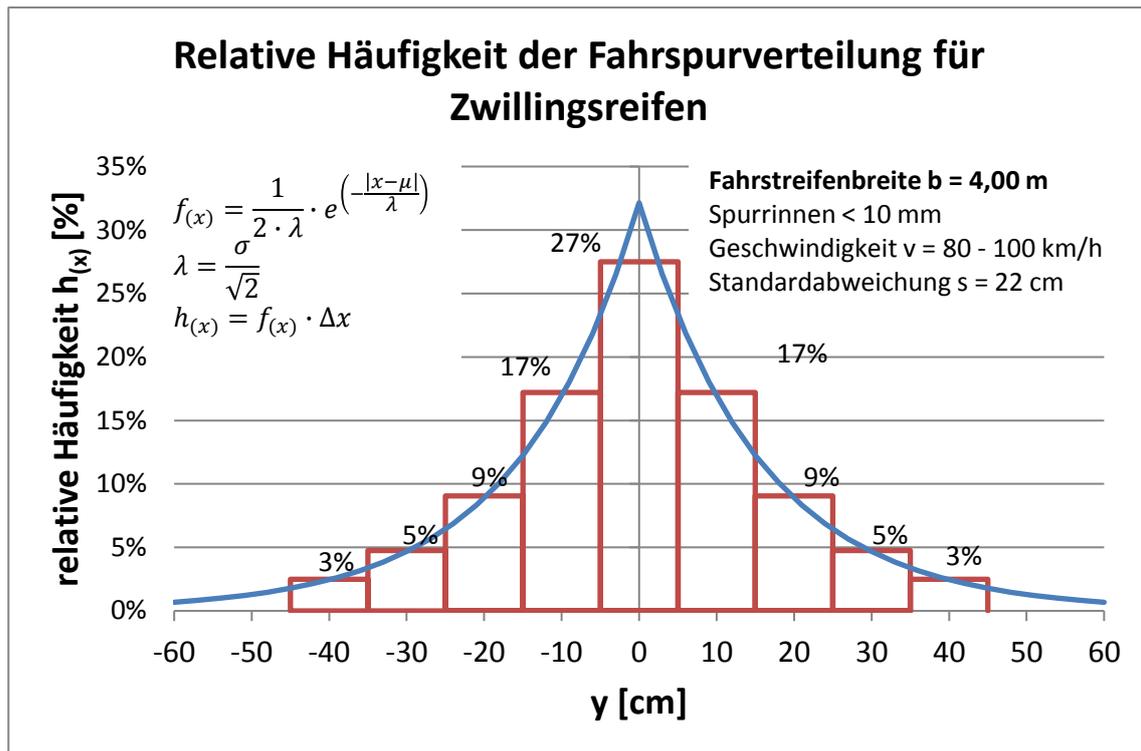


Abbildung 26: Häufigkeitsverteilung der Fahrspurverteilung für Zwillingsreifen bei Fahrstreifenbreite b = 4,0 m

Da sich die Verteilungen der Einzelreifen und Zwillingsreifen nicht beträchtlich unterscheiden, wurde pro Fahrstreifenbreite eine Verteilung gewählt und diese vereinfacht. Abbildung 27 und Abbildung 28 stellen die gewählten Verteilungen dar.

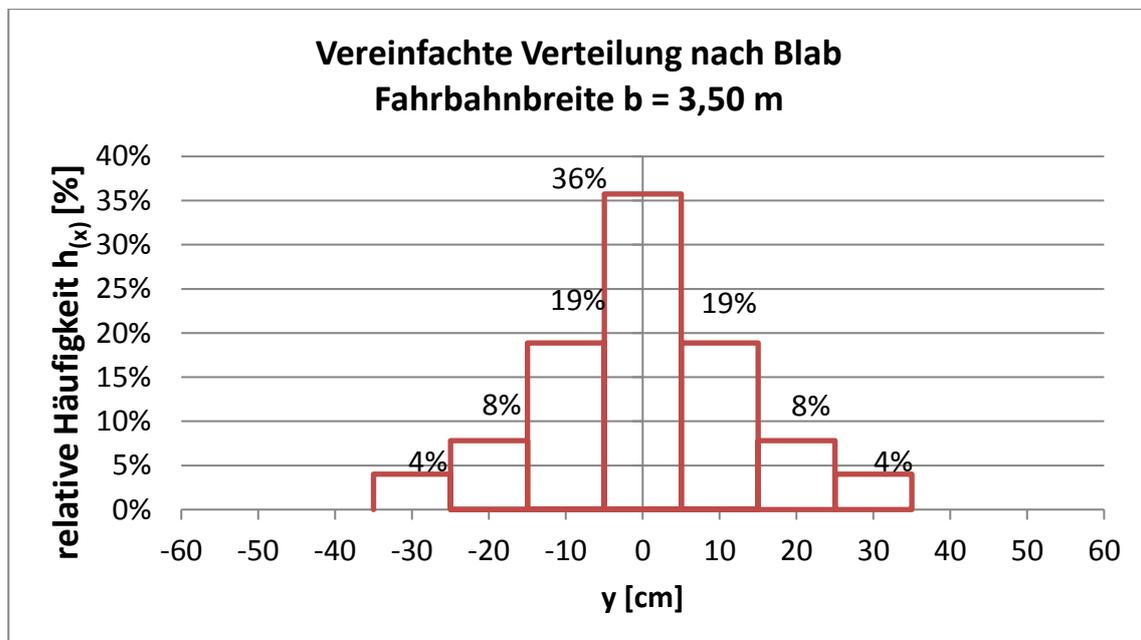


Abbildung 27: Vereinfachte Häufigkeitsverteilung der Fahrspurverteilung nach Blab

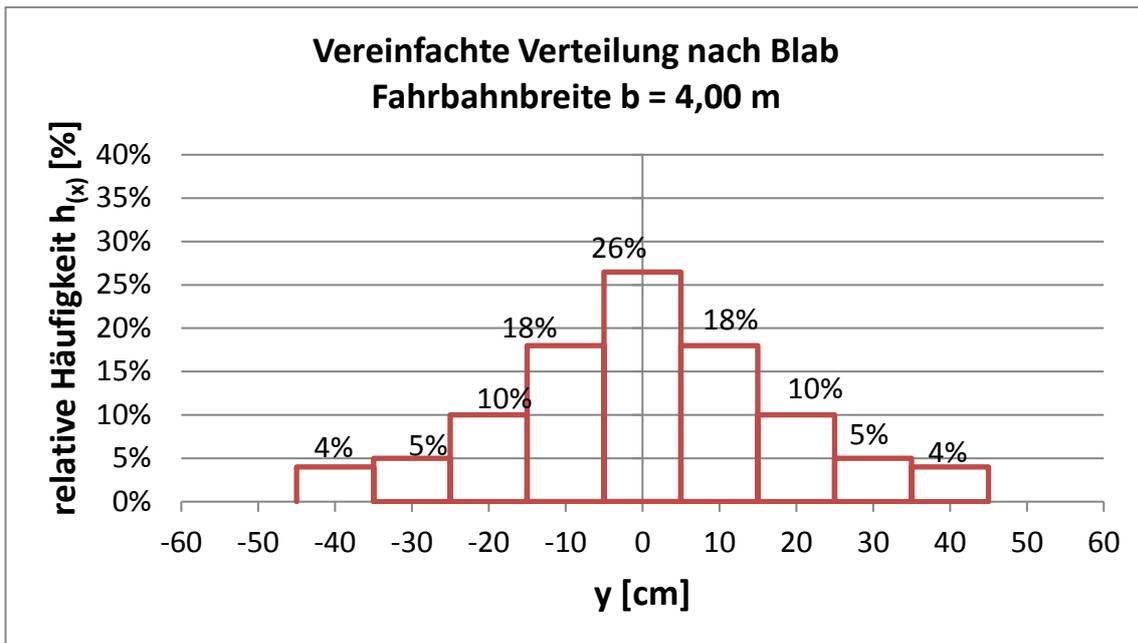


Abbildung 28: Vereinfachte Häufigkeitsverteilung der Fahrspur Lage nach Blab

3.5.2 Häufigkeitsverteilung nach EN 1991-2

Laut EN 1991-2 kann zur Ermittlung lokaler Einflüsse folgende Verteilung zur Ermittlung von Spannungen herangezogen werden:

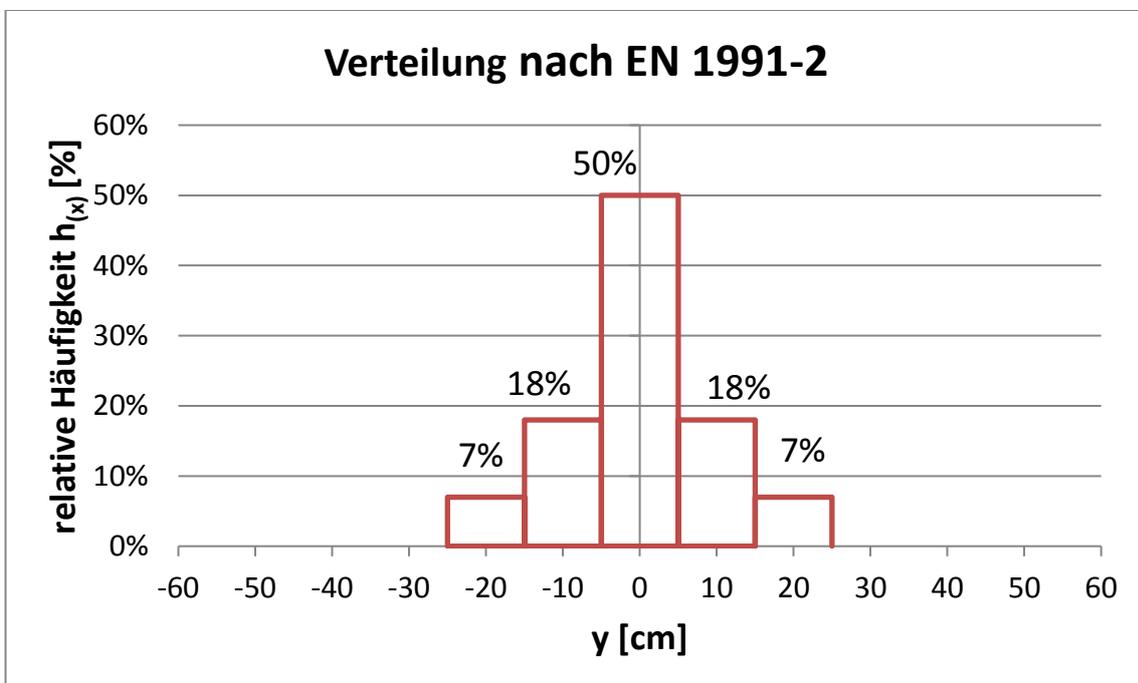
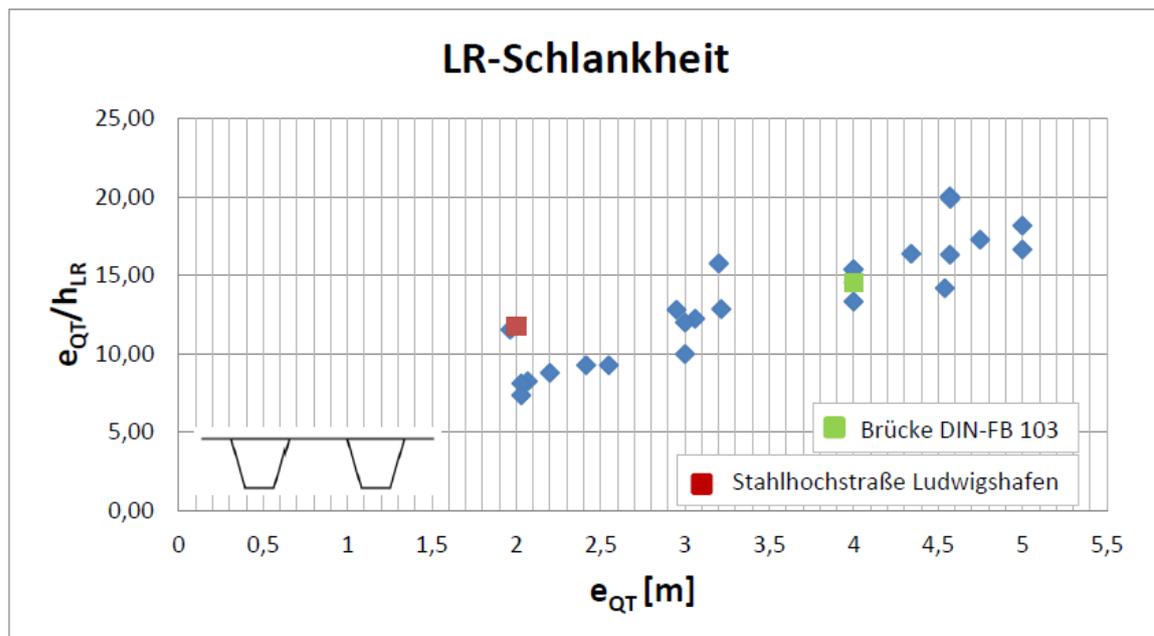


Abbildung 29: Häufigkeitsverteilung der Fahrspur Lage nach EN 1991-2, Bild 4.6

4 Untersuchte orthotrope Platten – Systembeschreibung

Um den Einfluss der Spurverteilung und der realen Achsgeometrie auf das Ermüdungsverhalten von orthotropen Fahrbahnplatten zu untersuchen, wurden zwei maßgebende Details an zwei unterschiedlichen Bestandsbrücken analysiert. Bei der Auswahl repräsentativer Modelle war eine Analyse von bestehenden Fahrbahnplatten hilfreich. Abbildung 30 zeigt einen Vergleich vieler bestehender orthotroper Fahrbahnplatten mit trapezförmigen Längsrippen (LR) auf Basis der Schlankheit der LR (e_{QT}/h_{LR}), bezogen auf den Querrippenabstand e_{QT} . Es ist ebenfalls ersichtlich, dass sich der Bereich des Querrippenabstands e_{QT} von 2 Meter bis 5 Meter erstreckt. Deswegen wurde ein Beispiel gewählt mit Querrippenabständen orientiert am Minimum des Querrippenabstands und eines um den Mittelbereich abzudecken. Als Modellvorlage für eine Fahrbahnplatte mit $e_{QT} = 2$ m wurde das Brückendeck der „Stahlhochstraße Ludwigshafen“ und für $e_{QT} = 4$ m die Beispielbrücke der DIN-FB 103, Abschnitt C [16] ausgewählt. Die genauere Analyse der Brückendecks ist in der Diplomarbeit [11] von Andreas Ogris zu finden.



e_{QT} Abstand der Querträger
 h_{LR} Höhe der Längsrippen

Abbildung 30: Längsrippenschlankheit, gemessen am Verhältnis von e_{QT}/h_{LR} in Abhängigkeit des Querrippenabstandes [11]

Durch ein Forschungsprojekt der Institute für Stahlbau und für Betonbau der TU Graz wurde festgestellt, dass die maximale Ermüdungsbeanspruchung die erste Längsrippe neben dem Hauptträger (LR-1) erfährt [3]. Da die Untersuchungen für die Berücksichtigung einer Häufigkeitsverteilung in Brückenquerrichtung einen Platzbedarf für Achse B von ± 74 cm fordert, wurde LR 2 für die Analysen herangezogen.

Abbildung 31 zeigt eine Überfahrt zentrisch über dem Längsrippensteg. Diese Position wird im Verlauf der Masterarbeit als zentrische Überfahrt bzw. zentrische Spurlage bezeichnet.

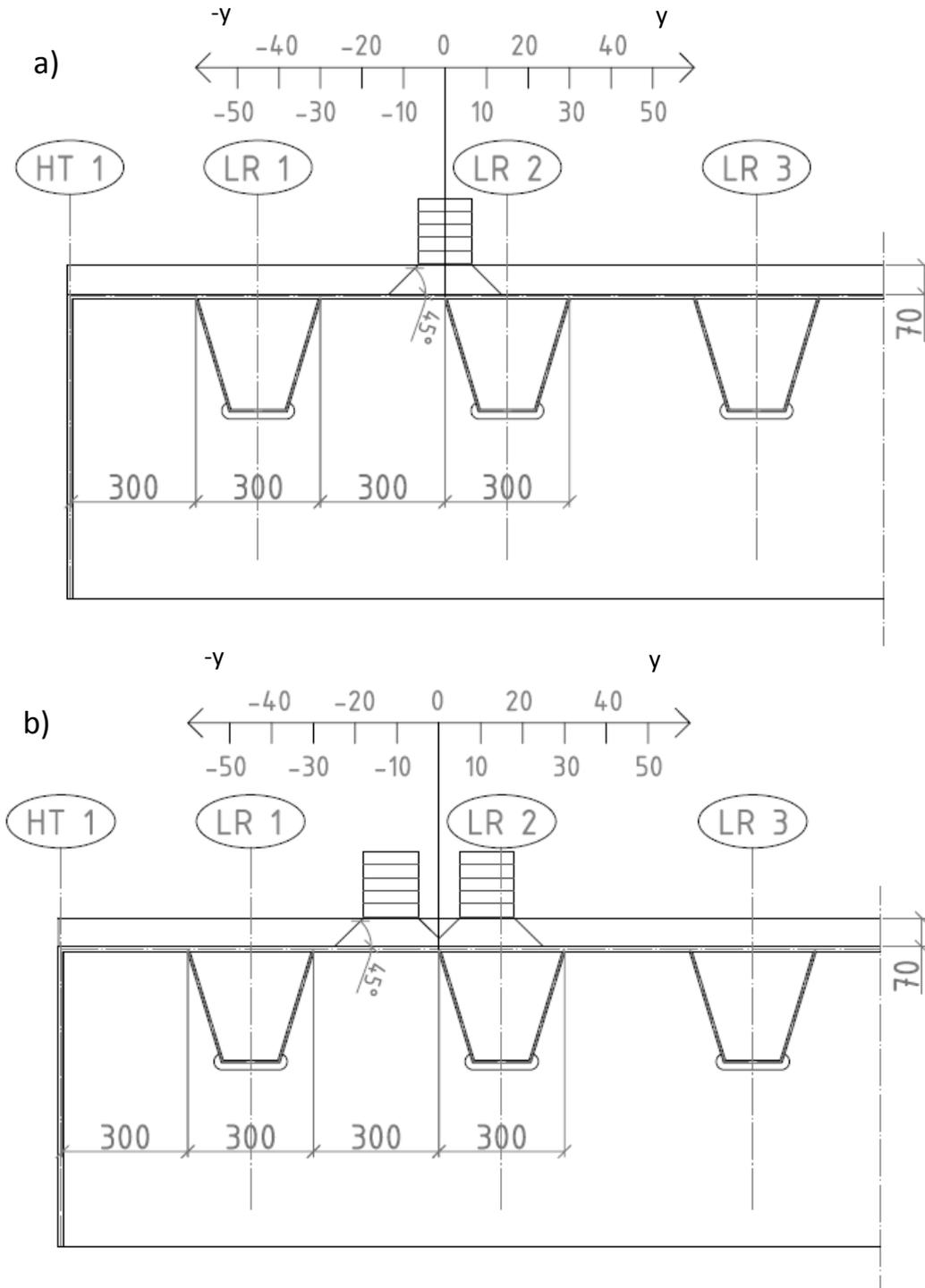


Abbildung 31: Zentrische Überfahrt mittig am Rippensteg der Längsrippe 2 (LR 2) mit einzelbereifter (a) und zwillingbereifter (b) Achse

4.1 Untersuchtes Konstruktionsdetail D1

Für Detail D1 wurde das Deckblech an der Schweißnaht zwischen Deckblech und der zweiten Längsrippe betrachtet. Hierbei wurde bei Detailpunkt 1a der kritische Punkt am Deckblech beobachtet und die Spannungen an der Deckblechunterseite in z-Richtung abgelesen. Die zweite Variante zu diesem Detail (1b) betrachtet die Spannungen am Längsrippensteg der LR 2. Die untersuchten Detailpunkte sind in Abbildung 32 und Abbildung 33 ersichtlich. Beide Punkte liegen 300 mm vom mittleren Querträger entfernt.

Variante A

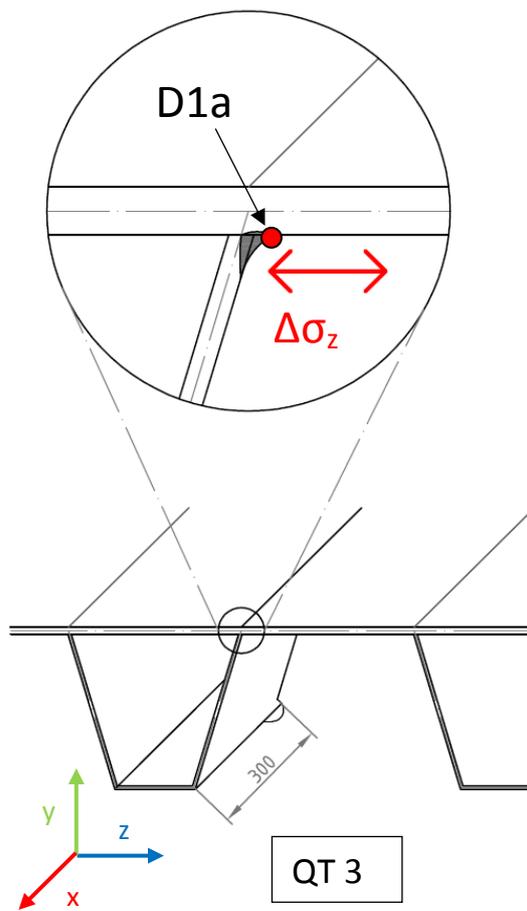


Abbildung 32: Darstellung Detail D1a

Variante B

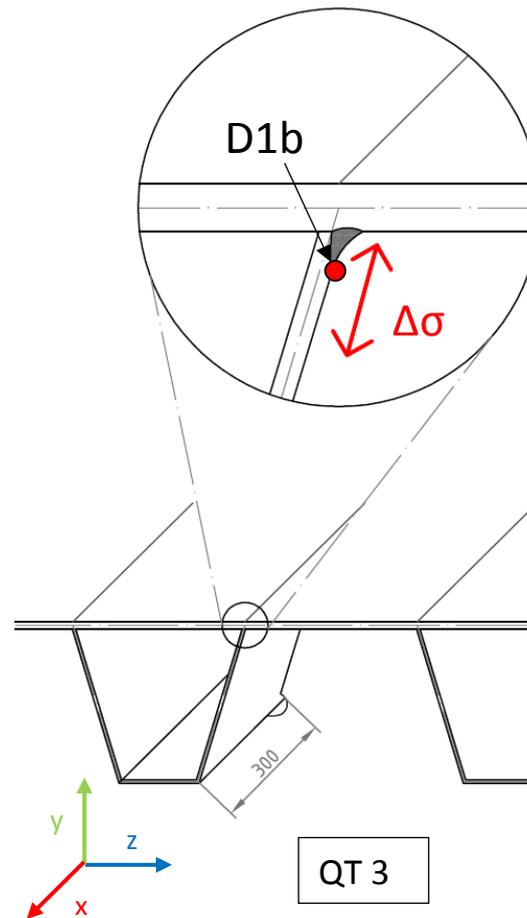


Abbildung 33: Darstellung Detail D1b

4.2 Untersuchtes Konstruktionsdetail D2

Abbildung 34 zeigt eine Visualisierung des untersuchten Konstruktionsdetails mit dem maßgebenden Detailpunkt 2. Dieser befindet sich an der Schweißnaht von Längsrippe zu Querrippe. In diesem Fall sind die Normalspannungen in der Längsrippe maßgebend und daher wurden die Spannungen in X-Richtung, also in Richtung der Längsrippe, am Längsrippensteg ausgelesen.

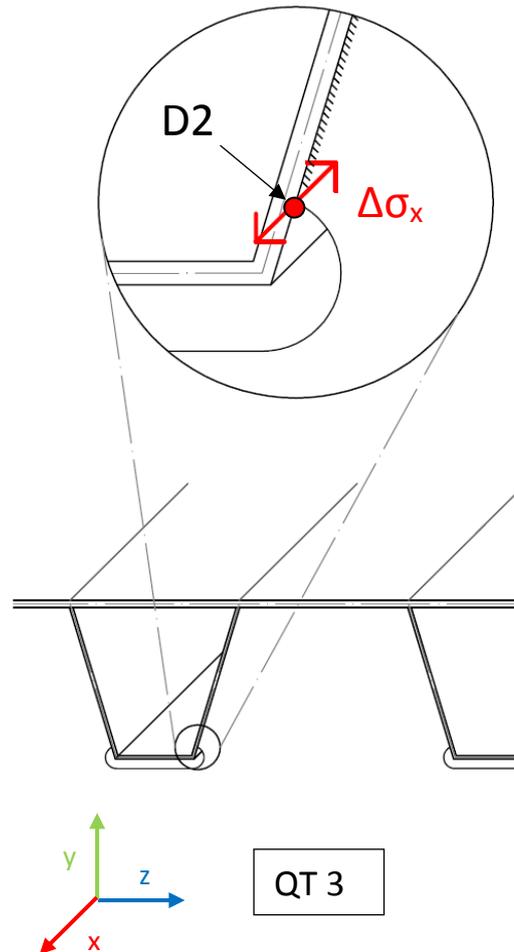


Abbildung 34: Darstellung Detail D2

An den Unterkanten der Hauptträger erfolgte die Lagerung des Modells, wie in Abbildung 36 schematisch dargestellt. Des Weiteren sieht man die Geometrien des Querträgers und der Längsrippen.

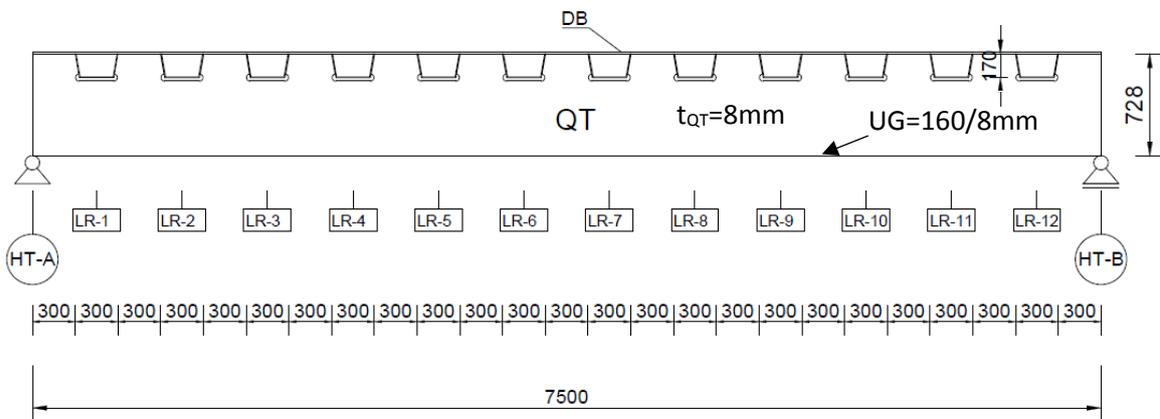


Abbildung 36: Querschnitt B-B, Darstellung von Querträger und Längsrippen bei Modell 1

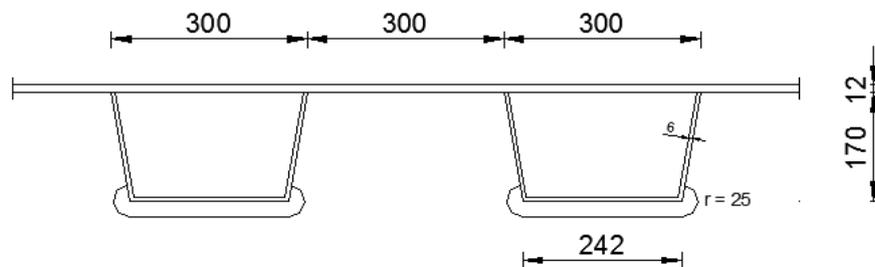


Abbildung 37: Darstellung der Längsrippengeometrie am Modell 1

4.4 Modell 2: Querrippenabstand $e_{QT} = 4 \text{ m}$

Als Vorlage dieses Modells diente die Beispielbrücke in DIN-FB 103 [16]. Hier wurde ebenfalls nur ein Teil des Brückendecks zwischen den 2 Hauptträgern modelliert.

Der Abstand der Hauptträger beträgt ebenfalls 7,5 m. Der Abstand der Längsrippenstege beträgt $e_{LR} = 300 \text{ mm}$, wodurch das Deckblech mit einer Dicke von $t_{DBI} = 12 \text{ mm}$, eine Schlankheit von $e_{LR}/t_{DBI} = 25$ aufweist. Die Höhe der Längsrippe h_{LR} beträgt 275 mm, die Blechdicke $t_{LR} = 12 \text{ mm}$, wie in Abbildung 40 ersichtlich.

Abbildung 38 zeigt den Grundriss des Modells 2. Rot markiert ist die zentrische Spurlage (Definition der zentrischen Spurlage siehe Abbildung 31) ersichtlich. Die violetten Kreise zeigen die Position der Detailpunkte. Aus vorangegangener Forschung war bekannt, dass der maßgebende Punkt für Detail D1 bei der Schweißnaht zwischen Deckblech und Längsrippe im Abstand e_{LR} zum mittleren Querträger lag. Deswegen wurde Detailpunkt 1 in diesem Abstand zum mittleren Querträger gewählt. Die Modellierung als FE-Modell mit dem Softwareprogramm Abaqus [12] ist in Anhang B zu finden.

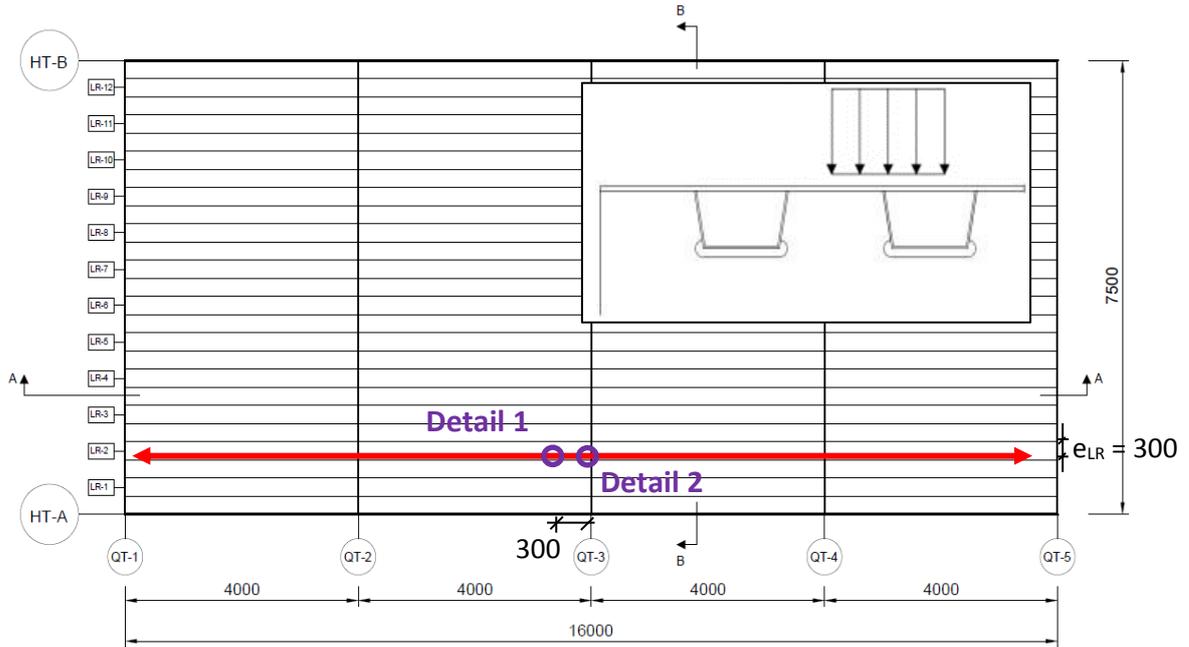


Abbildung 38: Darstellung der Detailpositionen am Modell 2

An den Unterkanten der Hauptträger erfolgte die Lagerung des Modells, wie in Abbildung 39 schematisch dargestellt. Des Weiteren sieht man die Geometrien des Querträgers und der Längsrippen.

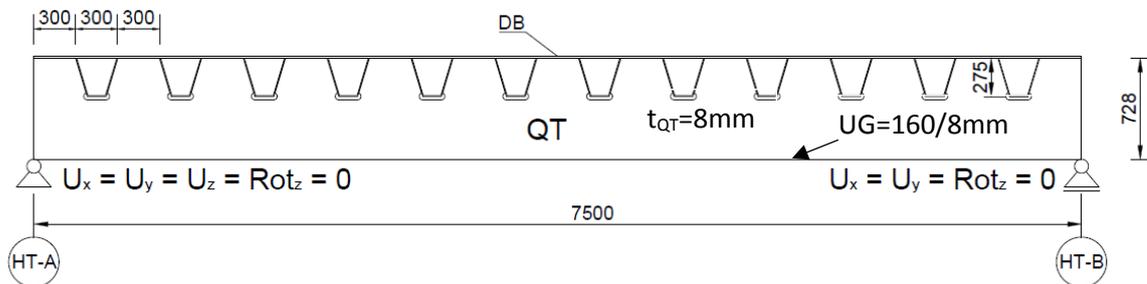


Abbildung 39: Querschnitt B-B, Darstellung von Querträger und Längsrippen bei Modell 2

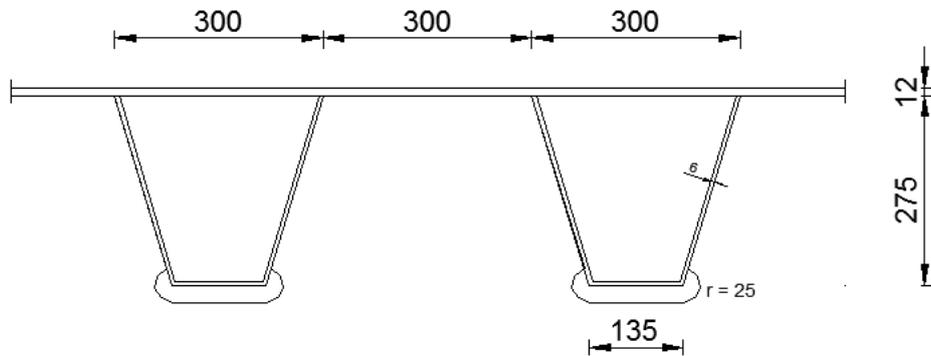


Abbildung 40: Darstellung der Längsrippengeometrie am Modell 2

5 Konzept der Arbeit

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Berechnungsschritte den erläutert, um zu den angeführten Ergebnissen zu gelangen.

- Schritt 1:**
- Simulation der Fahrzeugüberfahrten über das modellierte Brückendeck
 - Erstellung von Spannungs-Zeit-Verläufen für jeden Fahrzeugtyp
- Schritt 2:**
- Auszählung der Spannungsschwingspiele der Spannungs-Zeit-Verläufe mit Hilfe der Rainflow-Methode
 - Erstellung eines Lastkollektives für rein zentrische Überfahrt, mit den Achsabmessungen nach EN 1991-2 (vgl. Tabelle 2), unter Berücksichtigung des Aufteilungsschlüssels des Schwerverkehrs für Fernverkehrsrouten laut EN 1991-2, Tabelle 1
- Schritt 3**
- Ermittlung der Querverteilungseinflusslinien für einzel- und zwillingsbereifte Achsen für die untersuchten Detailpunkte
 - Anschließende Auswertung unter Berücksichtigung einer realitätsnahen Achsgeometrie durch Skalierung der jeweiligen Lastkollektivteile mit dem zugehörigen Skalierfaktor η aus der Querverteilungseinflusslinie
- Schritt 4**
- Berücksichtigung des Fahrverhaltens innerhalb des Fahrstreifens anhand einer Häufigkeitsverteilung der Fahrzeuglage in Brückenquerrichtung (nach Abbildung 27 bis Abbildung 29)
 - Auswertung mittels Querverteilungseinflusslinie für einzel- und zwillingsbereifte Achsen
 - Ermittlung eines neuen Lastkollektives
- Schritt 5**
- Ermittlung eines schadenäquivalenten Einstufenkollektives
 - Vergleich der Einstufenkollektive aus: zentrischer Überfahrt (Schritt 2), Überfahrt mit realer Achsgeometrie (vgl. Tabelle 3), Spurverteilung nach Blab und Spurverteilung nach EN

5.1 Schritt 1

Der erste Schritt dieser Diplomarbeit war das Erstellen von Lasteinflusslinien infolge der Achsen A und B entlang der Längsrippen. Die Achse C wurde konservativ mit Achse A gleichgesetzt, da sie nahezu die idente Ersatzfläche aufweist (vgl. Abbildung 10). Dies geschah durch Aufbringung eines „Lastenzuges“ (Flächenlast für 1 Rad mit Flächen nach Abbildung 10) entlang der Längsrippe 2 zentrisch am Längsrippensteg. Da die Achsbelastung im linear-elastischen Spannungsbereich ist, wurden die Überfahrten einheitlich mit einer Last von 100 kN durchgeführt.

Abbildung 41 und Abbildung 42 zeigen die Auswertung der Deckblechbiegespannungen in Z-Richtung am Detailpunkt D1a für die Achsen A und B.

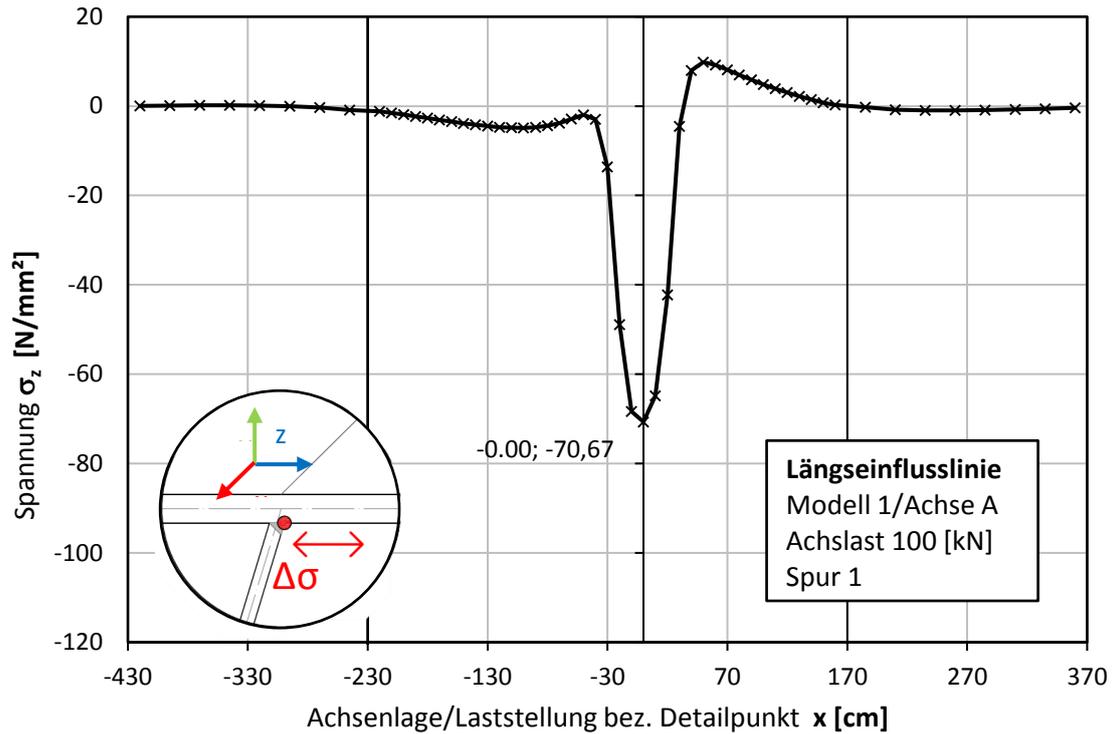


Abbildung 41: Längseinflusslinien der Achse A im Detail 1a für Deckblechbiegespannungen in Brückenquerrichtung

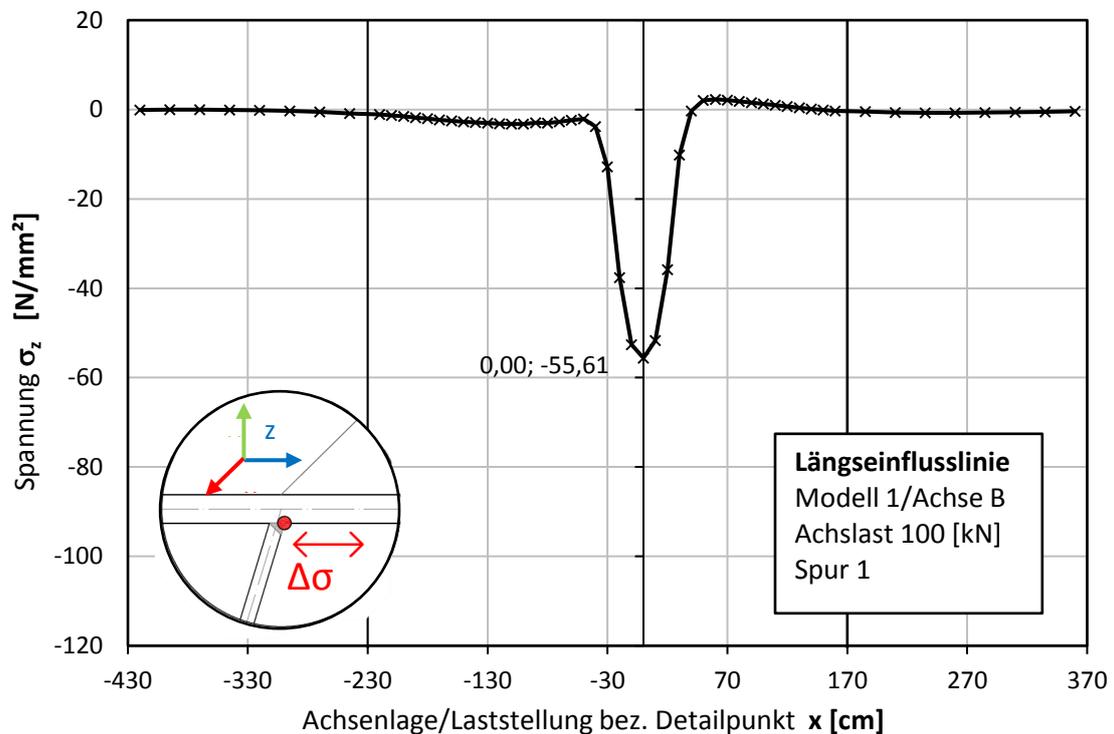


Abbildung 42: Längseinflusslinien der Achse B im Detail 1a für Deckblechbiegespannungen in Brückenquerrichtung

Abbildung 43 zeigt die Überfahrt eines Fahrzeuges des Typs T1. Dieser hat Achslasten von 70 kN bei Achse A und 130 kN bei Achse B. Mithilfe dieser Werte werden die Spannungsverläufe, die mit einer Achslast von 100 kN ermittelt wurden, skaliert. Danach werden mit Hilfe des Achsabstandes (grüner Pfeil) die beiden Spannungsverläufe superponiert.

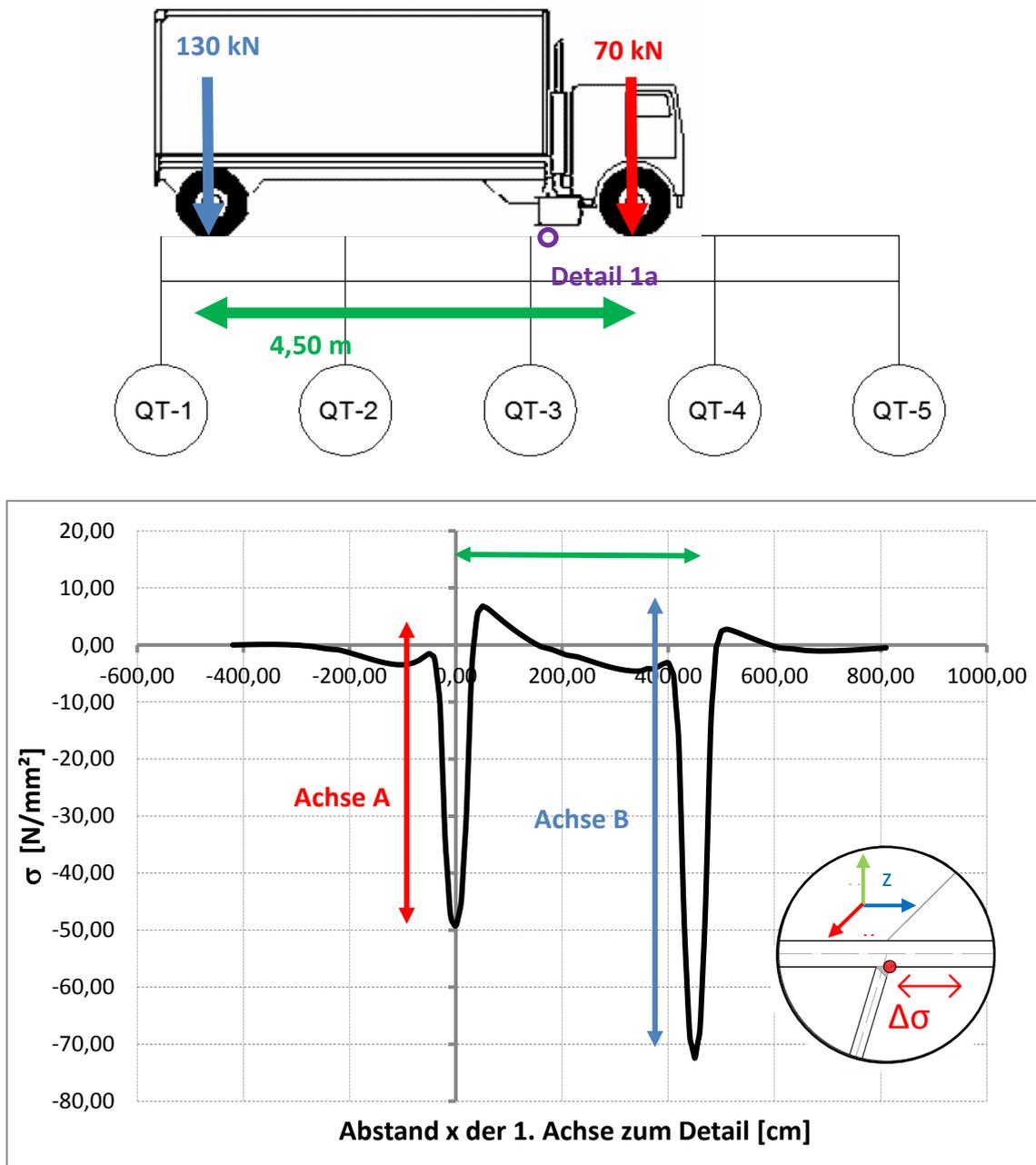


Abbildung 43: Darstellung des Spannungsverlaufes aus der Überfahrt eines Fahrzeuges T1 für Detailpunkt 1a bei Detail D1

– **Beispiel: maximale Spannung aus der Achse A:**

$$70,76 \text{ [N/mm}^2\text{]} \cdot \frac{70}{100} [-] = 49,53 \text{ [n/mm}^2\text{]}$$

5.2 Schritt 2

Anhand der Spannungsverläufe der zentrischen Überfahrten aller Fahrzeugtypen wird ein Spannungskollektiv ermittelt. Wie in Abbildung 44 ersichtlich, werden zuerst die Einzelkollektive der einzelnen Fahrzeugtypen ermittelt. Anschließend erfolgt die Gesamtkollektivvermittlung, unter Nutzung der Verkehrsdaten nach Tabelle 1.

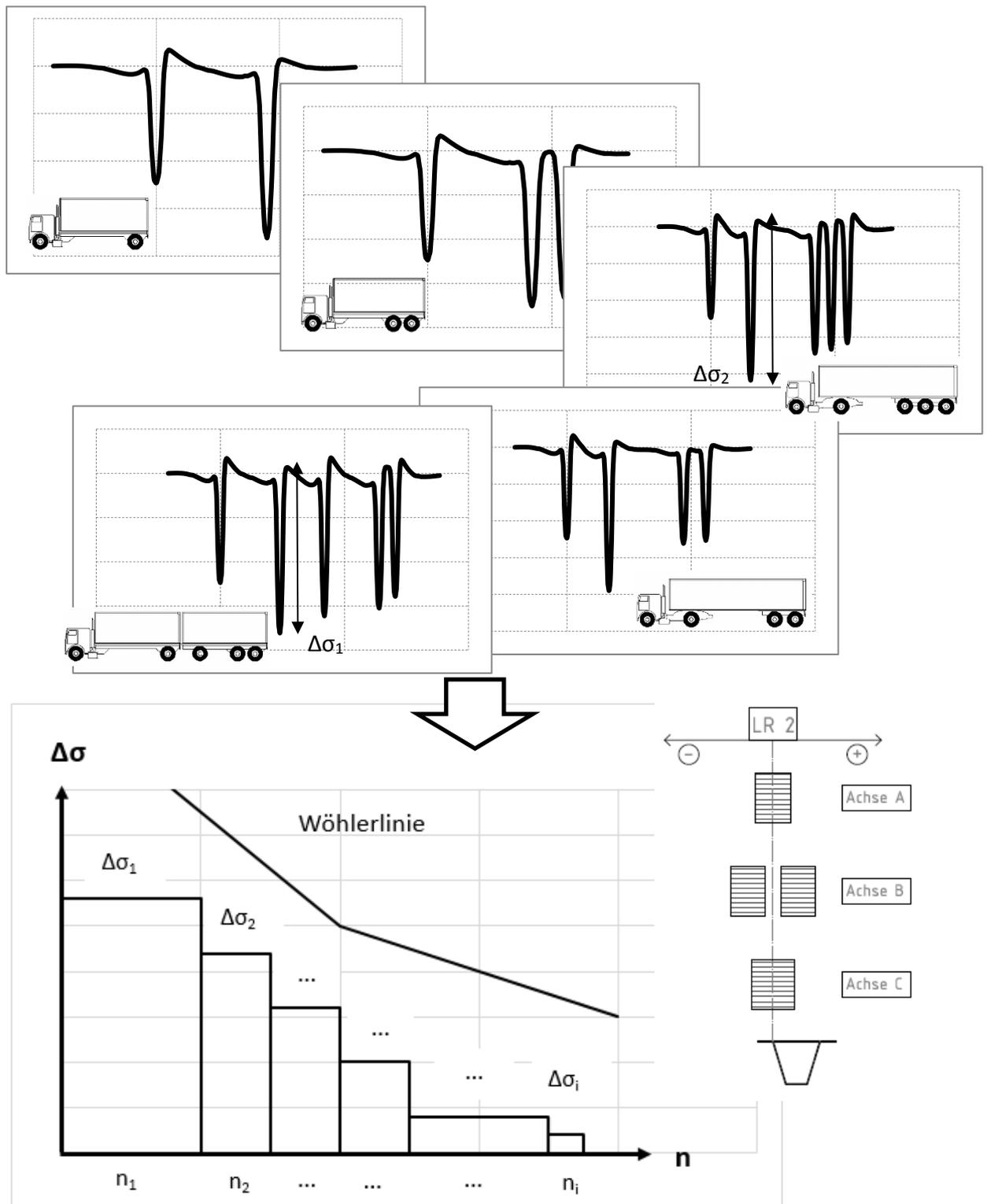


Abbildung 44: Erstellung der Spannungskollektive aufgrund zentrischer Überfahrt

5.3 Schritt 3

Um die reale Achsgeometrie von Achse B zu berücksichtigen, wurde an der maßgebenden Laststellung in Längsrichtung, die das betragsmäßige Spannungsmaximum hervorruft, die Querverteilungseinflusslinie für einzel- und zwillingstbereifte Achsen ermittelt. Da bei Detail Da1 infolge Überfahrt der Achse B der maximale Spannungszustand erreicht wird, werden Achse A und C in diesem Detail um 16 cm nach rechts verschoben (dies entspricht einer gleichwertigen Verschiebung der Achse A und C nach links, wie im Grundriss dargestellt). In Abbildung 45 sind die Quereinflusslinien der einzel- und zwillingstbereiften Achsen mit korrekter Achslage dargestellt. Dadurch ergibt sich der Skalierungsfaktor η_A . Spannungsspiele, die aufgrund der Achse A und C bei zentrischer Überfahrt ($x=0$) entstanden sind, werden dadurch kleiner.

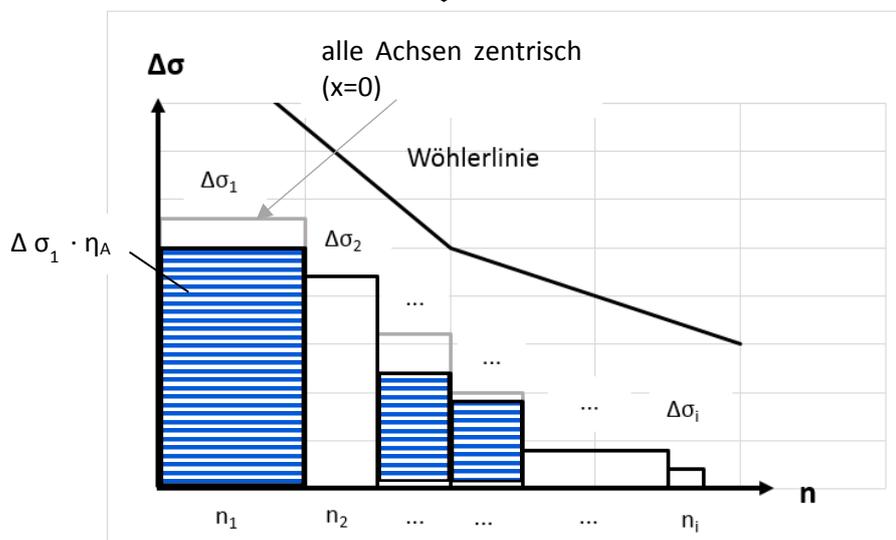
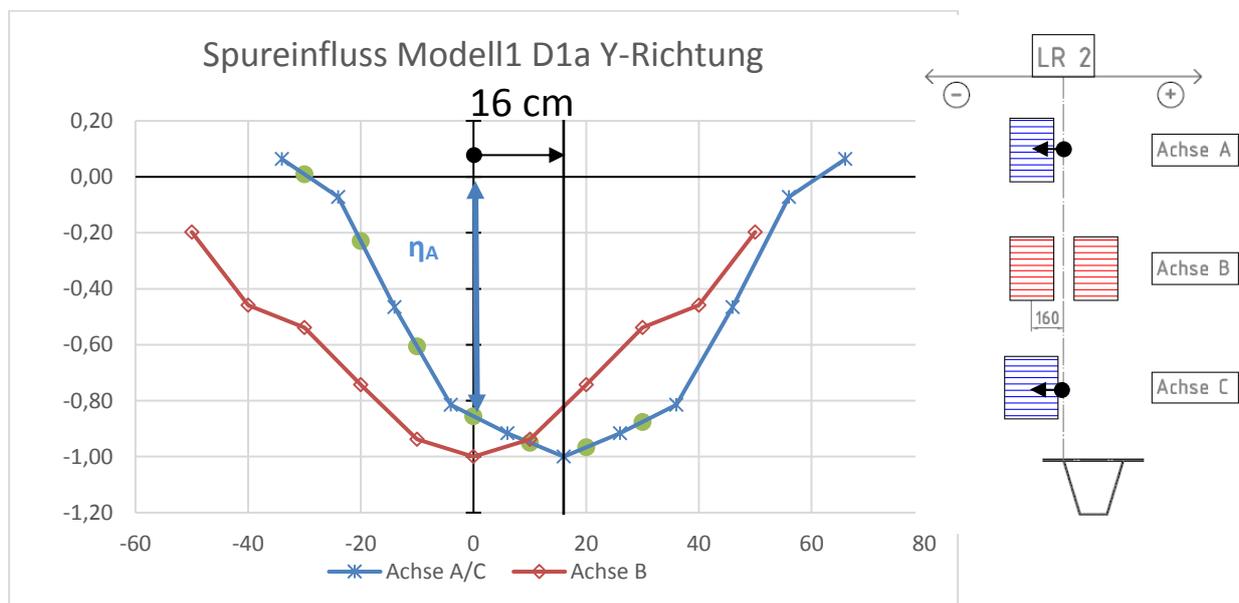


Abbildung 45: Erfassung der korrekten Achsenzuordnung für jeden Fahrzeugtyp durch Skalierung des jeweiligen Kollektivteiles aus Achse A und C

5.4 Schritt 4

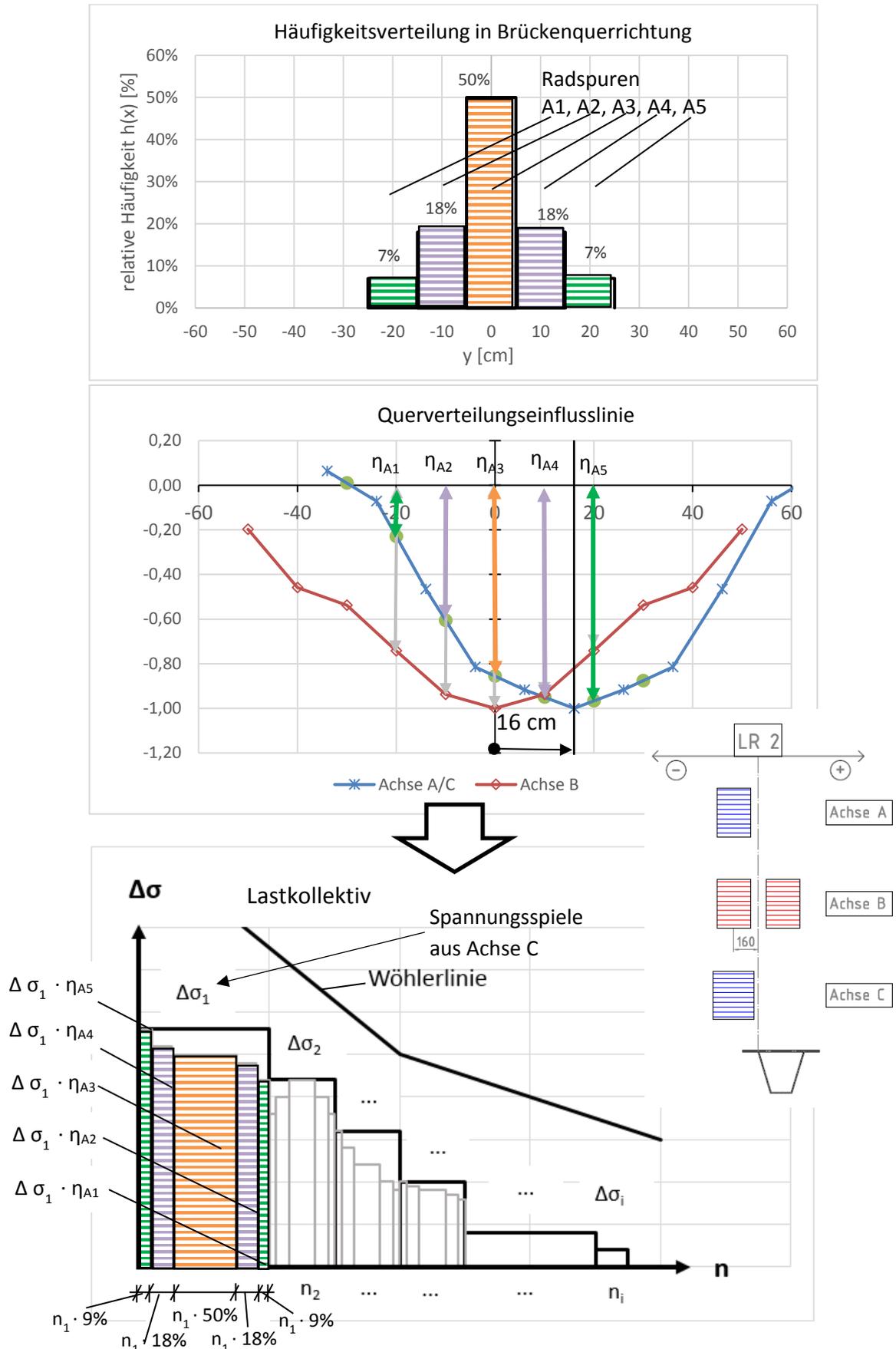


Abbildung 46: Ermittlung des Gesamtkollektivs infolge Variation der Fahrspur Lage, durch Modifizierung der Kollektivteile bei zentrischer Überfahrt

In Abbildung 46 ist die schadensreduzierende Wirkung durch Variation der Fahrspurlage exemplarisch für Detail D1a dargestellt. Die Höhe des Spannungsspiels bei zentrischer Überfahrt wurde mit den Skalierungsfaktoren aus der Querverteilungseinflusslinie modifiziert.

Gegenüber der zentrischen Überfahrt der Achsen, mit Erfassung der Achsverschiebung von Achse B (vgl. Tabelle 3), wird nun die Variation der Fahrspurlage miteingefasst. Der Kollektivteil aus jeder Achsüberfahrt eines einzelnen Fahrzeugtyps nach Tabelle 1 muss nun wie folgt modifiziert werden. In Abbildung 46 erfolgt dies beispielhaft für Achse C des Fahrzeugtyps T3, das den eingetragenen Kollektivteil $\Delta\sigma_1$, n_1 entspricht. Für Detail D1a ergibt sich $n_1 = 50$, entsprechend der 50 Achsüberfahrten für die simulierten 100 Fahrzeugüberfahrten.

- Je Radspurlage A1 bis A5, ist das Spannungsspiel $\Delta\sigma_1$ mit den zutreffenden Ordinatenwerten η_{Ai} zu multiplizieren: Somit gilt je Radspurlage: $\Delta\sigma_{A1} = \Delta\sigma_1 \cdot \eta_{Ai}$
- Die zugehörige Spannungsspielanzahl je Radspurlage ergibt sich durch Berücksichtigung der Häufigkeitsverteilung für die Fahrspurlage: $n_{Ai} = n_1 \cdot h_{Ai}$

Die entsprechenden Ergebnisse sind in Abbildung 46 schematisch eingetragen.

Durch das Modifizieren jedes Kollektivteiles für die zentrische Überfahrt wird die schädigende Wirkung des gesamten Lastkollektivs reduziert.

5.5 Schritt 5

Um die verschiedenen Spannungskollektive zu vergleichen, werden diese in ein schadensäquivalentes Einstufenkollektiv $\Delta\sigma_e$ mit Bezug auf die Gesamtanzahl von Schwerfahrzeugen n_{LKW} von hundert Spannungsspielen ($n_{LKW} = 100$) umgerechnet. Dies erfolgt nach Gleichung {1} bzw. {2}. In Abbildung 47 ist beispielhaft ein Einstufenkollektiv dargestellt. Der Vergleich der $\Delta\sigma_e$ -Werte zeigt die günstigen bzw. ungünstigen Effekte der Spurverteilung und der realen Achsgeometrie auf.

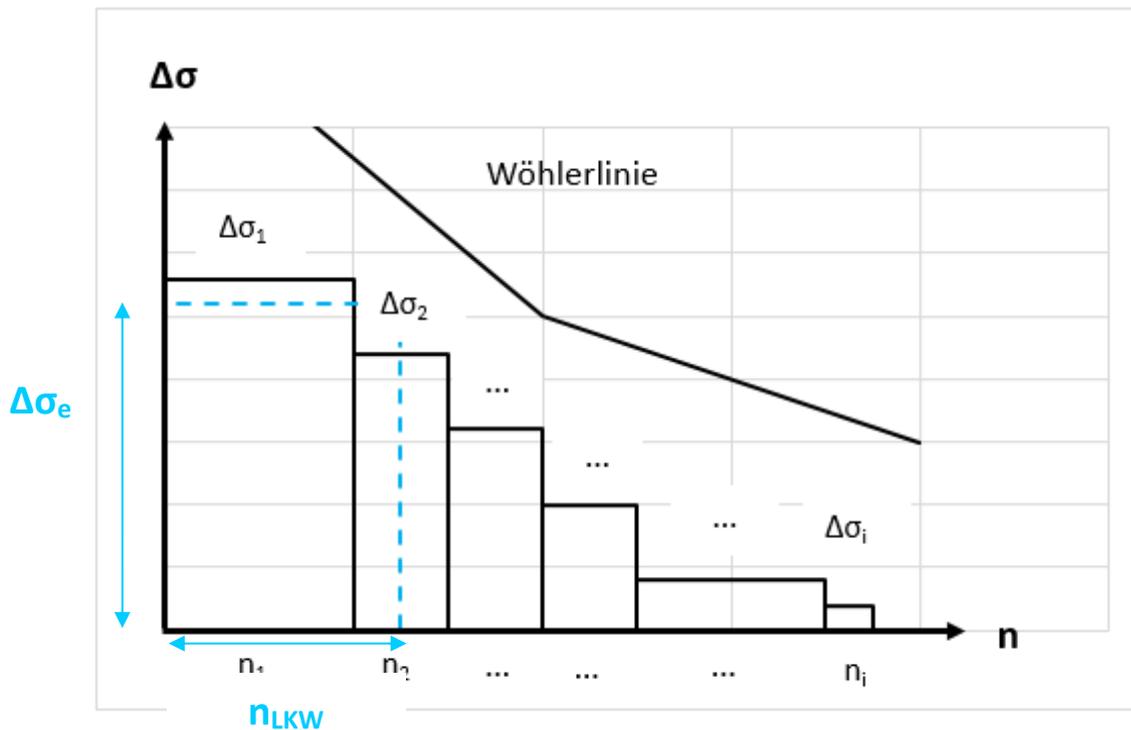


Abbildung 47: Beispiel eines Einstufenkollektivs

5.6 Sonderfall Detail 1b – alternative Vorgehensweise

Die Beschreibung für Detail D1b befindet sich in Abschnitt 4.1 in Abbildung 33. Es erfährt sowohl hohe Druck- als auch hohe Zugbiegespannungen, abhängig von der Spurlage des Fahrzeuges bei der Überfahrt. Abbildung 48 zeigt, dass bei Überfahrt links vom Detailpunkt dieser Zugspannungen durch die Deckblechbiegung erfährt. In Abbildung 49 wird der Detailpunkt bei Überfahrt rechts vom Detailpunkt mit Druckspannungen aus der Biegebeanspruchung gezeigt.

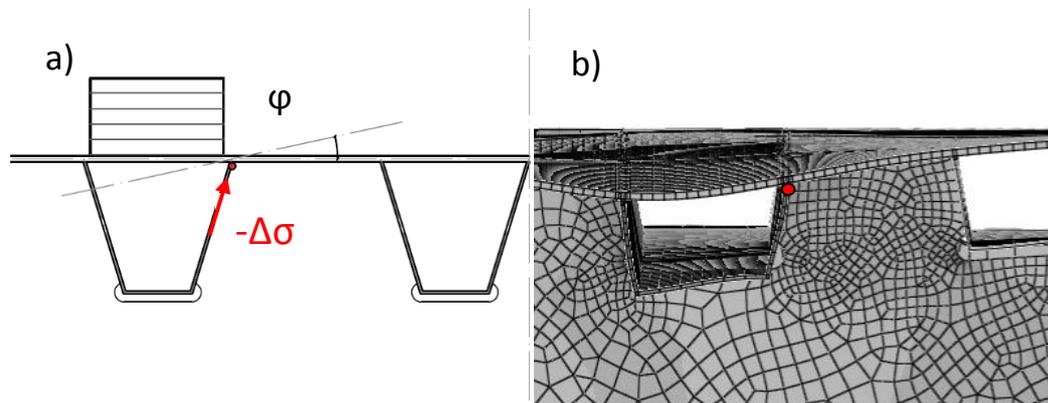


Abbildung 48: Zugbiegespannungen im Detail 1b, als Skizze (a) und FEM Darstellung (b)

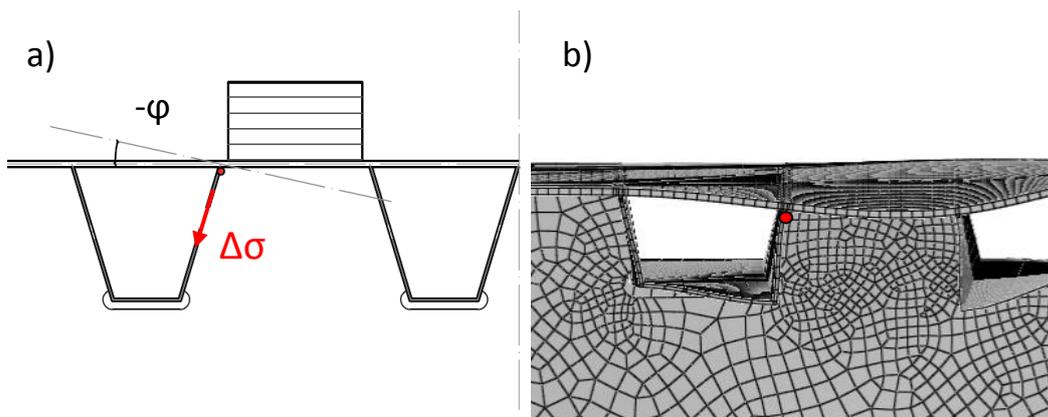


Abbildung 49: Druckbiegespannungen im Detail 1b, als Skizze (a) und FEM Darstellung (b)

Abbildung 50b zeigt die Querverteilungseinflusslinien (QV-EFL) dieses Detailpunkts D1b exemplarisch für Modell M1. Hier ist gut ersichtlich wie der Verlauf von Druck auf Zugspannungen, je nach Lage der Achslast, verteilt ist. Bei der Überfahrt der Achsen A, B und C unmittelbar zentrisch über den Längsrippensteg entstehen in dem betrachteten Detailpunkt D1b nur Druckspannungen primär aus der Membranwirkung. Um bereits in der Querverteilungseinflusslinie erkennen zu können, bei welcher Achslage in Brückenquerrichtung Zug- oder Druckspannungen im Detailpunkt D1b entstehen, wurde im Zuge der Normierung der QV-EFL als Basis die zentrische Überfahrt über den Längsrippensteg angesetzt und mit dem Wert $\eta = (-1)$ festgelegt. Des Weiteren ist die Spurverteilung nach Blab mit einer Fahrbahnbreite von 4 m zu sehen (siehe Abbildung 50a).

Im Gegensatz zu Detail D1a und D2 treten bei diesem Detailpunkt D1b größere Schädigungswirkungen bei größerer Streubreite der Häufigkeitsverteilung für den Spureinfluss auf. Aus diesem Grund wurde eine Häufigkeitsverteilung mit höherer Standardabweichung der LaPlace-Verteilung, für eine Fahrstreifenbreite von $b_f = 4$ m, gewählt (vgl. Abbildung 28).

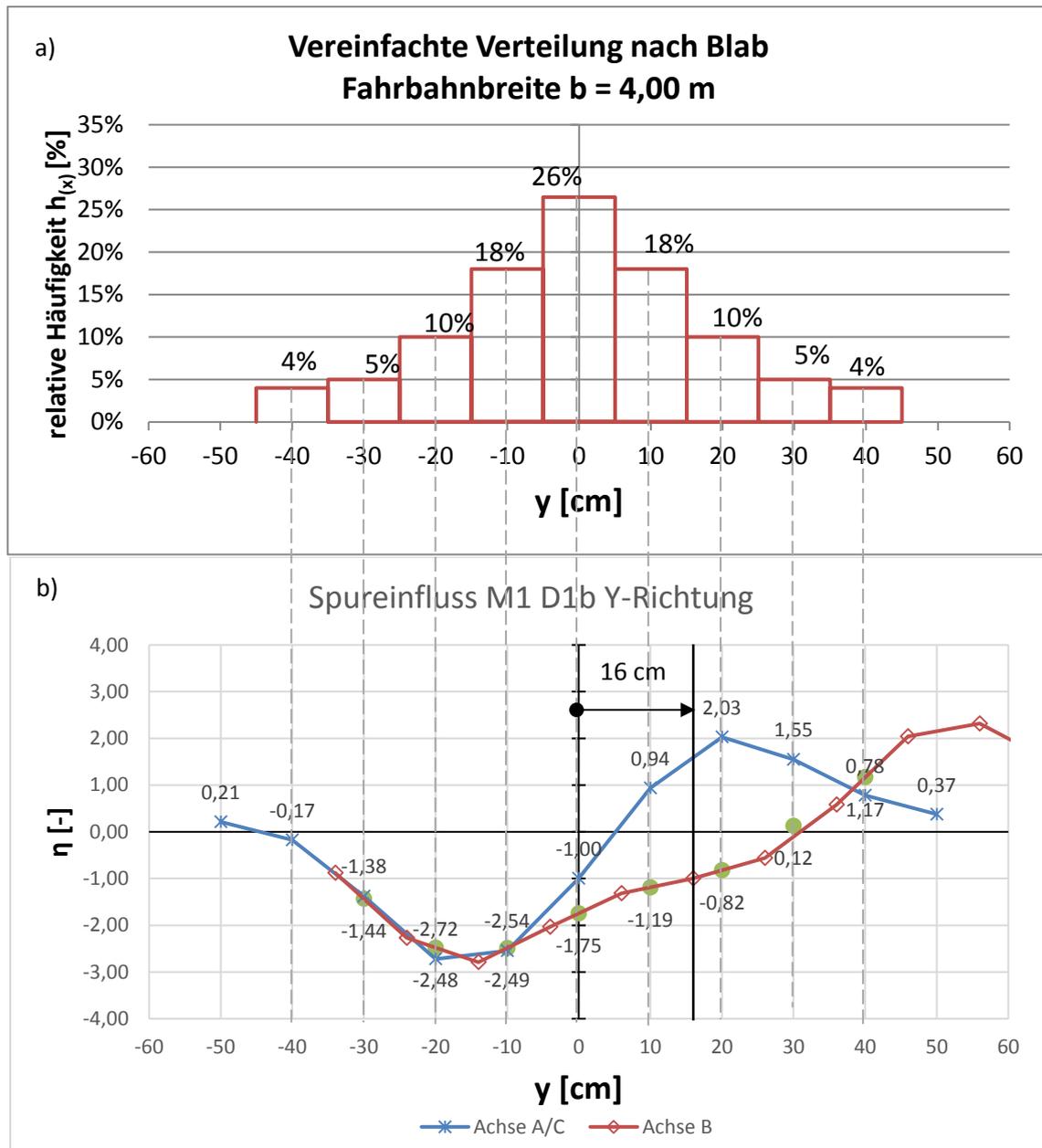


Abbildung 50: Erfassung der Häufigkeit der Überfahrt zum Spureinfluss bei Detail D1b

Anmerkung: Negatives Vorzeichen von η \rightarrow Druckspannungen in Punkt D1b
 Positives Vorzeichen von η \rightarrow Zugspannungen in Punkt D1b

Abbildung 51 zeigt den Spannungs-Zeit-Verlauf des Fahrzeugtyps 1 bei den Spurlagen von - 20 cm, 0 cm und + 20 cm für die Achsen A und C bei Modell 1.

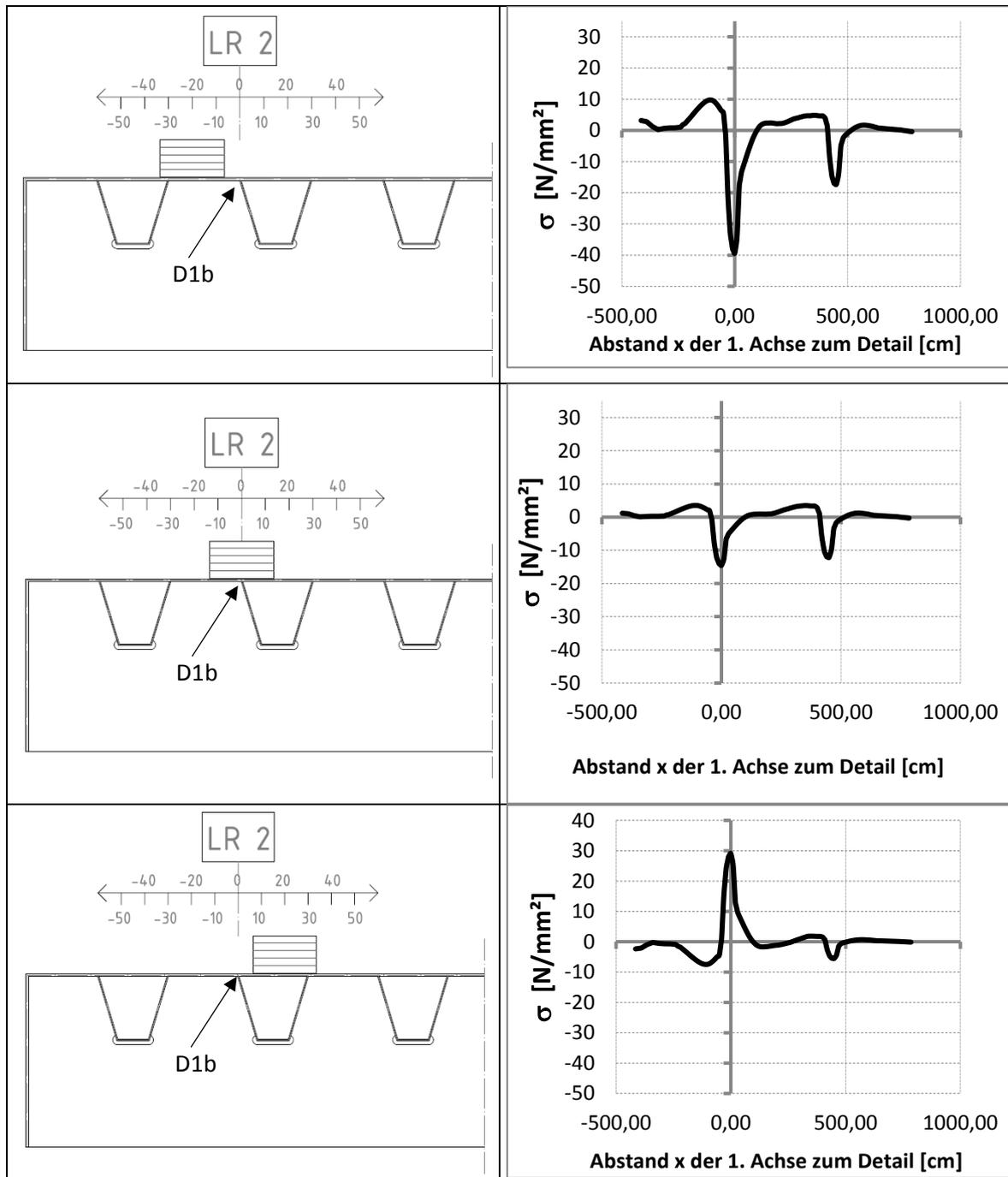


Abbildung 51: Vergleich der Spannungsverläufe des Details 1b bei Modell 1 für Überfahrt infolge Fahrzeug T1 für verschiedene Spurlagen

Dadurch, dass die verschiedenen Überfahrten je nach Spurlage Zug- oder Druckspannungen erzeugen, können nicht mehr die Spannungsspiele der einzelnen Fahrzeuge isoliert betrachtet werden. Abbildung 52 zeigt, dass das maximale Spannungsspiel $\Delta\sigma_{\max}$ zumindest über zwei aufeinander folgende Fahrzeugüberfahrten ausgelesen werden muss, da es erheblich größer ist, als das maximale Spannungsspiel aus der Überfahrt der einzelnen Fahrzeuge.

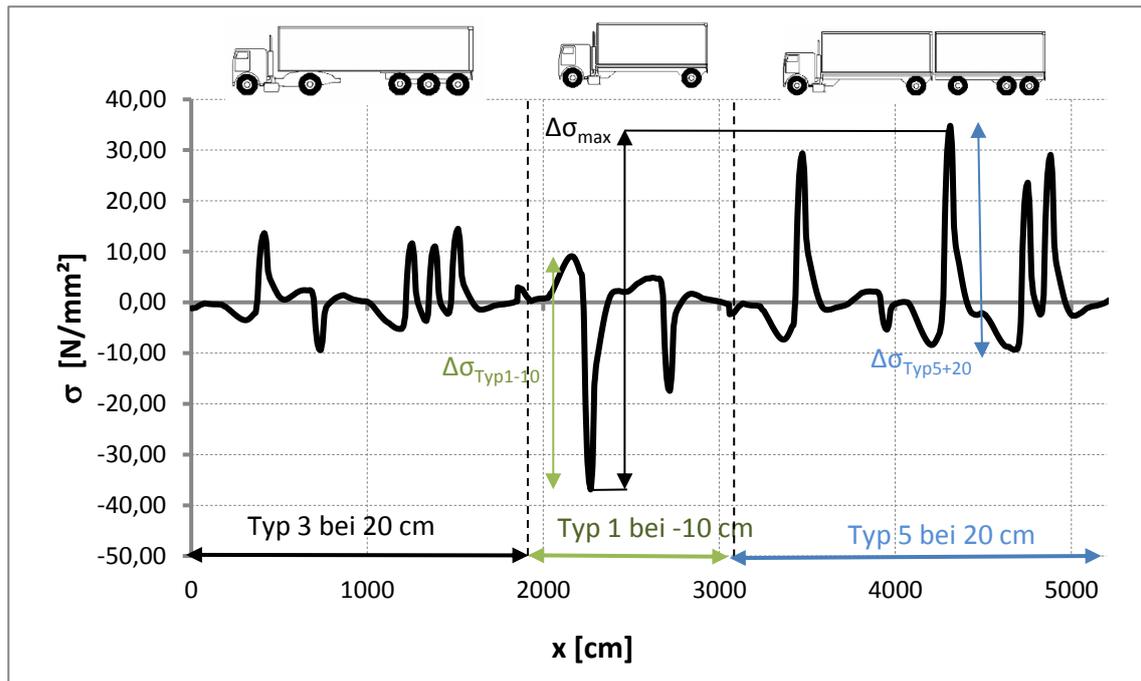


Abbildung 52: Drei beliebig gewählte Spannungs-Zeit-Verläufe dreier Fahrzeuge (Detail D1b, Modell1)

Um diesen Aspekt zutreffend zu beachten, mussten zuerst die Spannungsverläufe der einzelnen Achsen mit dem Skalierungsfaktor η aus der zugehörigen QV-EFL modifiziert werden, um die tatsächliche Achslage in Brückenquerrichtung zu erfassen. Abbildung 53 zeigt exemplarisch die Spannungs-Zeit-Verläufe aus der Überfahrt der Achse A bei einer Spurlage von -20 cm, 0 cm und 20 cm.

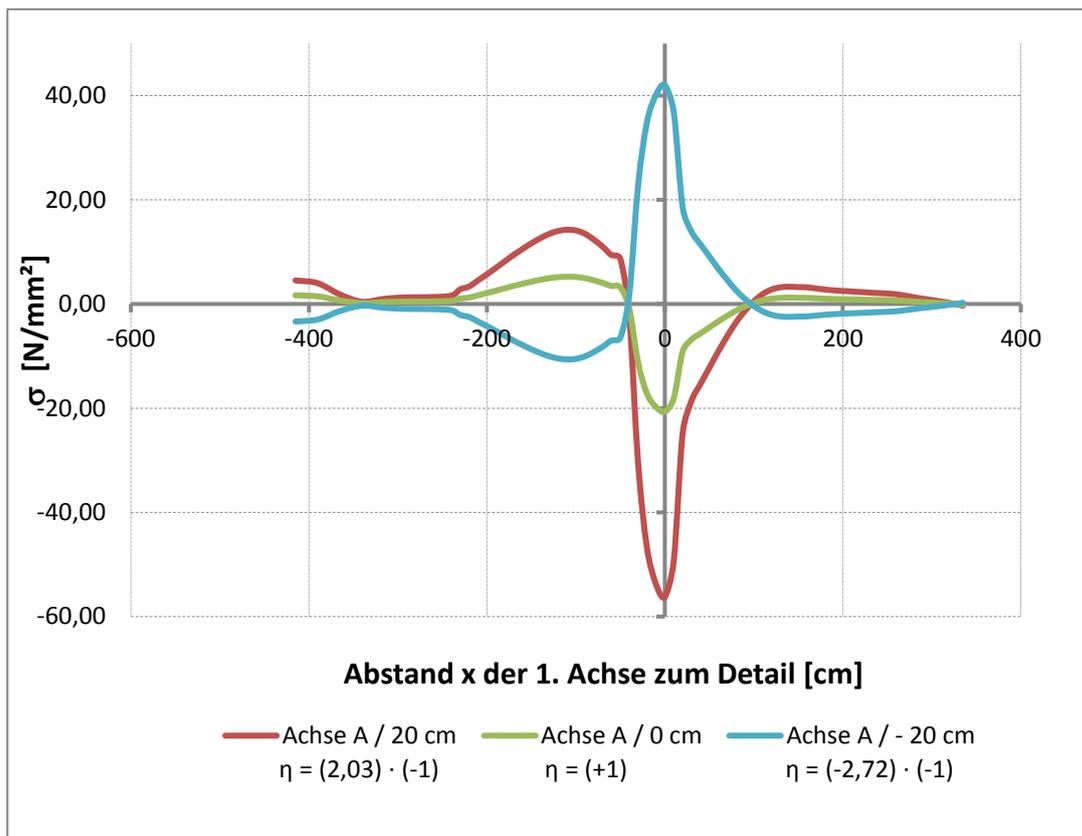


Abbildung 53: Einflusslinie der Achse A in Längsrichtung für Detail D1b bei Modell 1 und den Spurlagen 20 cm / 0 cm / - 20 cm

Daraufhin wurden die Spannungs-Zeit-Verläufe der isolierten Fahrzeugüberfahrten auf den verschiedenen Spurlagen mittels Superposition der Achslastergebnisse ermittelt (siehe Abbildung 51). Danach wurde auf Basis dieser Spannungs-Zeit-Verläufe der Einzelüberfahrten, ein gesamter Spannungsverlauf aller Fahrzeuge, mit einer repräsentativen Gesamtanzahl an Fahrzeugen erstellt. Als repräsentative Gesamtanzahl wurden 1000 Fahrzeuge gewählt. Tabelle 4 zeigt die Fahrzeugtypen, deren Auftrittshäufigkeit n_{Ti} und die detaillierte Spurverteilung h_i . Ein Beispiel: Von 1000 Fahrzeugen überquert der Fahrzeugtyp T2 in der Fahrspur Lage ($y=-10$ cm) neun Mal das Brückendeck. Aufgrund der Häufigkeitsverteilung musste die Überquerungszahl n_i gerundet werden und somit wurden insgesamt 1002 Fahrzeugüberfahrten generiert. Abschließend wurde der Spannungsverlauf mit 1002 Fahrzeugüberfahrten mit der Rainflow-Methode ausgewertet, die Spannungsspiele ausgelesen und das entstandene Lastkollektiv zu einem Einstufenkollektiv $\Delta\sigma_e$ umgerechnet (Anwendung Gleichung {1} bzw. {2} mit $n_{LKW} = 1000$).

Da an diesem Detailpunkt D1b die Spannungsspiele von der zeitlichen Abfolge der einzelnen Fahrzeugüberfahrten (Typ und Position in Querrichtung) abhängig sind, wurden 4 unterschiedliche zufallsgenerierte Abfolgen untersucht und ausgewertet. Die Abweichungen der daraus ermittelten schadensäquivalenten Einstufenkollektive $\Delta\sigma_{e,i}$ waren vernachlässigbar klein.

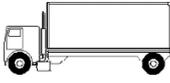
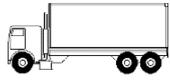
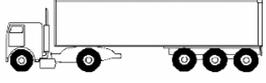
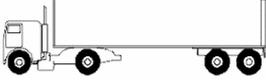
Typ-Nr.	Fzg. Position y_i [cm]	n_{Ti}	h_i	n_i
	-40	(20 %) 200	0.04	8
	-30		0.05	10
	-20		0.1	20
	-10		0.18	36
	0		0.26	52
	10		0.18	36
	20		0.1	20
	30		0.05	10
	40		0.04	8
	-40	(5 %) 50	0.04	2
	-30		0.05	3
	-20		0.1	5
	-10		0.18	9
	0		0.26	13
	10		0.18	9
	20		0.1	5
	30		0.05	3
	40		0.04	2
	-40	(50 %) 500	0.04	20
	-30		0.05	25
	-20		0.1	50
	-10		0.18	90
	0		0.26	130
	10		0.18	90
	20		0.1	50
	30		0.05	25
	40		0.04	20
	-40	(15 %) 150	0.04	6
	-30		0.05	8
	-20		0.1	15
	-10		0.18	27
	0		0.26	39
	10		0.18	27
	20		0.1	15
	30		0.05	8
	40		0.04	6
	-40	(10 %) 100	0.04	4
	-30		0.05	5
	-20		0.1	10
	-10		0.18	18
	0		0.26	26
	10		0.18	18
	20		0.1	10
	30		0.05	5
	40		0.04	4
		1000		1002

Tabelle 4: Detail D1b - Aufteilung der Überfahrten der Fahrzeugtypen auf spezifische Fahrspurlagen

6 Darstellung der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Berechnungen der Einstufenkollektive $\Delta\sigma_e$ mit $n_{LKW} = 100$ bzw. mit $n_{LKW} = 1000$ für Detailpunkt D1b dargestellt. Die Dokumentation dazu erfolgte für Modell 1 im Anhang A und für Modell 2 in Anhang B.

6.1 Ergebnisse für Modell 1 – Querträgerabstand $e_{QT} = 2\text{m}$

Detail D1a

Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse der schadensäquivalenten Einstufenkollektive $\Delta\sigma_e$. In der ersten Spalte ist $\Delta\sigma_e$ zufolge zentrischer Überfahrt zu sehen (Definition der zentrischen Überfahrt siehe Abbildung 31). In den anderen Spalten werden die Ergebnisse der Spannungskollektive mit modifizierten Werten der realen Achsgeometrie, der Spurverteilung nach Blab und nach EN 1991-2 dargestellt. Daraus lässt sich klar herauslesen, dass sowohl die reale Achsgeometrie, als auch die Spurverteilung positive Effekte auf die Ermüdungsbeanspruchung haben.

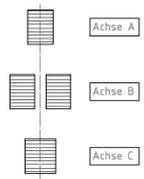
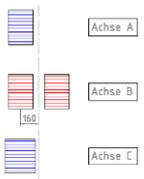
				
	Zentrisch	Reale Achsg.	Reale Achsg. & Verteilung nach Blab, $b_f = 3,5\text{ m}$	Reale Achsg. & Verteilung nach EN 1991-2
$\Delta\sigma_e$ [N/mm ²]	106,76	96,81	89,69	92,12
$\frac{\Delta\sigma_e}{\Delta\sigma_{e,zentrisch}}$ [-]	1	0,91	0,84	0,86

Tabelle 5: Detailpunkt D1a, Modell 1 - Ergebnisse $\Delta\sigma_e$ der schadensäquivalenten Einstufenkollektive

Detail D1b

Da die zentrische Überfahrt und die Berücksichtigung der realen Achsgeometrie am Detail 1b zu einer deutlich geringeren Ermüdungsschädigung führt, wurde von einer Tabellenschreibweise abgesehen. Das schadensäquivalente Einstufenkollektiv $\Delta\sigma_e$, unter Berücksichtigung realer Achsgeometrie und der Häufigkeitsverteilung nach Blab ($b_f = 4,0\text{ m}$), beträgt $\Delta\sigma_e = 39,77$ [N/mm²]

Detail D2

Tabelle 6 zeigt die Ergebnisse des Details D2. Bei diesem Detail sind die auftretenden maximalen Spannungsspiele infolge ELM4 kleiner als der Wert der Dauerfestigkeit ($\Delta\sigma_{\max} < \Delta\sigma_D$). Grundsätzlich gäbe es aus diesem Grund am Detail infolge ELM4 keine Schädigung. Um jedoch die Effekte realer Achsgeometrien und unterschiedliches Fahrspurverhalten aufzeigen zu können, erfolgte dennoch die Schadensakkumulation der einzelnen Kollektivteile (nur teilschädigende Wirkung) und Ermittlung von $\Delta\sigma_e$. Hier zeigt sich, dass die reale Achsgeometrie nur geringe Auswirkungen auf das Ermüdungsverhalten hat. Die Spurverteilungen wirken sich positiv aus.

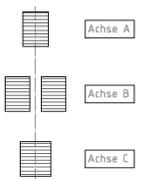
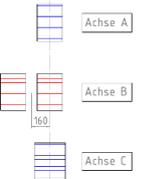
				
	Zentrisch	Reale Achsg.	Reale Achsg. & Verteilung nach Blab, $b_f = 3,5 \text{ m}$	Reale Achsg. & Verteilung nach EN 1991-2
$\Delta\sigma_e \text{ [N/mm}^2\text{]}$	35,54	35,20	28,66	30,81
$\frac{\Delta\sigma_e}{\Delta\sigma_{e,zentrisch}} \text{ [-]}$	1	0,99	0,81	0,87

Tabelle 6: Detailpunkt D2, Modell 1 - Ergebnisse $\Delta\sigma_e$ der schadensäquivalenten Einstufenkollektive

6.2 Ergebnisse für Modell 2 – Querträgerabstand $e_{QT} = 4 \text{ m}$

Detail D1a

Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse der schadensäquivalenten Einstufenkollektive $\Delta\sigma_e$. In der ersten Spalte ist $\Delta\sigma_e$ zufolge zentrischer Überfahrt zu sehen (Definition der zentrischen Überfahrt siehe Abbildung 31). In den anderen Spalten werden die Ergebnisse der Spannungskollektive mit modifizierten Werten der realen Achsgeometrie, der Spurverteilung nach Blab und nach EN 1991-2 dargestellt. Darin lässt sich klar herauslesen, dass sowohl die Reale Achsgeometrie, als auch die Spurverteilung positive Effekte auf die Ermüdungsbeanspruchung haben.

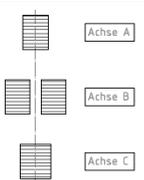
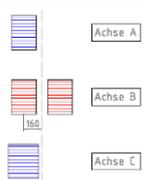
				
	Zentrisch	Reale Achsg.	Reale Achsg. & Verteilung nach Blab, $b_f = 3,5 \text{ m}$	Reale Achsg. & Verteilung nach EN 1991-2
$\Delta\sigma_e \text{ [N/mm}^2\text{]}$	102,98	91,10	81,84	85,45
$\frac{\Delta\sigma_e}{\Delta\sigma_{e,zentrisch}} \text{ [-]}$	1	0,88	0,79	0,83

Tabelle 7: Detailpunkt D1a, Modell 2 - Ergebnisse $\Delta\sigma_e$ der schadensäquivalenten Einstufenkollektive

Detail D1b

Da die zentrische Überfahrt und die Berücksichtigung der realen Achsgeometrie am Detail D1b zu einer deutlich geringeren Ermüdungsschädigung führt, wurde von einer Tabellenschreibweise abgesehen. Das schadensäquivalente Einstufenkollektiv $\Delta\sigma_e$, unter Berücksichtigung realer Achsgeometrie und der Häufigkeitsverteilung nach Blab ($b_f = 4,0$ m), beträgt $\Delta\sigma_e = 13,63$ [N/mm²]

Detail D2

Tabelle 8 zeigt die Ergebnisse des Details D2. Bei diesem Detail sind die auftretenden maximalen Spannungsspiele infolge ELM4 kleiner als der Wert der Dauerfestigkeit ($\Delta\sigma_{\max} < \Delta\sigma_D$). Grundsätzlich gäbe es aus diesem Grund am Detail infolge ELM4 keine Schädigung. Um jedoch die Effekte realer Achsgeometrien und unterschiedliches Fahrspurverhalten aufzeigen zu können, erfolgte dennoch die Schadensakkumulation der einzelnen Kollektivteile (nur teilschädigende Wirkung) und Ermittlung von $\Delta\sigma_e$. Hier zeigt sich, dass die Reale Achsgeometrie nur geringe Auswirkungen auf das Ermüdungsverhalten hat. Die Spurverteilungen wirken sich positiv aus.

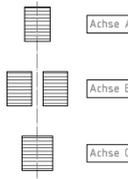
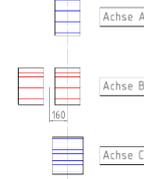
				
	Zentrisch	Reale Achsg.	Reale Achsg. & Verteilung nach Blab, $b_f = 3,5$ m	Reale Achsg. & Verteilung nach EN 1991-2
$\Delta\sigma_e$ [N/mm ²]	40,58	37,56	33,96	35,19
$\frac{\Delta\sigma_e}{\Delta\sigma_{e,zentrisch}}$ [-]	1	0,93	0,84	0,87

Tabelle 8: Detailpunkt D2, Modell 2 - Ergebnisse $\Delta\sigma_e$ der schadensäquivalenten Einstufenkollektive

6.3 Resümee

In den Ergebnissen zeigt sich, dass die positive Wirkung der realen Achsgeometrie und der Spurverteilung sehr vom untersuchten Detailpunkt abhängig ist. Während Detail D1a und D2 sehr positiv beeinflusst werden, mit einer Reduzierung des schadensäquivalenten Einstufenkollektives $\Delta\sigma_e$ von bis zu 16 % (D1a) und 19 % (D2) bei Modell 1 und 21 % (D1a) und 16 % (D2) bei Modell 2, sind die Effekte bei Detailpunkt D1b gänzlich anders. Bei reiner zentrischer Überfahrt (Definition siehe Abbildung 31) entsteht am Detailpunkt D1b nahezu keine ermüdungswirksame Beanspruchung. Erst durch die Spurverteilung entstehen deutlich höhere Spannungsspiele als bei rein zentrischer Überfahrt. Dies führt dazu, dass die schädigende Wirkung erst bei abwechselnder Spurbeanspruchung entsteht, während bei rein zentrischer Überfahrt nahezu keine schädigende Wirkung eintritt.

7 Literaturverzeichnis

- [1] *Sedlacek G., Paschen M.*; „Untersuchung zur nachhaltigen Instandsetzung von orthotropen Platten“ in: Instandsetzung orthotroper Platten: Manuskript zum Expertengespräch, 19.10.2005
- [2] *Wolchuk R.*: „*Orthotrope Fahrbahnplatte – Entwicklung und Möglichkeiten für die Zukunft*“ in Stahlbau 76, Heft 7, 2007
- [3] Unterweger H., Nguyen V. T., Freytag B.; „Verstärkung orthotroper Stahlbarbahnplatten mit Hochleistungsbetonen zur Erzielung einer deutlich erhöhten Restlebensdauer“, FFG-Forschungsprojekt Nr. 840487, 2015
- [4] ÖNORM EN 1991-2: Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke Teil 2 Verkehrslasten auf Brücken, 01.03.2012
- [5] ÖNORM EN 1993-1-1: Eurocode 3- Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, 15.10.2014
- [6] ÖNORM EN 1993-1-9: Eurocode 3 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten Teil 1-9: Ermüdung, 01.11.2005
- [7] ÖNORM EN 1993-2: Eurocode 3 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 2: Stahlbrücken, 01.04.2007
- [8] *Blab R.*: „Die Fahrspurverteilung als Einflussgröße bei der Bemessung des Straßenoberbaus“, Dissertation am Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung an der TU Wien, 1995
- [9] *Hobbacher A.*: “Recommendations for Fatigue Design of welded Joints and Components”, International Institute of Welding, doc. XIII-2151r4-07/XV-1254r-07, Oktober.2008
- [10] Mercedes Benz, Abtg. (dept.) TE/SOD 70546 Stuttgart
- [11] *Ogris A.*: „Betriebsfaktoren zur Ermüdungsbeanspruchung von stählernen orthotropen Fahrbahnplatten bei Straßenbrücken“ Masterarbeit am Institut für Stahlbau an der TU Graz, 2016
- [12] Abaqus/CAE 6.10-1, Softwarepaket, Dassault Systèmes Simulia Corp., 2010
- [13] *De Jong F.B.P.*: “Renovation techniques for fatigue cracked orthotropic steel bridge decks”, Dissertation, 2006
- [14] *Kolstein M.H.*: “Fatigue Classificatin of Welded Joints on Orthotropic Steel Bridge Decks”, Dissertation, 2007
- [15] *Sedlacek G., Eisel H., Hensen W., Kühn B., Paschen M.*: “Leitfaden zum DIN Fachbericht 103: Stahlbrücken”, Berlin. Ernst & Sohn Verlag, März 2003.
- [16] *Novak F.*: “Lastmodelle für den Ermüdungsnachweis von orthotropen Fahrbahnplatten bei Straßenbrücken” Masterarbeit am Institut für Stahlbau an der TU Graz, 2013

Anhang A

A Modell 1: Orthotrope Platte – Querträgerabstand $e_{QT}=2m$

Als Vorlage dieses Modells diente die „Stahlhochstraße über den neuen Hauptbahnhof in Ludwigshafen“.

A.1 Geometrie

Das Brückendeck besteht aus zwei Hauptträgern, fünf Querträgern bzw. Querrippen und zwölf trapezförmige Längsrippen als Grundgerüst, das vom Deckblech bedeckt ist. Abbildung 54 zeigt den Grundriss des Modells. Die Abbildung 55 und Abbildung 56 stellen die Schnitte A-A und B-B dar. Abbildung 57 zeigt eine genaue Darstellung der Rippen.

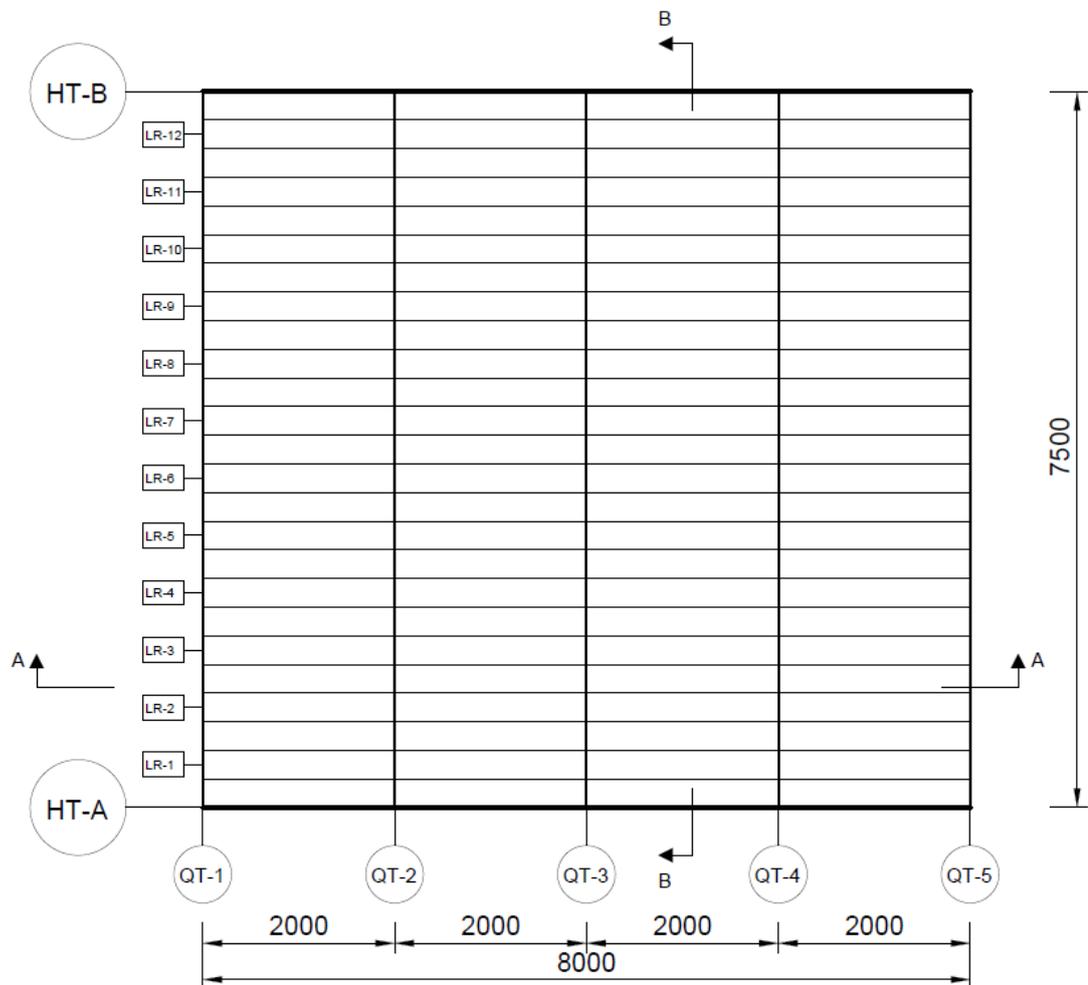


Abbildung 54: Modell 1 – Grundriss des Deckblechs

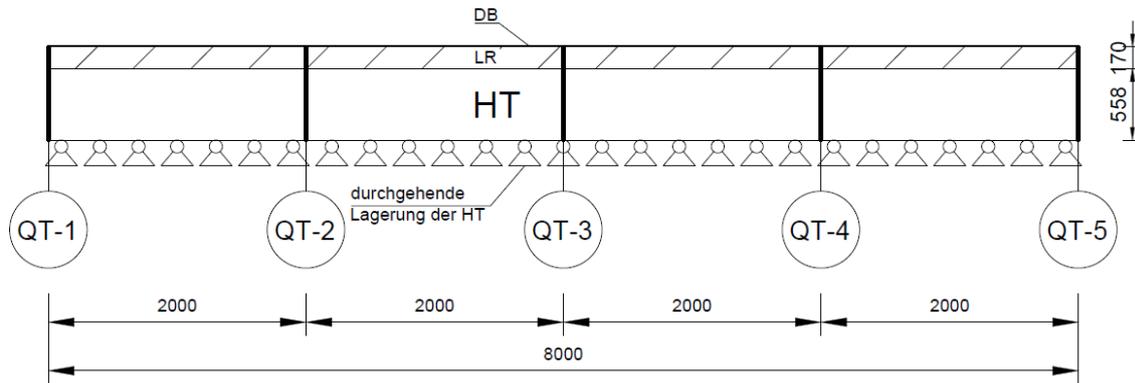


Abbildung 55: Modell 1 – Schnitt A-A

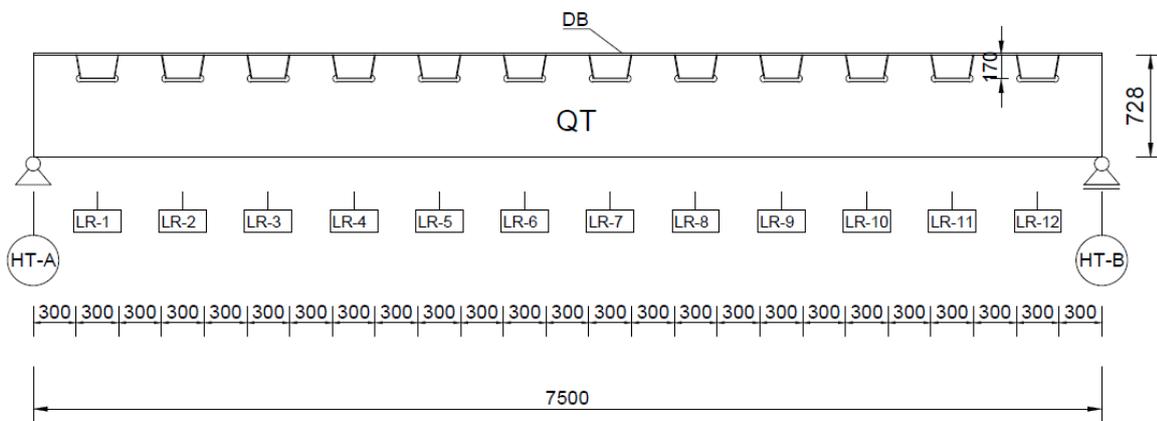


Abbildung 56: Modell 1 – Schnitt B-B

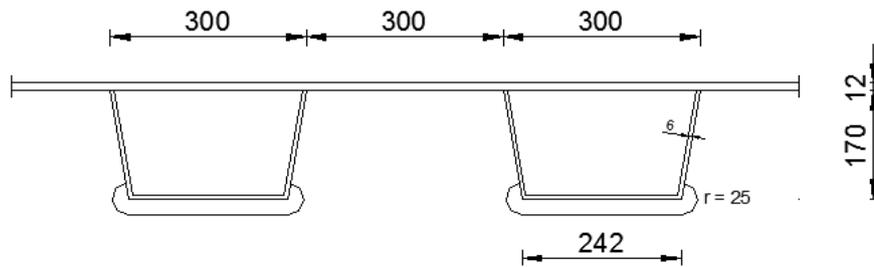


Abbildung 57: Modell 1 – Abmessungen der Längsrippen

A.2 Finite-Elemente-Modellierung

Die FE-Modellierung erfolgte im Programm Abaqus [12]. Für Modell 1 wurden 2 Varianten im Programm Abaqus modelliert, beide entsprechen den Geometrien aus Kapitel A.1:

Variante A: alle Rippen wurden als Schalenelemente modelliert, die Spannungen der Details 1a und 2 wurden damit ermittelt. Die Definition der Details 1a und 2 sind in Abschnitt 4 zu finden.

Variante B: Längsrippe 2 wurde als Volumenelement modelliert um genauere Spannungswerte des Details 1b zu erhalten. Die Definition von Detail 1b ist in Abschnitt 4.1 zu finden.

Im Folgenden werden die Modellparameter der Variante A erläutert.

A.2.1 Materialeigenschaften

Das gesamte Modell des Brückenelements wurde aus Stahl modelliert. Es wurden folgende Eigenschaften angewandt:

- Elastizitätsmodul $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$
- Querdehnungszahl/Poisson'sche Zahl $\nu = 0,3$

A.2.2 Bauteileigenschaften - Variante A

Das Brückendeck wurde aus einzelnen Bauteilen modelliert. Diese können im Programm Abaqus durch die Modellierungsart als Volumen-, Schalen- und Stabelemente dargestellt werden. Tabelle 9 zeigt einen Überblick über die Modellierungsarten der Bauteile.

Bauteile	Dicke	Element	Abbildung
Deckblech	$t_{DB} = 12 \text{ mm}$	solid	Abbildung 58
Schweißnähte LR an DB	$t_{SN} = 6 \text{ mm}$	solid	Abbildung 59
Hauptträger	$t_{HT} = 12 \text{ mm}$	shell	Abbildung 60
Querträger	$t_{QT} = 8 \text{ mm}$	shell	Abbildung 61
Längsrippen	$t_{LR} = 6 \text{ mm}$	shell	Abbildung 62
Querträger Untergurt	160x8	beam	Abbildung 63

Tabelle 9: Übersicht der Bauteile und ihrer Eigenschaften

In Abbildung 58 bis Abbildung 63 findet man Darstellungen der Bauteile zur Übersicht. Die genauen Geometrien sind Kapitel A.1 zu entnehmen.

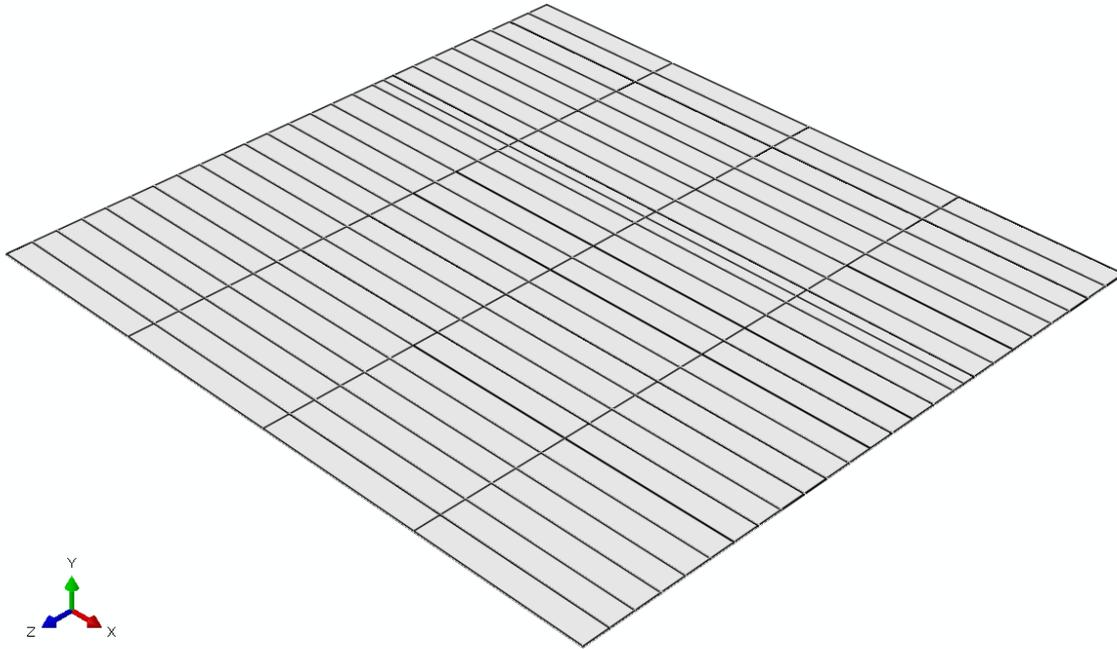


Abbildung 58: Modell 1 – Deckblech

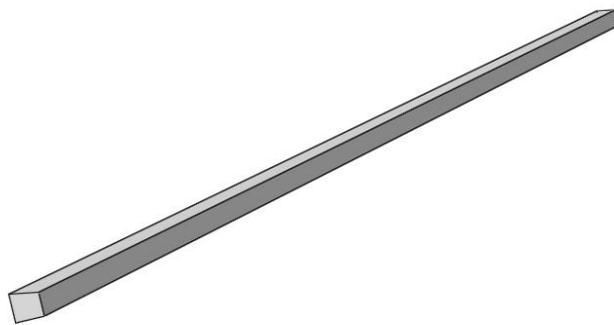


Abbildung 59: Modell 1 – Schweißnaht

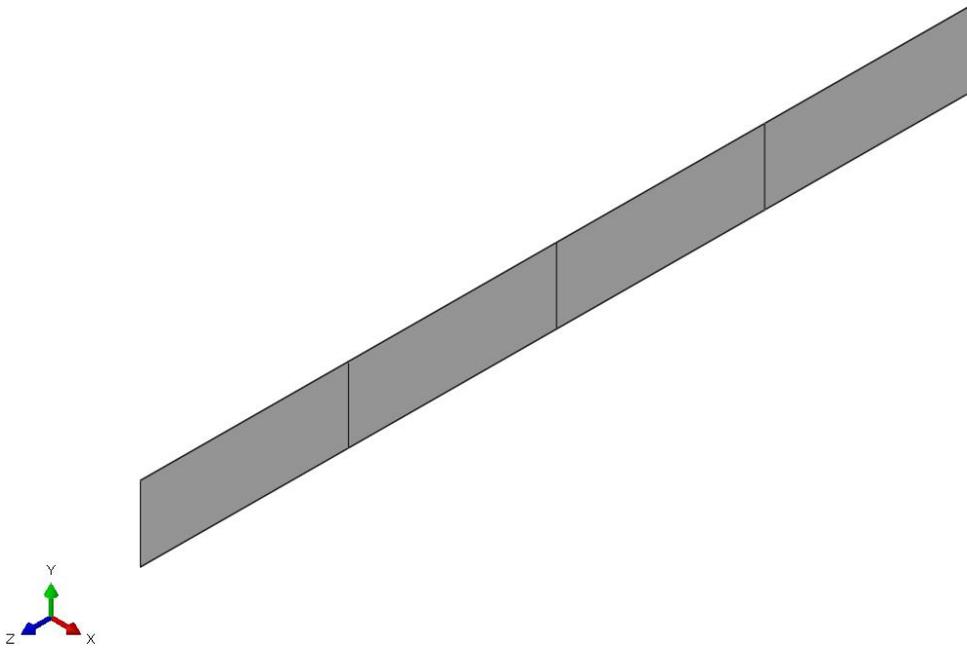


Abbildung 60: Modell 1 – Hauptträger

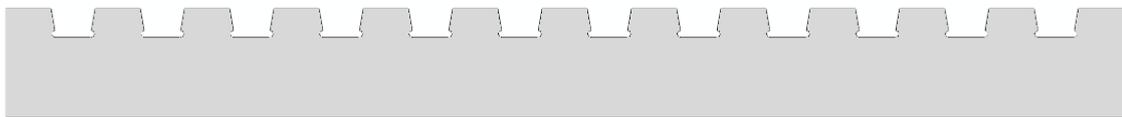


Abbildung 61: Modell 1 – Querträger

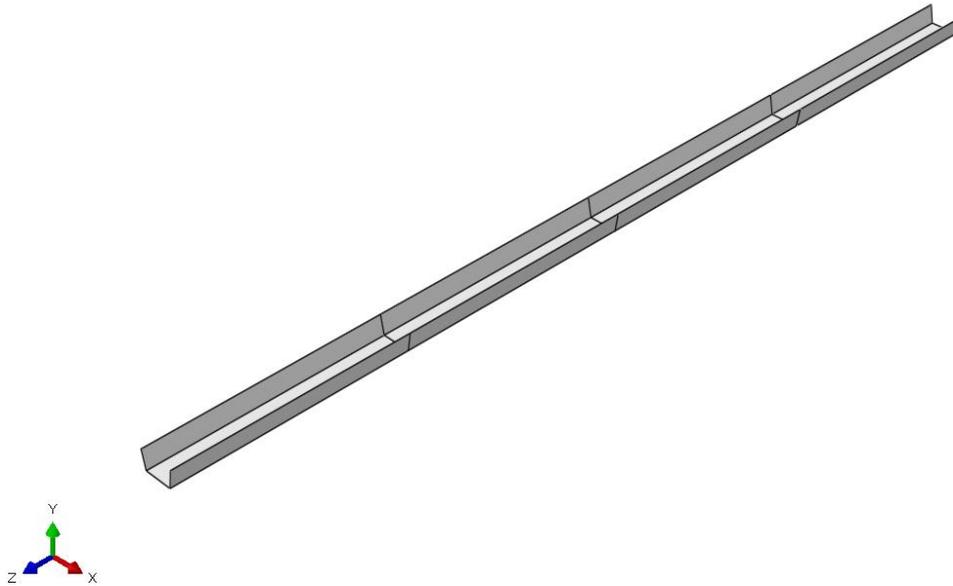


Abbildung 62: Modell 1 – Längsrippe



Abbildung 63: Modell 1 – Querträger Untergurt

A.2.3 Netzgenerierung – Variante A

Abbildung 64 zeigt die Netzgenerierung des Modells 1. Das Deckblech wurde in einen inneren, feinvernetzten Part und in einen äußeren, grob vernetzten Part geteilt. Desweiteren wurde an der Längsrippe 2 mittig eine Netzfeinheit von 10×10 mm verwendet. Die vorgegebenen Netzfeinheiten sind ebenfalls Abbildung 64 zu entnehmen, diese können allerdings aufgrund der automatischen Optimierung variieren. Abbildung 65 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt des verfeinerten Netzes in Längsrippe 2.

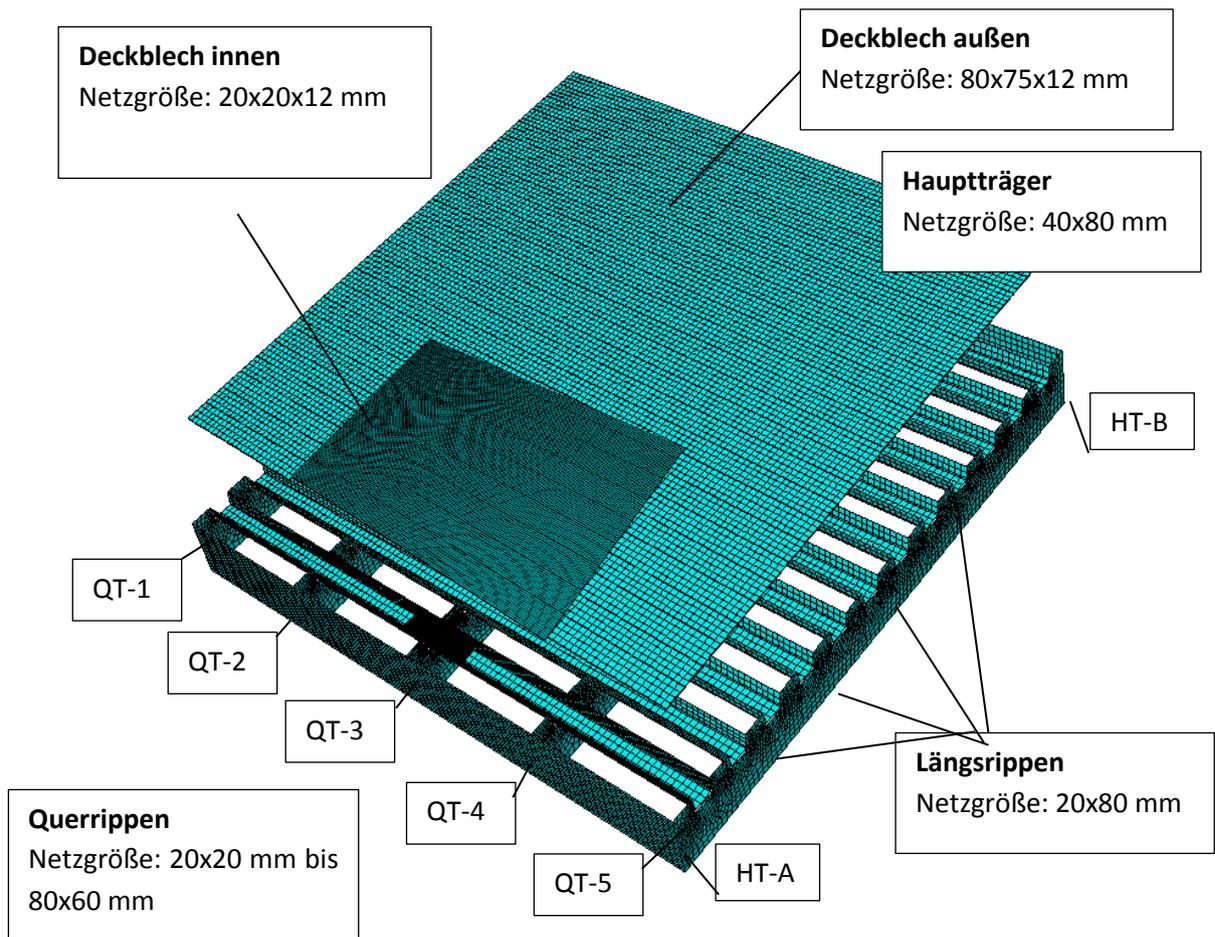


Abbildung 64: Bauteile mit verschiedenen Netzfeinheiten

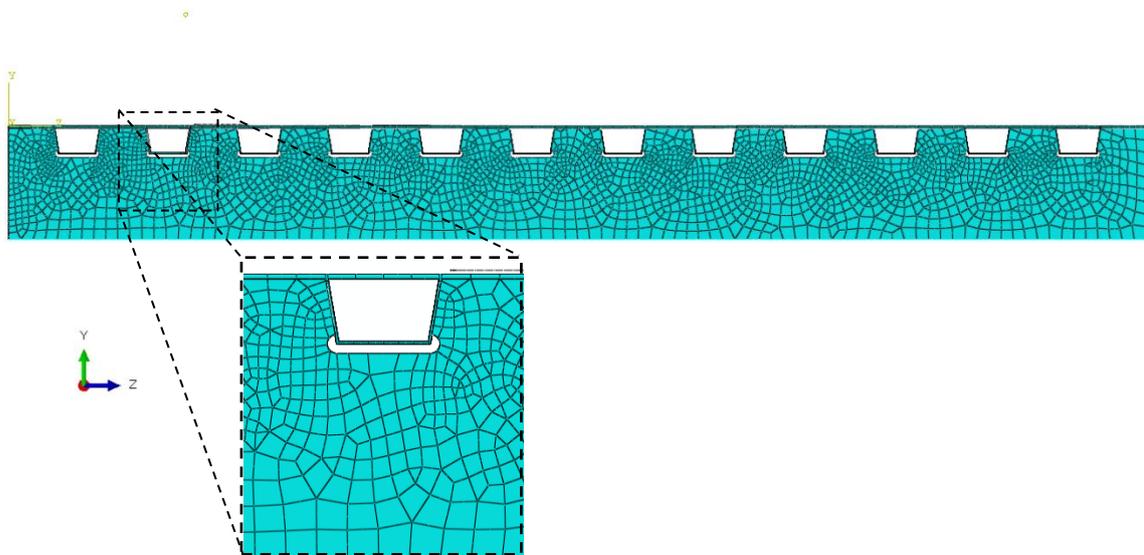


Abbildung 65: Netzverfeinerung an Längsrippe 2

A.2.4 Bauteilkopplungen – Variante A

Die einzelnen Bauteile werden durch Kopplungen miteinander verbunden. In Tabelle 10 werden die Verbindungstypen der Bauteile zueinander aufgelistet.

Bauteil 1	Bauteil 2	Kopplungstyp
Hauptträger	Querträger, Längsrippe	Merge
Außenseite Deckblech	Schweißnähte	Merge
Innenseite Deckblech	Außenseite Deckblech	Tie
Rippen schalenförmig	Deckblech	Shell-to-solid
Querträger	QT-Untergurt	Tie

Tabelle 10: Übersicht der Bauteilkopplungen

Dabei bezeichnet man als „merge“ die Verbindung zwischen Elementen, die damit starr zusammengefügt werden, und so als ein Bauteil gelten. „Tie“ ist die starre Verbindung zwischen zwei Elementen, sie bleiben allerdings als einzelne Bauteile bestehen. Um eine Kopplung zwischen Schalenelement und Volumenelement herzustellen ist die Verbindung „shell-to-solid“ notwendig.

A.2.5 Variante B

Um bei Detail 1b genauere Ergebnisse zu erzielen wurde die Längsrippe 2 in einem weiteren Model als Volumenelement (siehe Abbildung 66) modelliert. Da das Model in allen Geometrien, Materialeigenschaften und Verbindungen der Variante A entspricht wird nur auf die Besonderheiten der Variante B eingegangen.

Die Kopplung zwischen Längsrippe 2 und Deckblech erfolgte mittels der Funktion „Tie“.

Die Netzgenerierung im mittleren Bereich der Rippe beträgt $20 \times 20 \times 6$ mm und im äußeren Bereich $100 \times 100 \times 6$ mm.

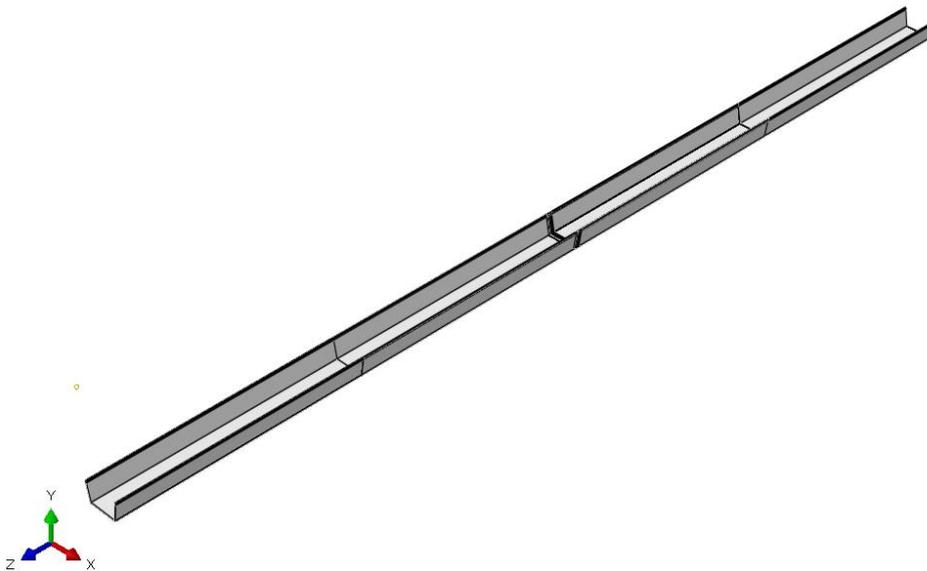


Abbildung 66: Längsrippe 2 als Solid-Element

A.3 Einflusslinien

In Abbildung 67 bis Abbildung 84 werden die jeweiligen Einflusslinien zu allen drei Details im Modell 1, sowohl in X- als auch in Y-Richtung dargestellt. Zuerst wurde ein Lastenzug in Längsrichtung zentrisch über den Rippensteg generiert. Die Auswertung der Spannung erfolgte für jede Laststellung am jeweiligen Detailpunkt. An der Laststellung mit der maximalen Spannungswirkung wurde dann im selben Verfahren die Einflusslinie in Brückenquerrichtung erstellt.

x..... Brückenlängsrichtung

y..... Brückenquerrichtung

A.3.1 Detail D1a – Einflusslinie in Brückenlängsrichtung

Abbildung 67 bis Abbildung 69 zeigen, dass die maßgebende Laststellung genau über dem Detailpunkt 1a liegt. In den folgenden Grafiken ist der Querträger 2 und 4 jeweils mit einer dickeren vertikalen Linie bei $x = -230$ und $x = 170$ gekennzeichnet.

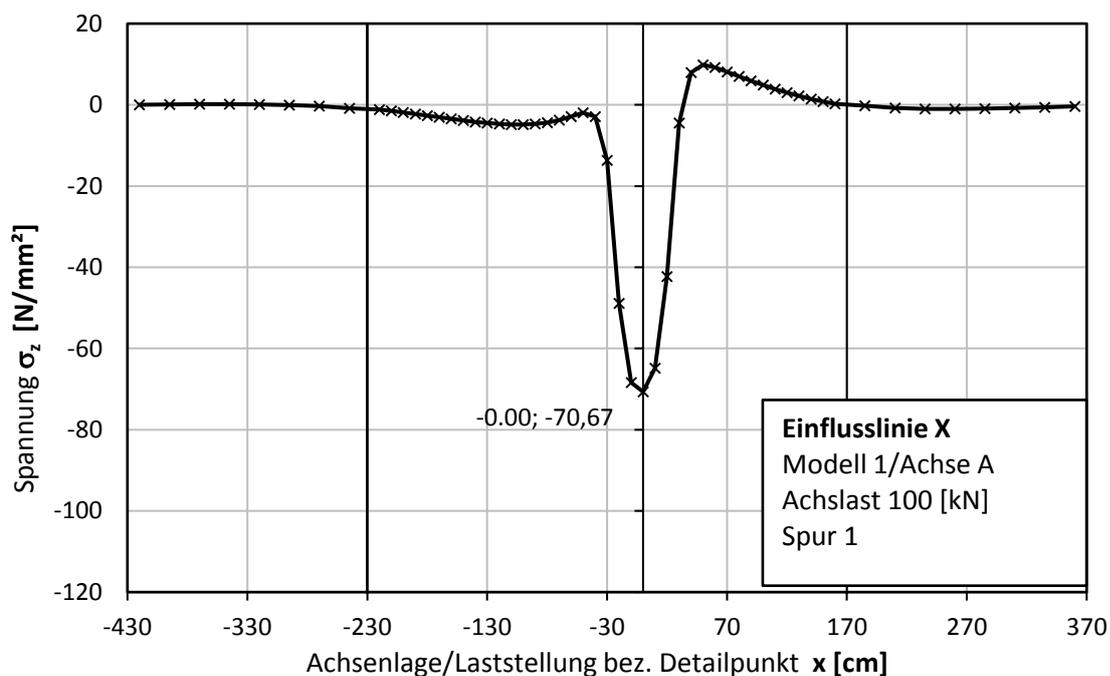


Abbildung 67: Längseinfluss Achse A im Detail 1a, Modell1

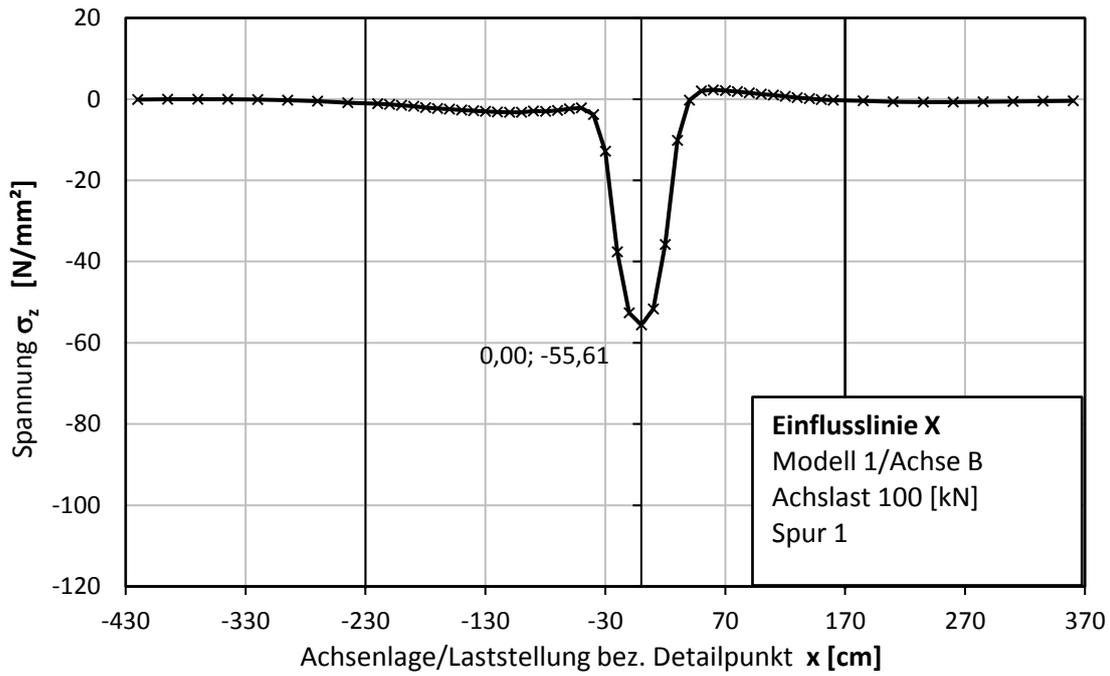


Abbildung 68: Längseinfluss Achse B im Detail 1a, Modell1

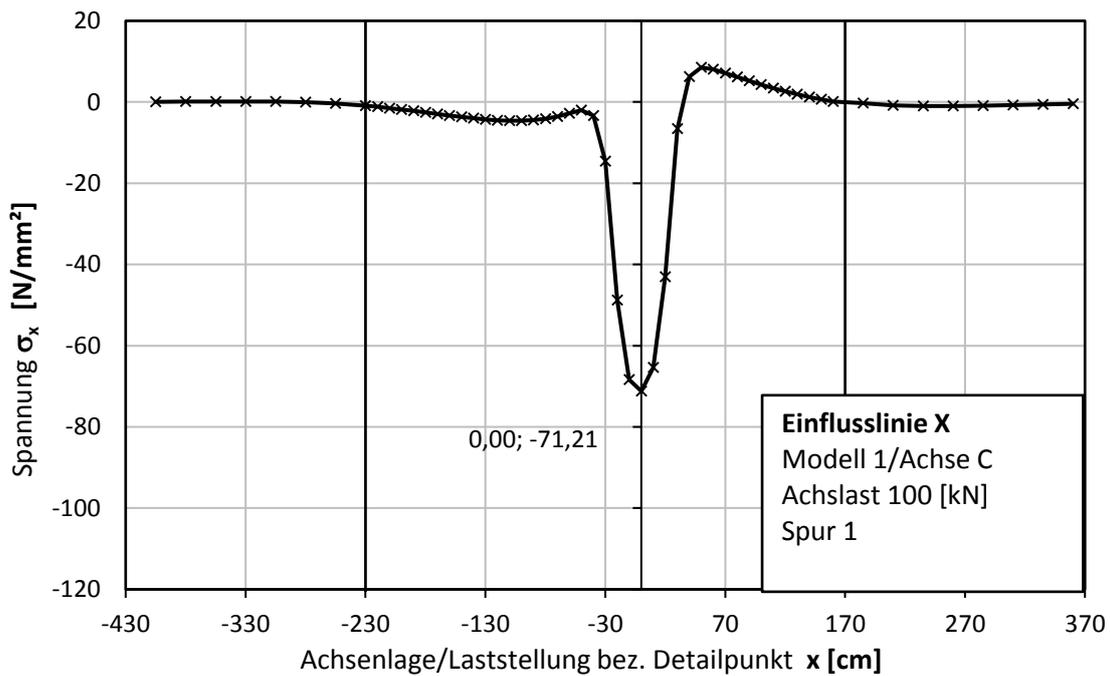


Abbildung 69: Längseinfluss Achse C im Detail 1a, Modell1

A.3.1 Detail D1a – Einflusslinie in Brückenquerrichtung

In Abbildung 70 und Abbildung 71 sind die einzelnen Quereinflusslinien der Achse A bzw. B dargestellt. Die Werte der Ordinate wurden normiert. In Abbildung 72 ist die Quereinflusslinie beider Achsen für Detail D1a dargestellt. Hier wird durch die Verschiebung der Achse A um 16 cm die reale Achsgeometrie dargestellt. Die Achse B bleibt zentrisch, da sie höhere Spannungsschwingspiele verursacht. Somit führt diese Berechnung zu konservativeren Ergebnissen.

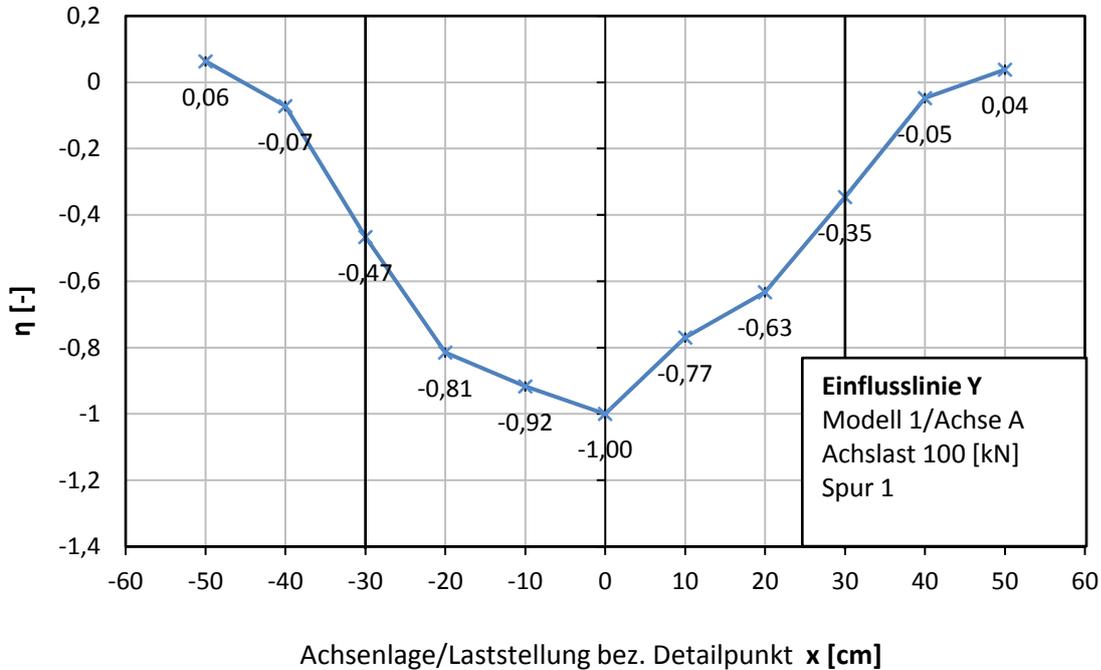


Abbildung 70: Quereinflusslinie Achse A Detail 1a, Modell 1

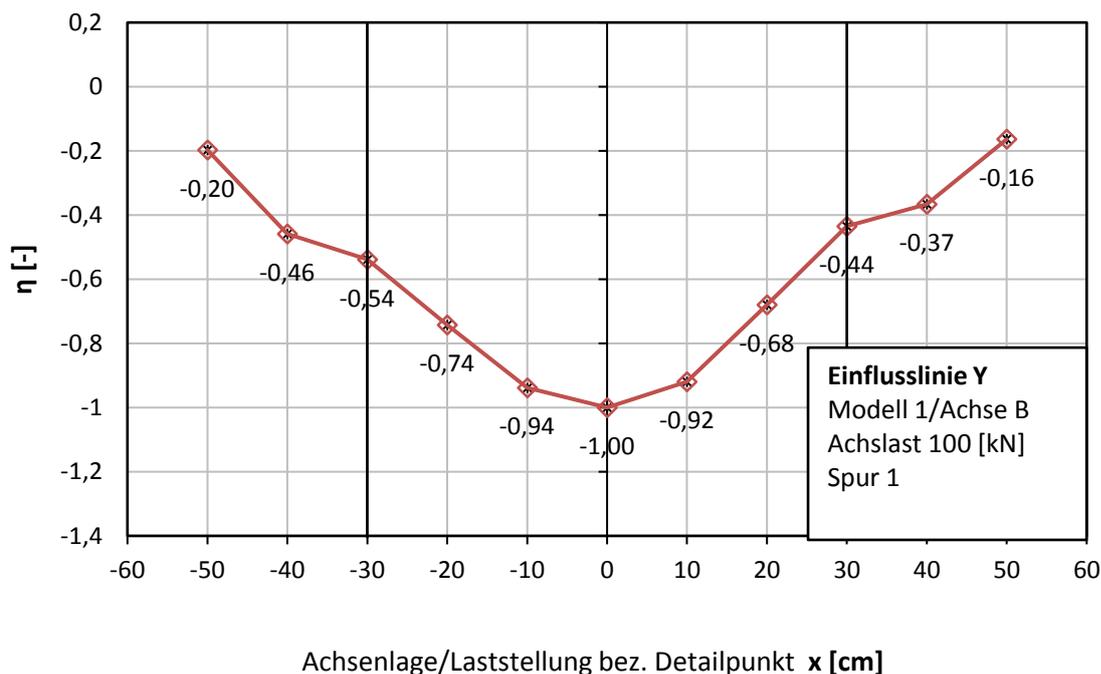


Abbildung 71: Quereinflusslinie Achse B Detail 1a, Modell 1

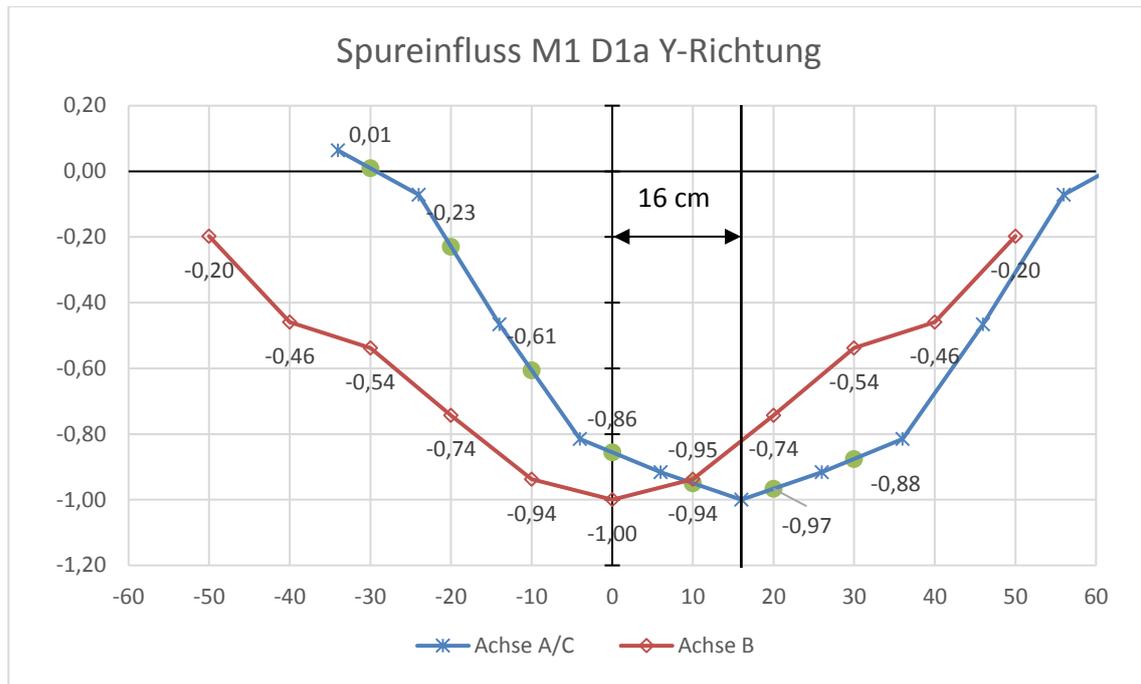


Abbildung 72: Quereinflusslinien Detail 1a, Modell 1

A.3.2 Detail D1b – Einflusslinie in Brückenlängsrichtung

Abbildung 73 bis Abbildung 75 zeigen, dass die maximale Laststellung genau über dem Detailpunkt 1a liegt. In den folgenden Grafiken ist der Querträger 2 und 4 jeweils mit einer dickeren vertikalen Linie bei $x = -230$ und $x = 170$ gekennzeichnet.

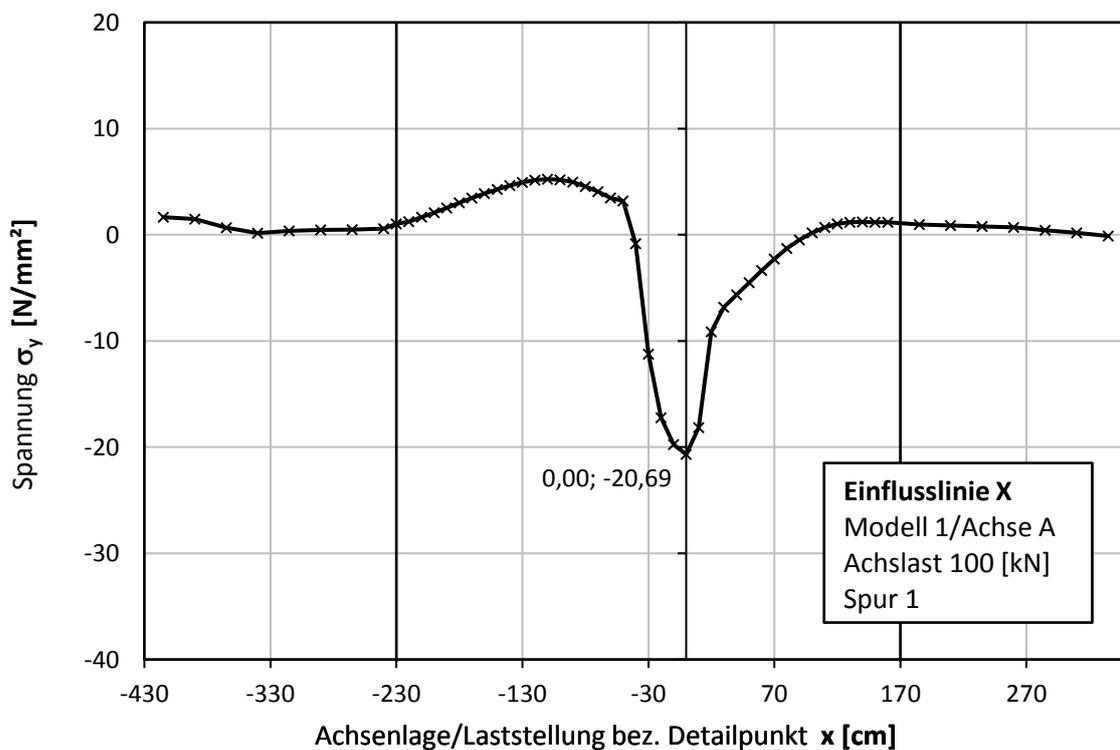


Abbildung 73: Längseinfluss Achse A im Detail 1b, Modell 1

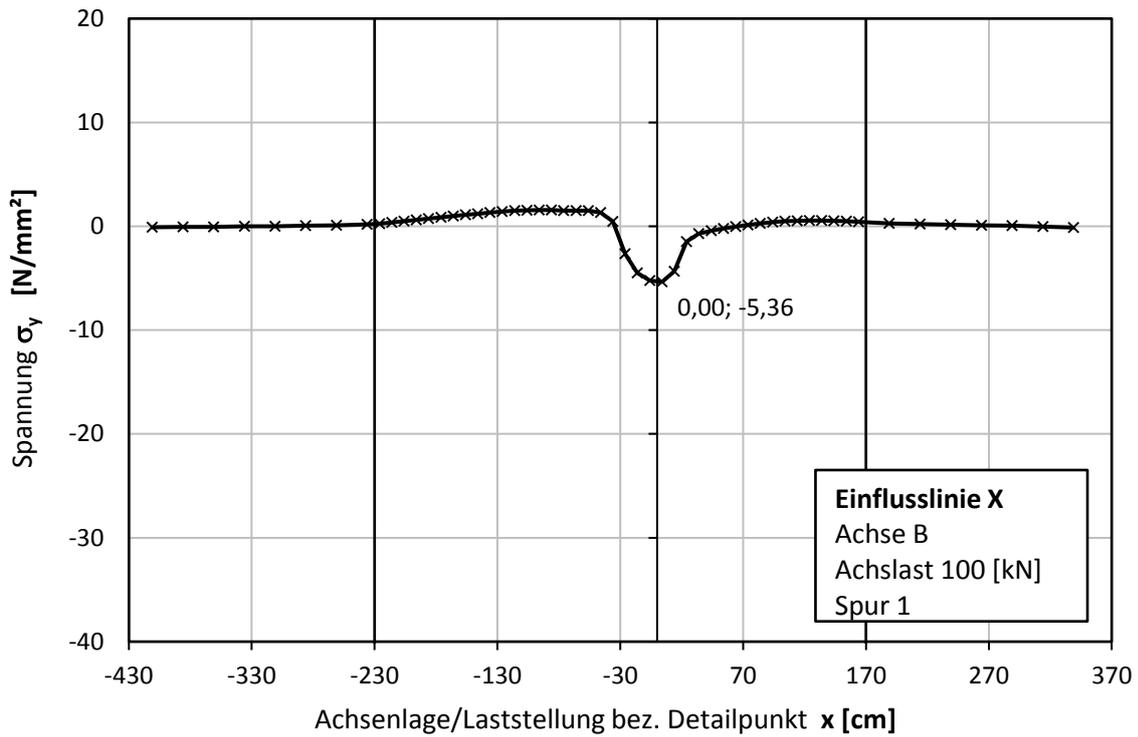


Abbildung 74: Längseinfluss Achse B im Detail 1b, Modell1

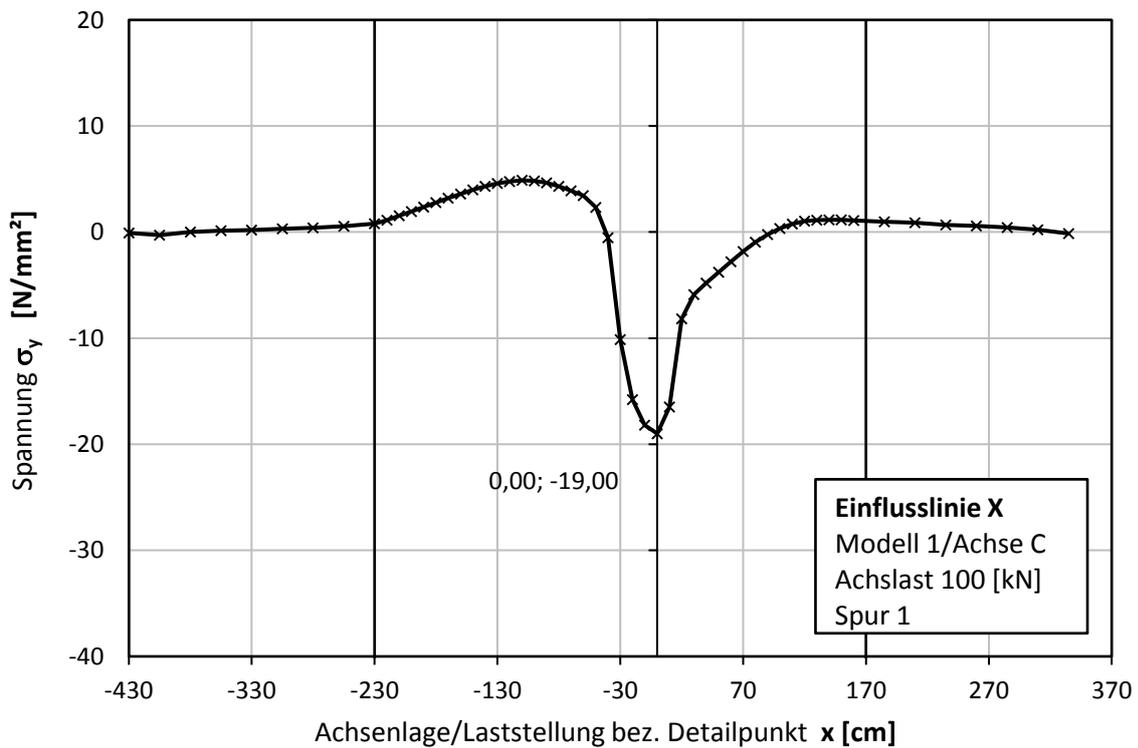


Abbildung 75: Längseinfluss Achse C im Detail 1b, Modell1

A.3.3 Detail D1b – Einflusslinie in Brückenquerrichtung

In Abbildung 76 und Abbildung 77 sind die einzelnen Quereinflusslinien der Achse A bzw. B dargestellt. Die Werte der Ordinate wurden normiert. In den Abbildung 78 ist die Quereinflusslinie beider Achsen für Detail D1b dargestellt. Hier wird durch die Verschiebung der Achse B um 16 cm die reale Achsgeometrie dargestellt. Die Achsen A und C bleiben zentrisch, da sie höhere Spannungsschwänge verursachen und somit konservativere Ergebnisse entstehen.

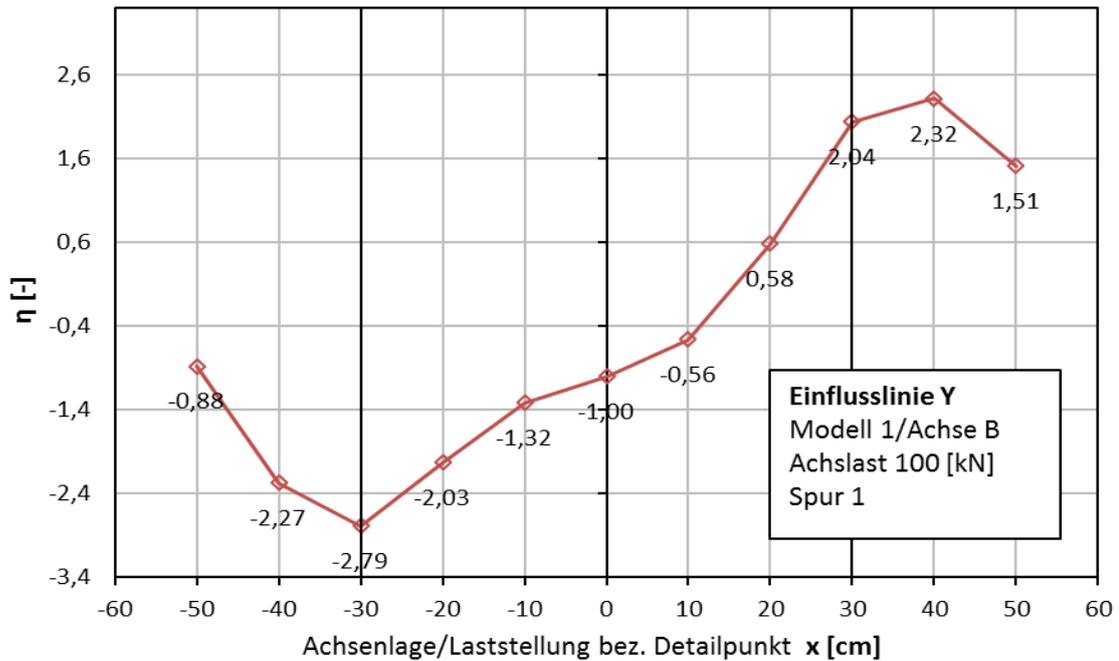


Abbildung 76: Quereinflusslinie Achse A Detail 1b, Modell 1

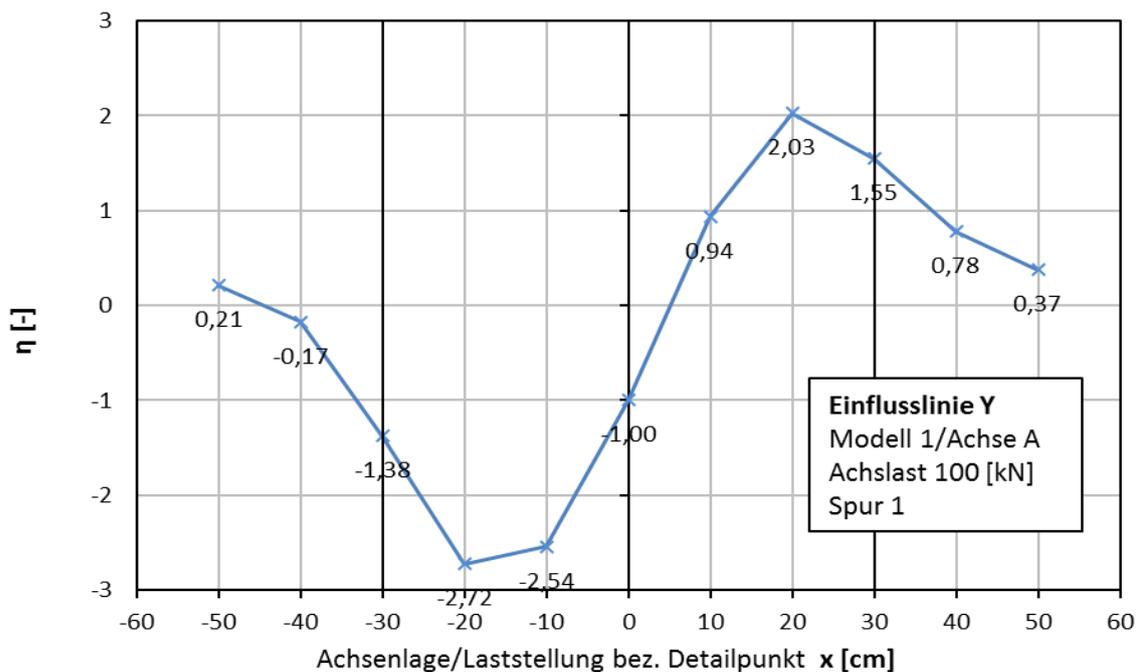


Abbildung 77: Quereinflusslinie Achse B Detail 1b, Modell 1

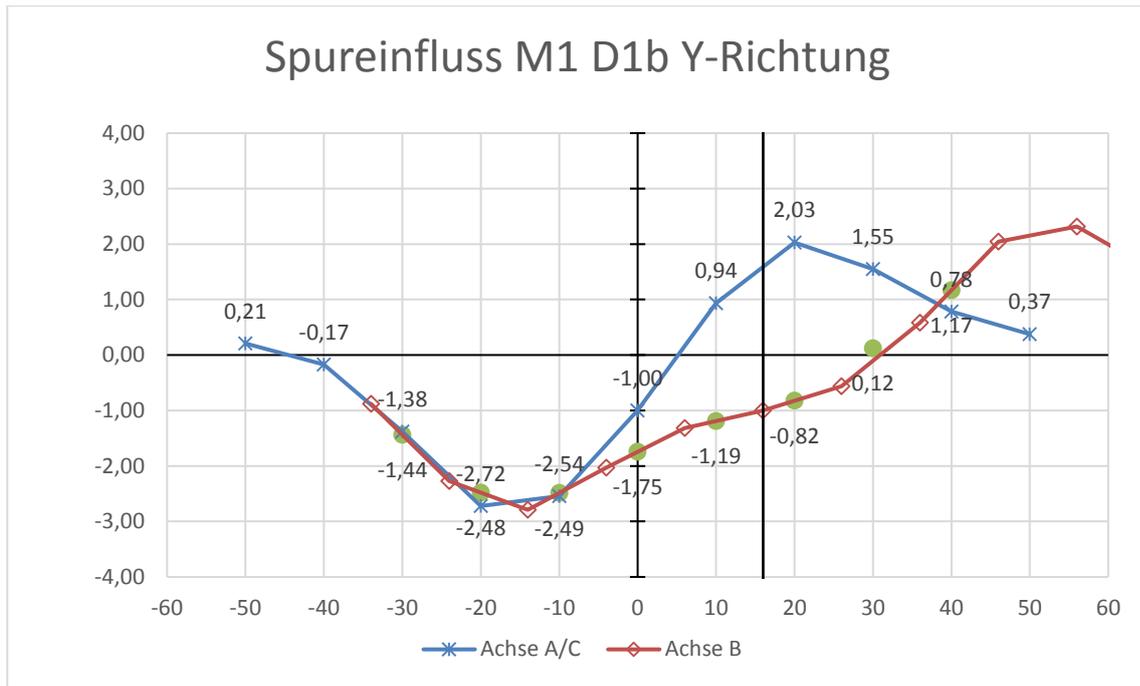


Abbildung 78: Quereinflusslinien Detail 1b, Modell 1

A.3.4 Detail 2 – Einflusslinie in Brückenlängsrichtung

Abbildung 79 bis Abbildung 81 zeigen, dass die maximale Laststellung von Detailpunkt 2 80 cm in Längsrichtung entfernt ist. In den folgenden Grafiken ist der Querträger 2 und 4 jeweils mit einer dickeren vertikalen Linie bei $x = -200$ und $x = 200$ gekennzeichnet.

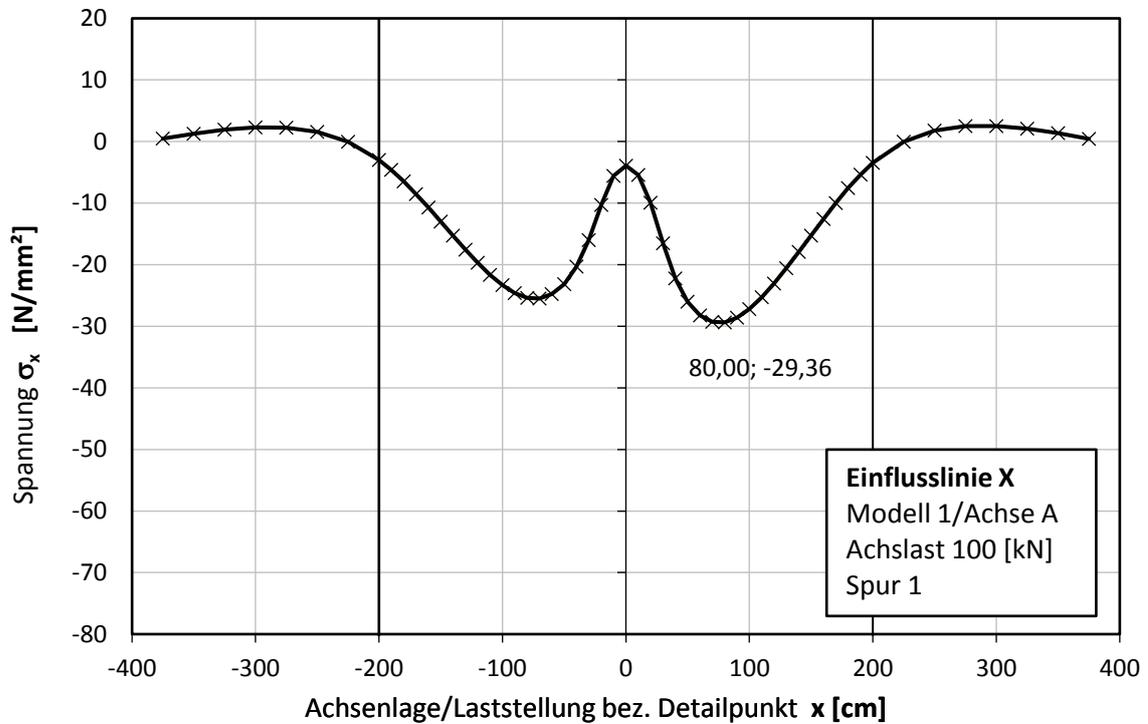


Abbildung 79: Längseinfluss Achse A im Detail 2, Modell1

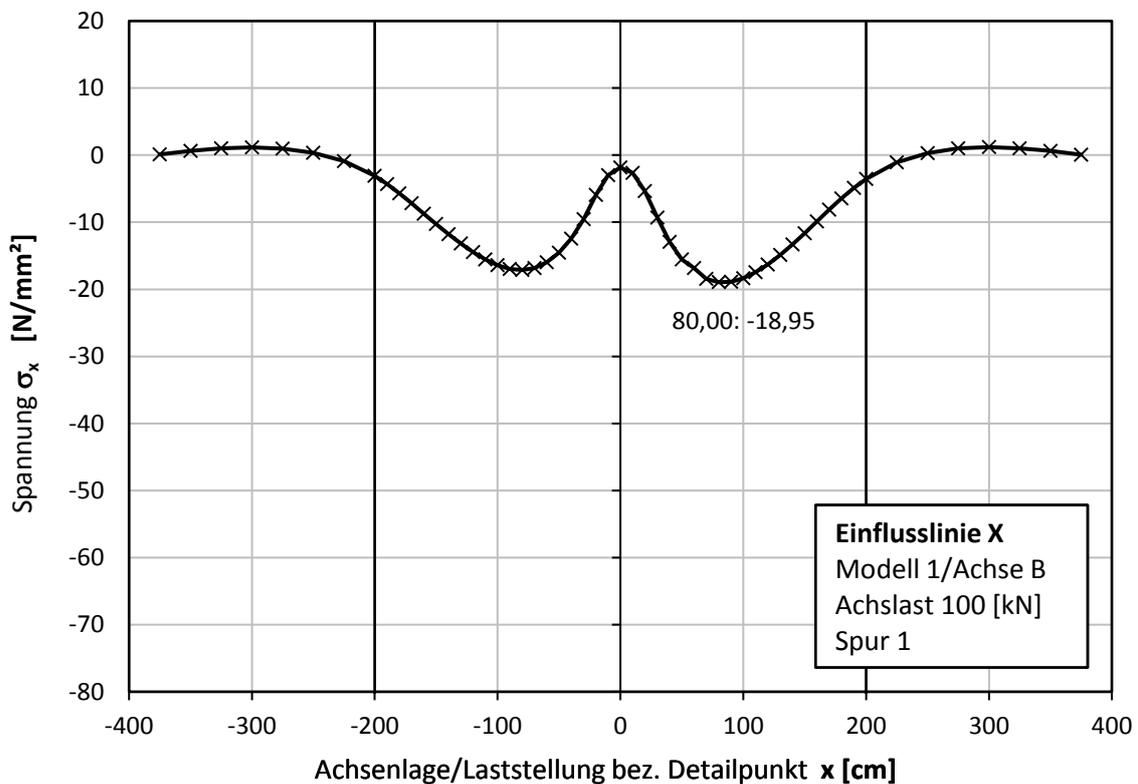


Abbildung 80: Längseinfluss Achse B im Detail 2, Modell1

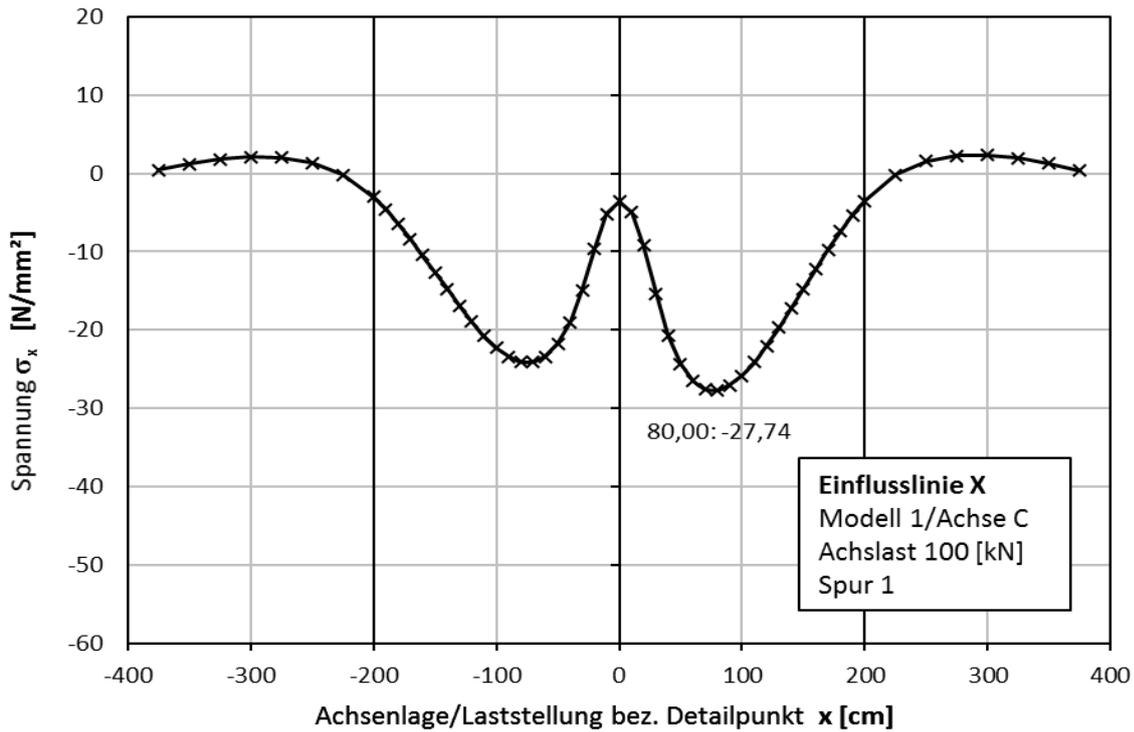


Abbildung 81: Längseinfluss Achse C im Detail 2, Modell1

A.3.5 Detail 2 – Einflusslinie in Brückenquerrichtung

In den Abbildung 82 und Abbildung 83 sind die einzelnen Quereinflusslinien der Achse A bzw. B dargestellt. Die Werte der Ordinate wurden normiert. In Abbildung 84 ist die Quereinflusslinie beider Achsen für Detail D1b dargestellt. Hier wird durch die Verschiebung der Achse B um 16 cm die reale Achsgeometrie dargestellt. Die Achsen A und C bleiben zentrisch, da sie höhere Spannungsschwänge verursachen. Somit führt diese Berechnung zu konservativeren Ergebnissen.

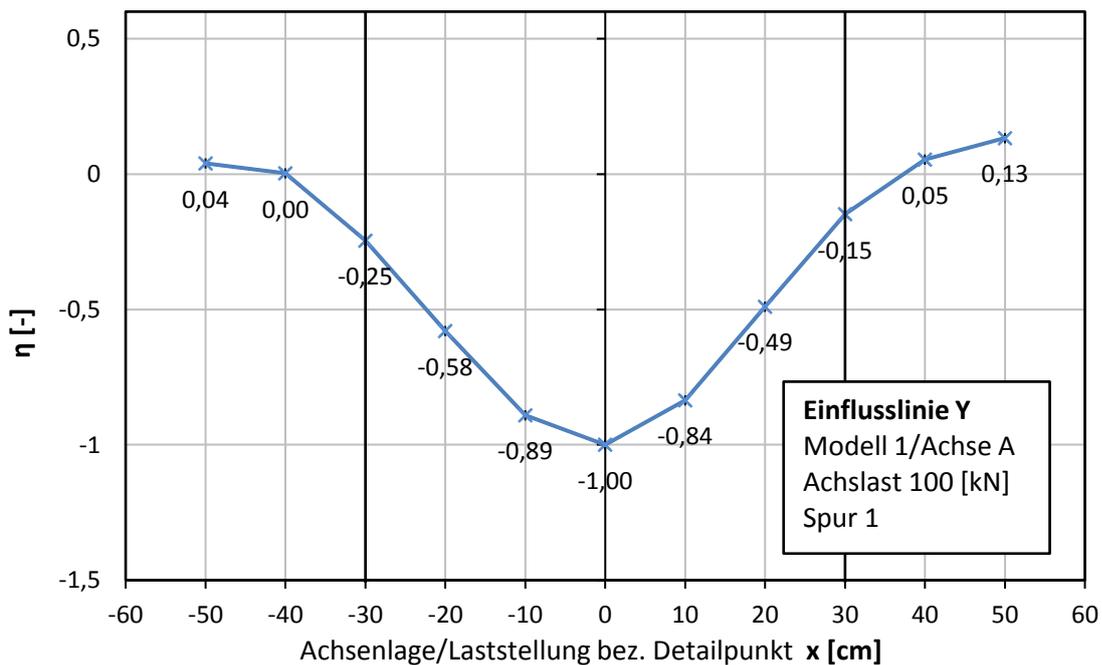


Abbildung 82: Quereinflusslinie Achse A Detail 2, Modell 1

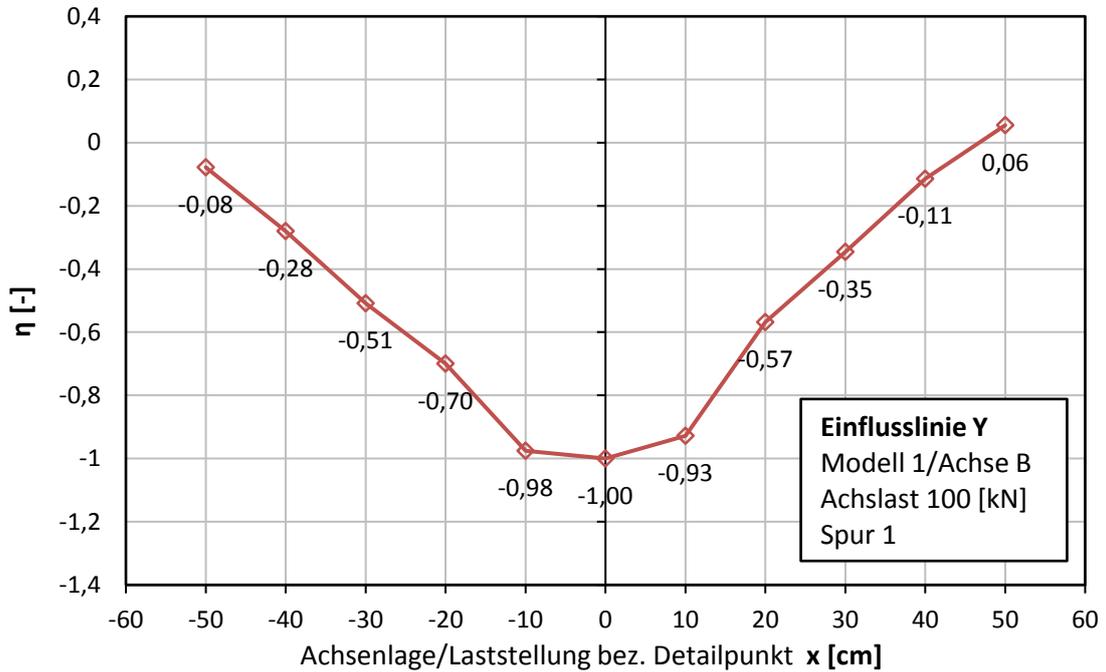


Abbildung 83: Quereinflusslinie Achse B Detail 2, Modell 1

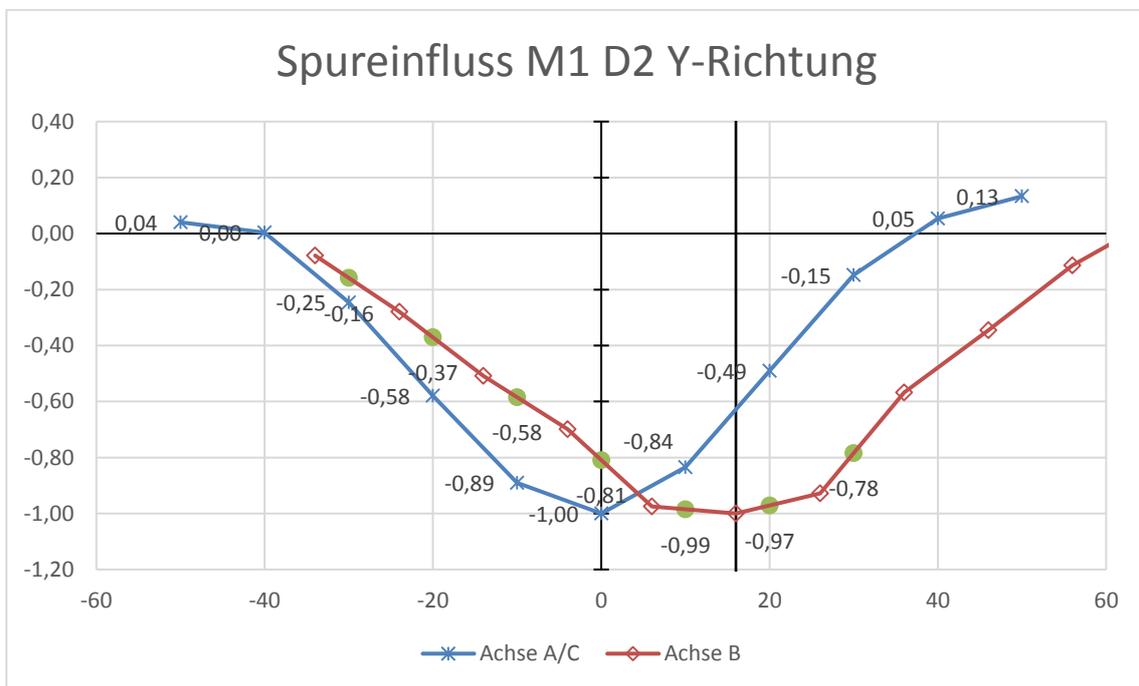


Abbildung 84: Quereinflusslinien Detail 2, Modell 1

A.4 Spannungsverläufe und Lastspiele

Die Ermittlung der Spannungsverläufe erfolgte analog zum Beispiel aus Kapitel 5. Es wurde das Tabellenprogramm Microsoft Excel verwendet um die Längseinflusslinien der einzelnen Achslasten zu skalieren und zu überlagern.

Danach wurden die Lastspiele mittels Rainflow-Methode ermittelt. In Abbildung 85 bis Abbildung 89 sind die Spannungsverläufe zufolge Überfahrt der Fahrzeuge aus ELM4 und die dazugehörigen Spannungsspiele des Details D1a abgebildet. Die Tabellen zeigen welche Achse das jeweilige Lastspiel verursacht. n gibt den Schwerverkehrsanteil des jeweiligen Fahrzeugtyps wieder.

A.4.1 Detail D1a



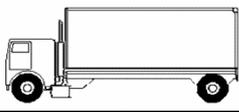
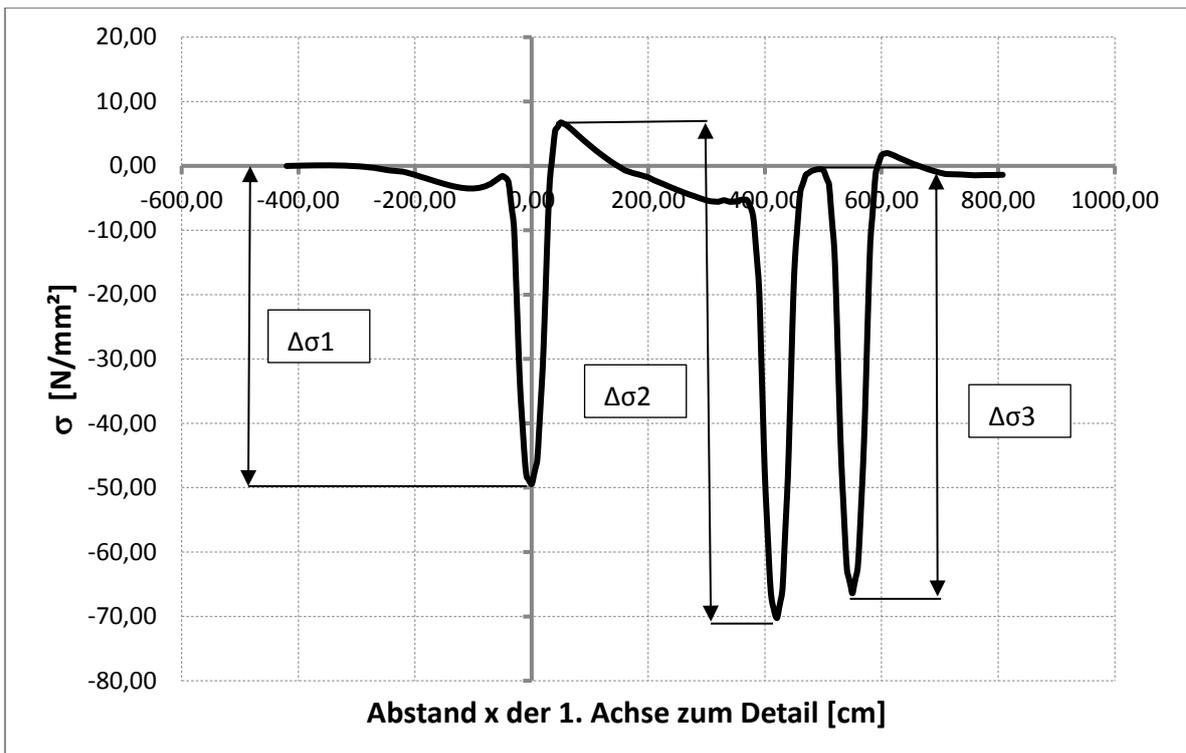
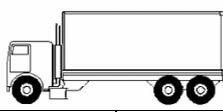
Typ 1			
			
	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma_1$	A	52.01	20
$\Delta\sigma_2$	B	72.44	20

Abbildung 85: M1 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 1, Detail 1a

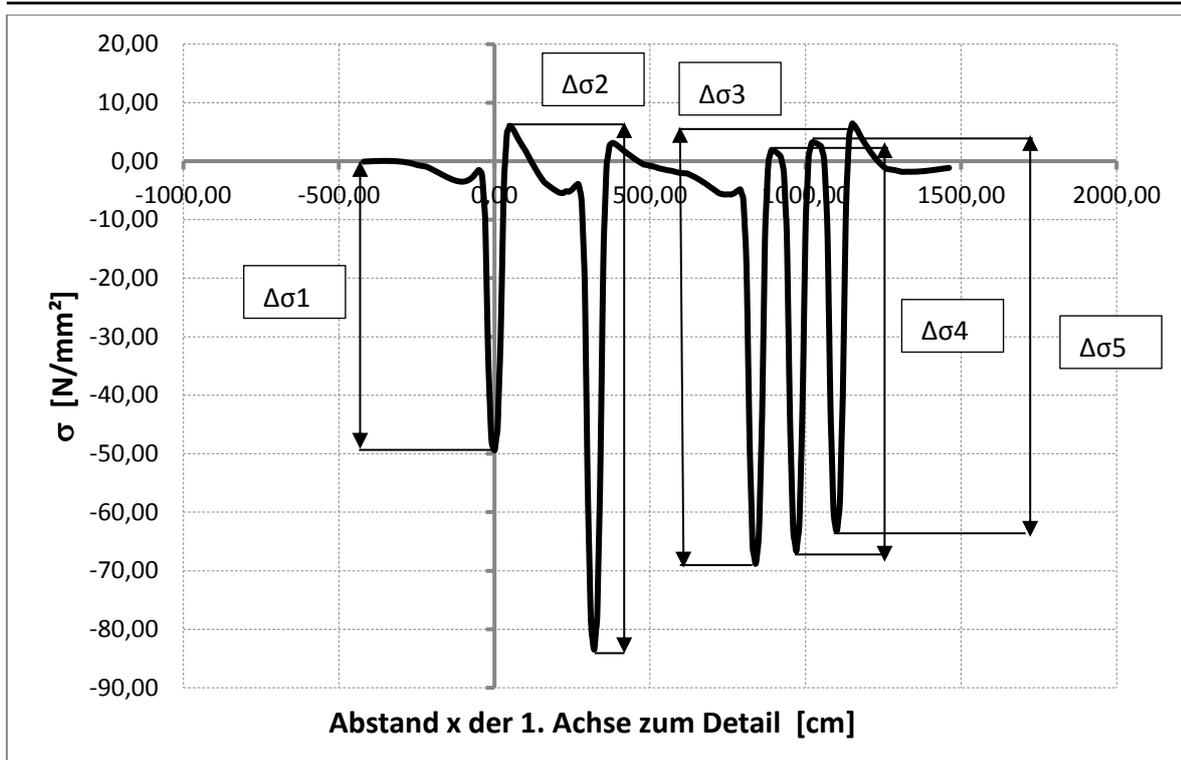


Typ 2

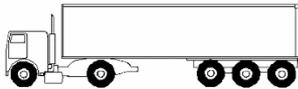


	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma_1$	A	51.38	5
$\Delta\sigma_2$	B	76.95	5
$\Delta\sigma_3$	B	65.89	5

Abbildung 86: M1 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 2, Detail 1a

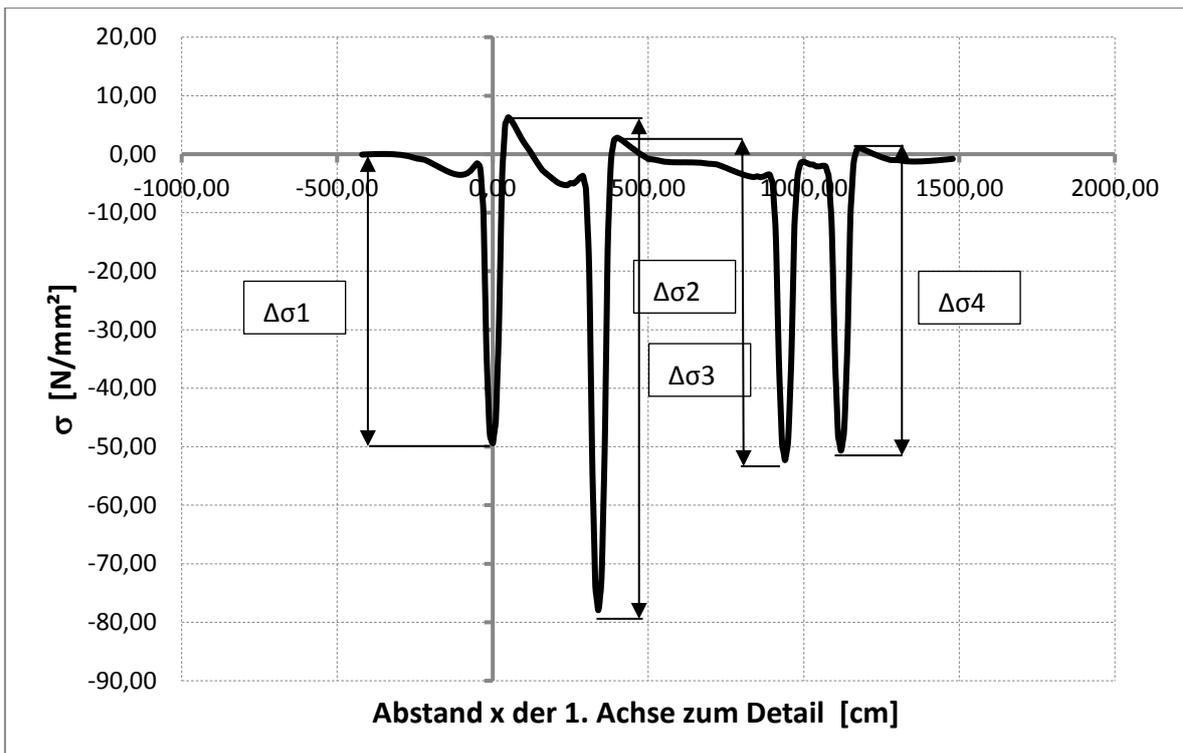


Typ 3



	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma_1$	A	55.44	50
$\Delta\sigma_2$	B	89.87	50
$\Delta\sigma_3$	C	71.94	50
$\Delta\sigma_4$	C	68.61	50
$\Delta\sigma_5$	C	66.35	50

Abbildung 87: M1 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 3, Detail 1a 1



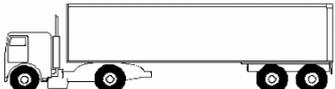
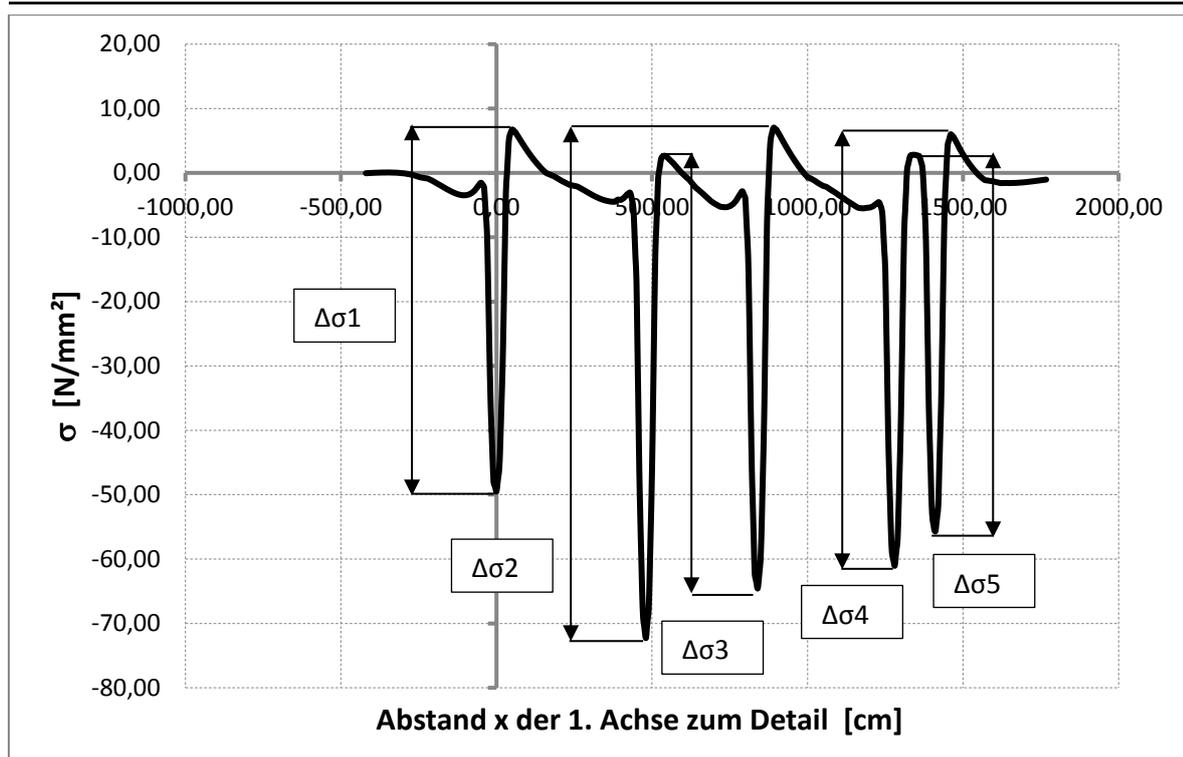
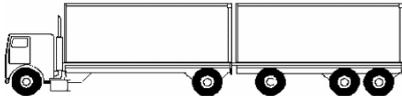
Typ 4			
			
	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma_1$	A	50.37	15
$\Delta\sigma_2$	B	84.23	15
$\Delta\sigma_3$	B	55.13	15
$\Delta\sigma_4$	B	49.38	15

Abbildung 88: M1 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 4, Detail 1a



Typ 5

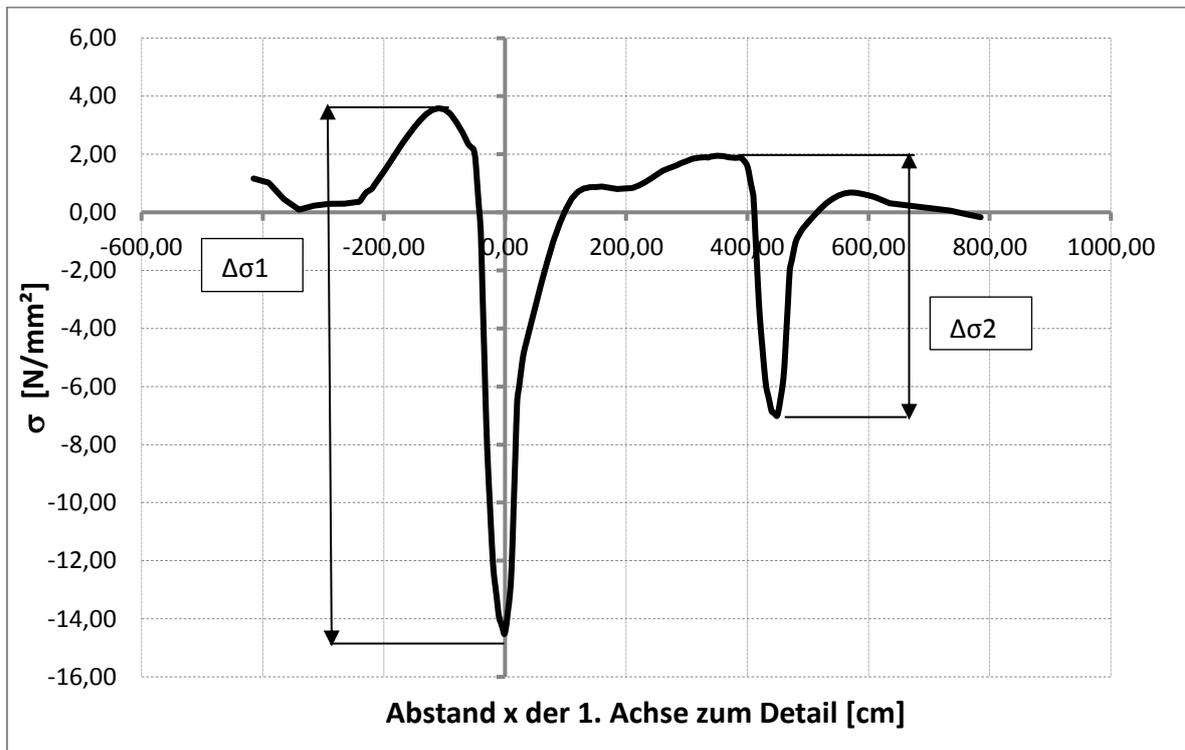


	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma_1$	A	55.49	10
$\Delta\sigma_2$	B	79.33	10
$\Delta\sigma_3$	C	67.24	10
$\Delta\sigma_4$	C	67.77	10
$\Delta\sigma_5$	C	58.50	10

Abbildung 89: M1 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 5, Detail 1a

A.4.2 Detail D1b

In den Abbildung 90 bis Abbildung 94 sind die Spannungsverläufe zufolge Überfahrt der Fahrzeuge aus ELM4 und die dazugehörigen Spannungsspiele des Details D1b abgebildet. Die Tabellen zeigen welche Achse das jeweilige Lastspiel verursacht. n gibt den Schwerververkehrsanteil des jeweiligen Fahrzeugtyps wieder.



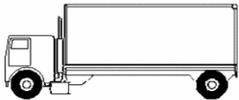
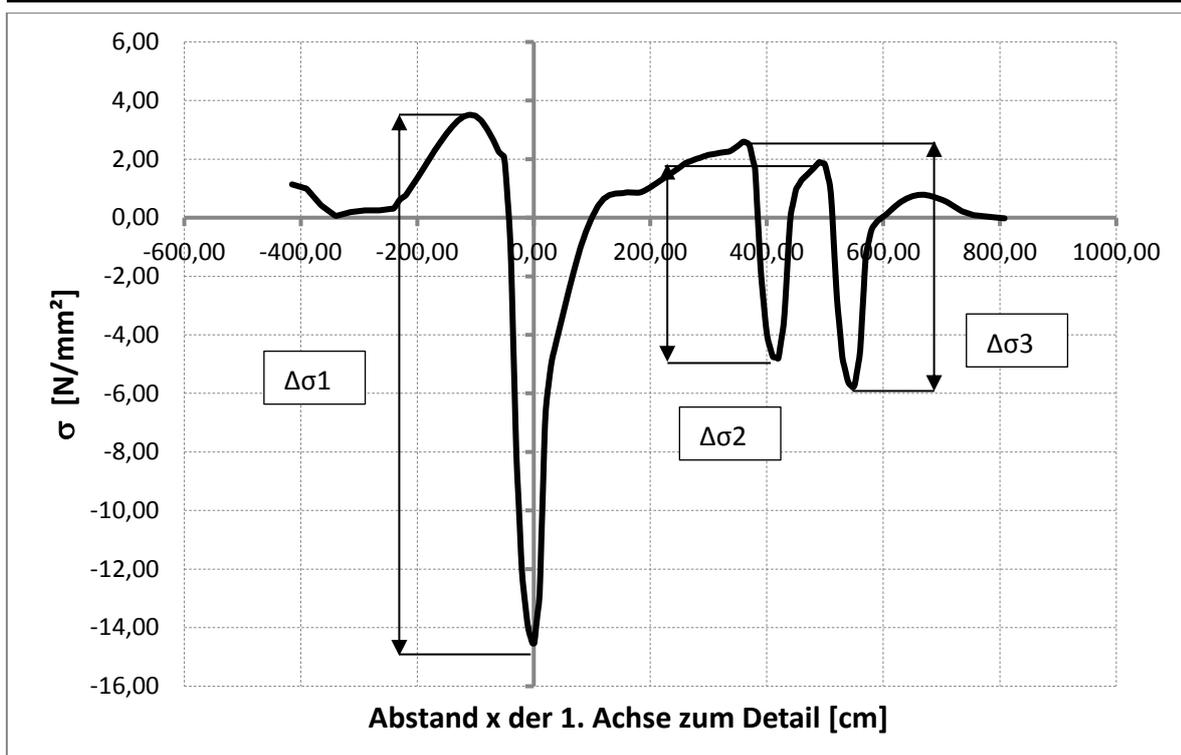
Typ 1			
			
	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma_1$	A	8.96	20
$\Delta\sigma_2$	B	18.11	20

Abbildung 90: M1 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 1, Detail 1b

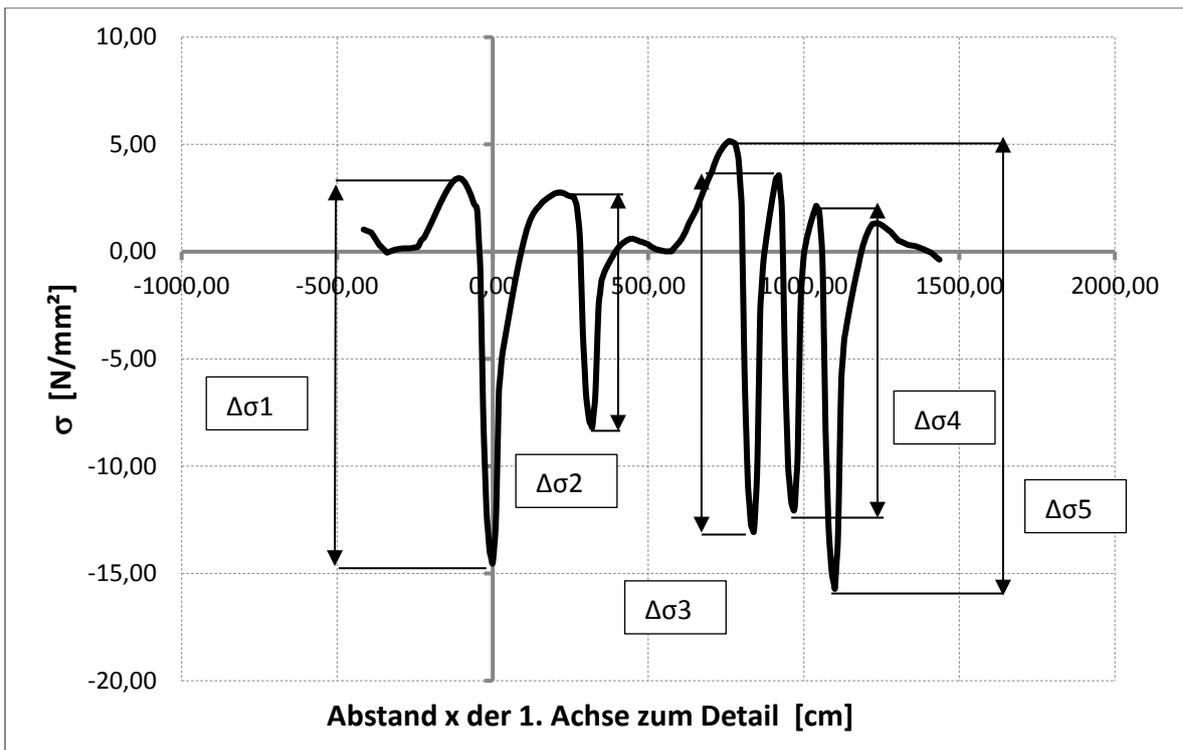


Typ 2



	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma_1$	A	18.04	5
$\Delta\sigma_2$	B	6.70	5
$\Delta\sigma_3$	B	8.38	5

Abbildung 91: M1 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 2, Detail 1b



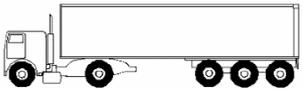
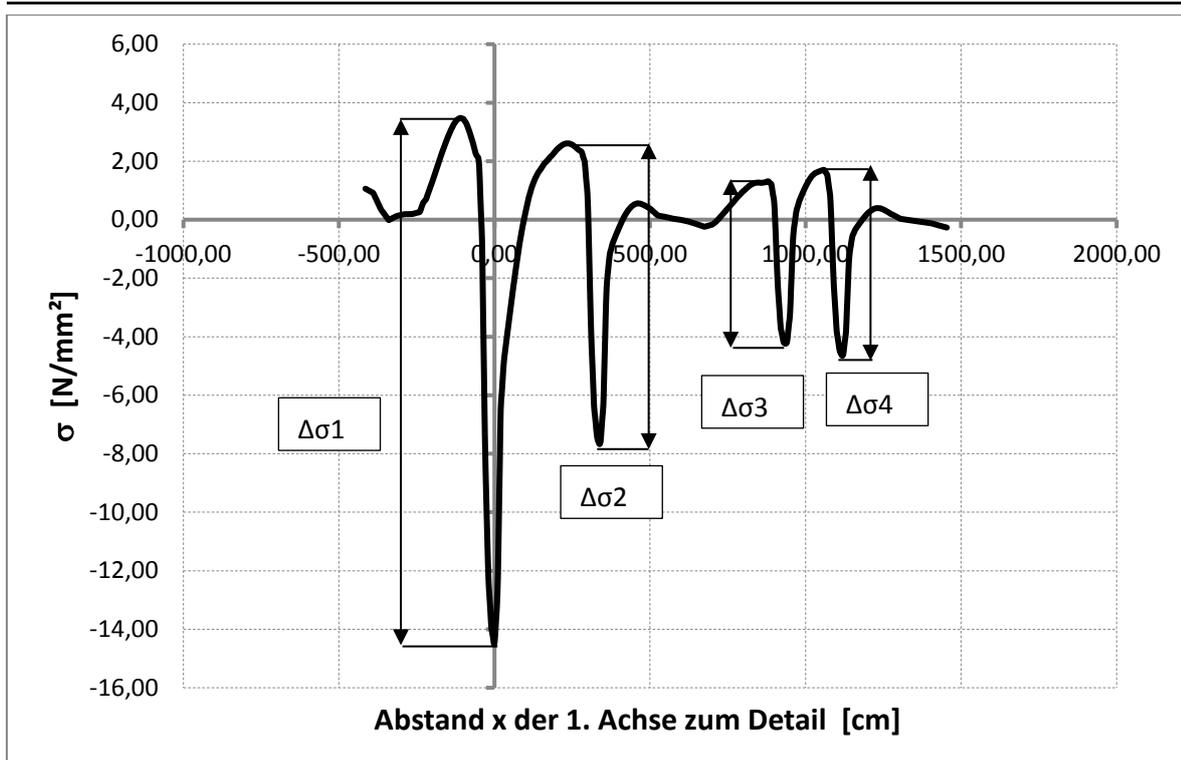
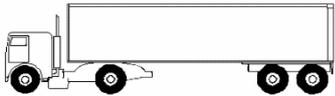
Typ 3			
			
	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma_1$	A	17.97	50
$\Delta\sigma_2$	B	10.95	50
$\Delta\sigma_3$	C	16.62	50
$\Delta\sigma_4$	C	14.21	50
$\Delta\sigma_5$	C	20.86	50

Abbildung 92: M1 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 3, Detail 1b

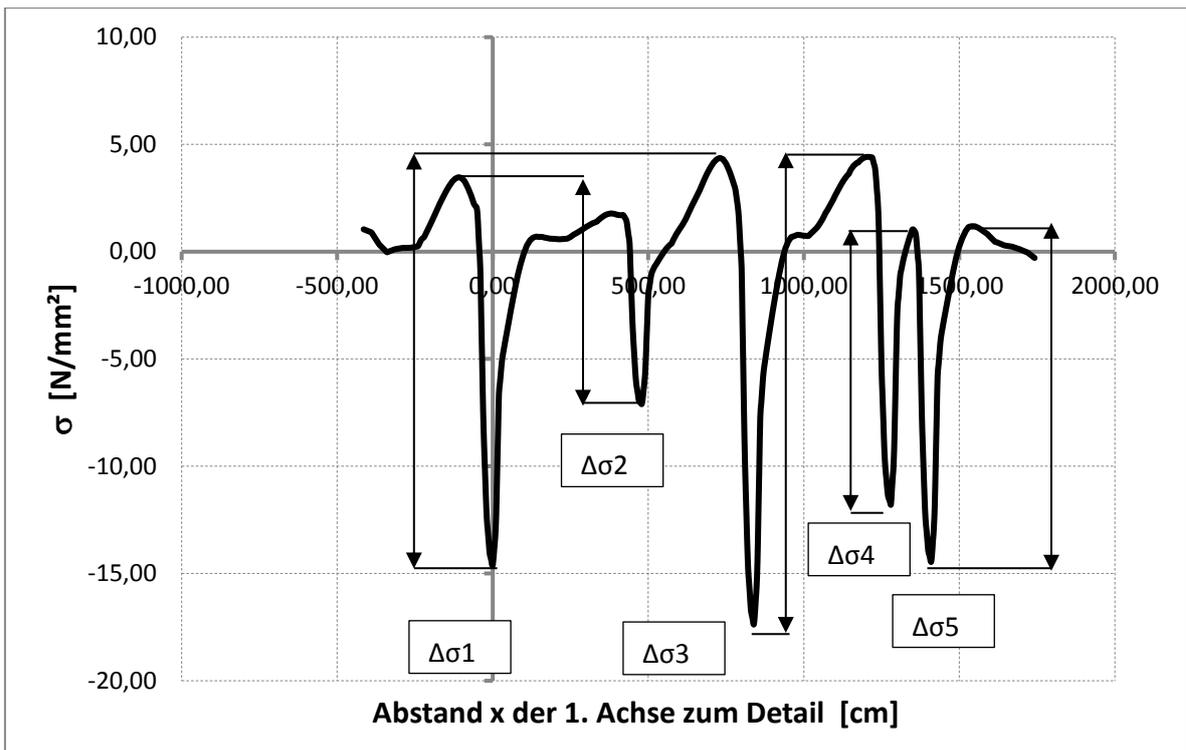


Typ 4

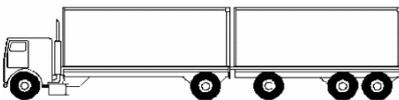


	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma_1$	A	18.00	15
$\Delta\sigma_2$	B	10.28	15
$\Delta\sigma_3$	B	5.54	15
$\Delta\sigma_4$	B	6.36	15

Abbildung 93: M1 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 4, Detail 1b



Typ 5

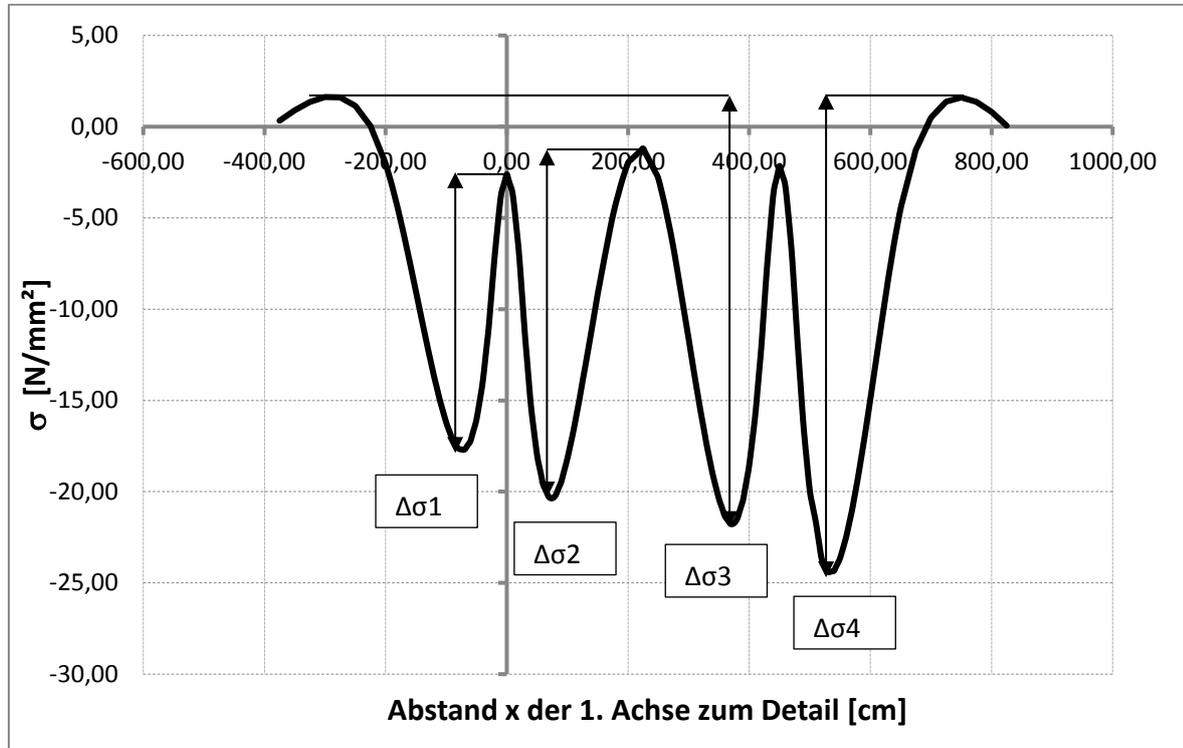


	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma 1$	A	19.01	10
$\Delta\sigma 2$	B	8.88	10
$\Delta\sigma 3$	C	21.80	10
$\Delta\sigma 4$	C	12.81	10
$\Delta\sigma 5$	C	17.94	10

Abbildung 94: M1 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 5, Detail 1b

A.4.3 Detail 2

In den Abbildung 95 bis Abbildung 99 sind die Spannungsverläufe zufolge Überfahrt der Fahrzeuge aus ELM4 und die dazugehörigen Spannungsspiele des Details D2 abgebildet. An den Tabellen ist zu erkennen welche Achse das jeweilige Lastspiel verursacht. n gibt den Schwerververkehrsanteil des jeweiligen Fahrzeugtyps wieder.



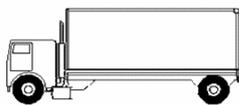
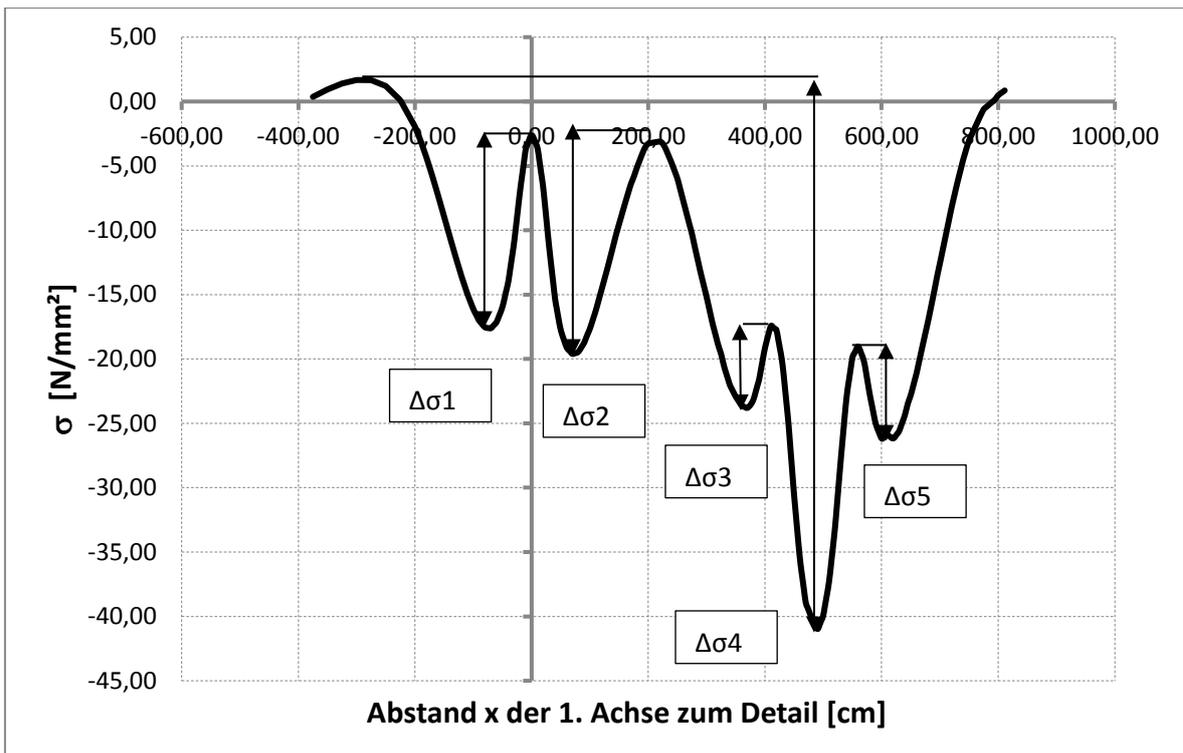
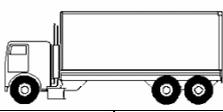
Typ 1			
			
	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma_1$	A	14.39	20
$\Delta\sigma_2$	A	19.18	20
$\Delta\sigma_3$	B	19.63	20
$\Delta\sigma_4$	B	26.04	20

Abbildung 95: M1 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 1, Detail 2

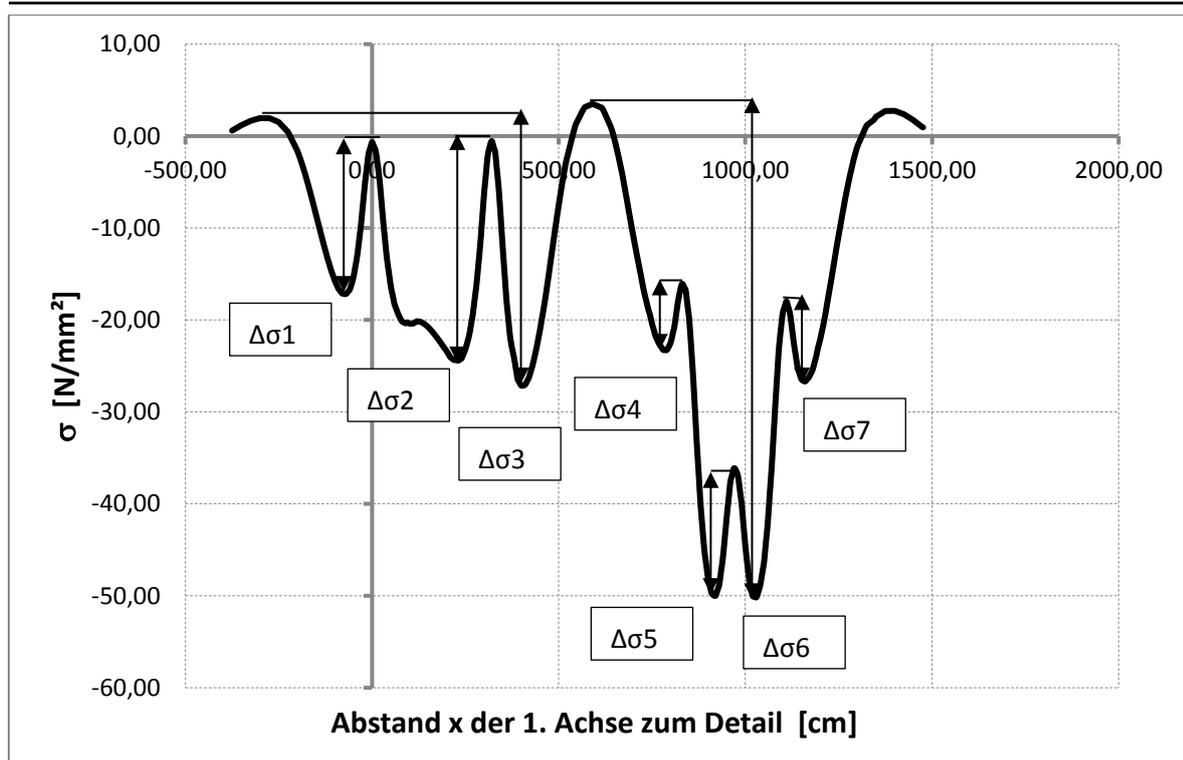


Typ 2

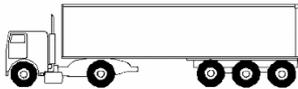


	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma_1$	A	14.95	5
$\Delta\sigma_2$	A	16.50	5
$\Delta\sigma_3$	B	6.39	5
$\Delta\sigma_4$	B	42.64	5
$\Delta\sigma_5$	B	7.17	5

Abbildung 96: M1 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 2, Detail 2

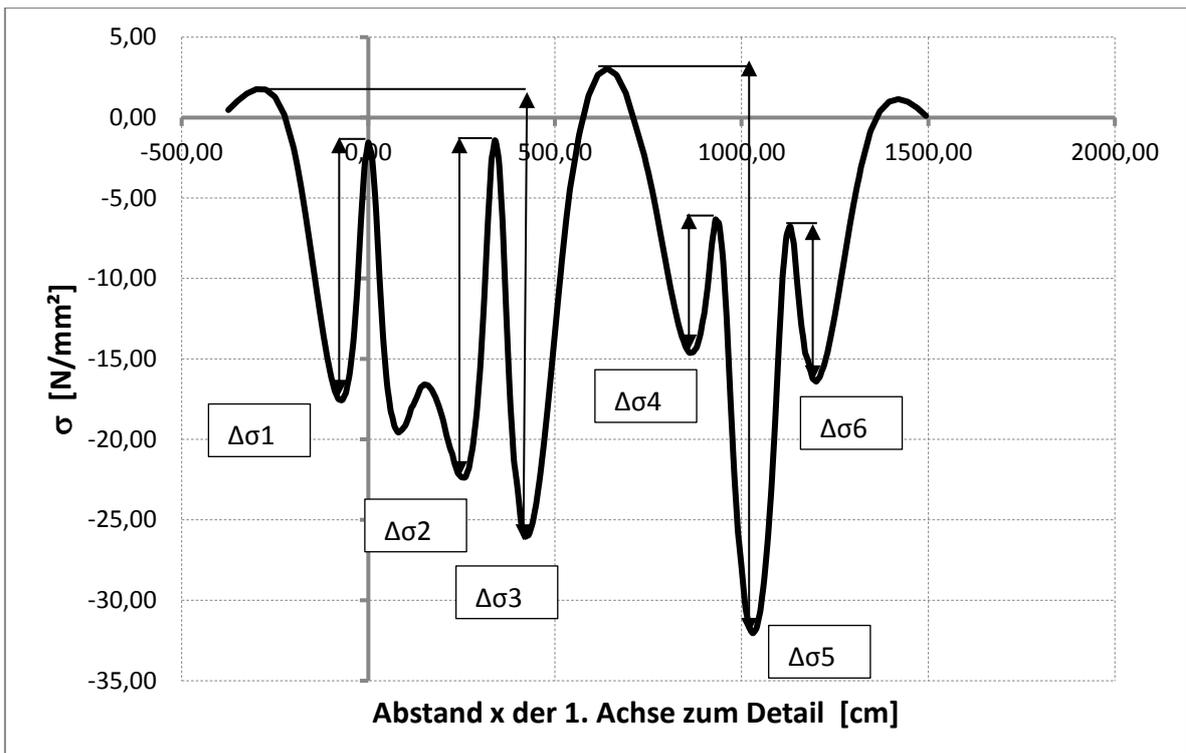


Typ 3



	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma_1$	A	16.53	50
$\Delta\sigma_2$	B	23.88	50
$\Delta\sigma_3$	B	29.91	50
$\Delta\sigma_4$	C	7.23	50
$\Delta\sigma_5$	C	13.88	50
$\Delta\sigma_6$	C	53.66	50
$\Delta\sigma_7$	C	8.71	50

Abbildung 97: M1 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 3, Detail 2



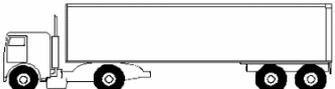
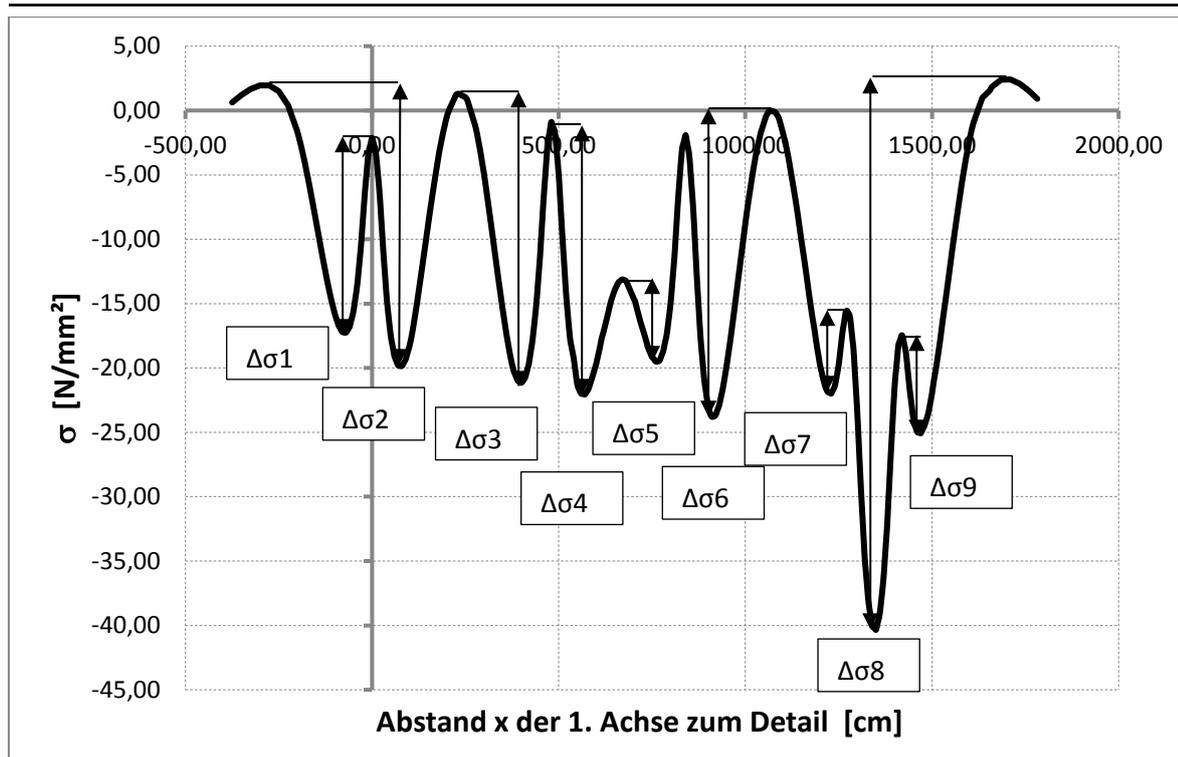
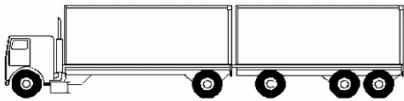
Typ 4			
			
	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma 1$	A	16.03	15
$\Delta\sigma 2$	B	20.95	15
$\Delta\sigma 3$	B	27.81	15
$\Delta\sigma 4$	B	8.28	15
$\Delta\sigma 5$	C	35.08	15
$\Delta\sigma 6$	C	9.63	15

Abbildung 98: M1 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 4, Detail 2



Typ 5



	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma_1$	A	15.14	10
$\Delta\sigma_2$	A	21.17	10
$\Delta\sigma_3$	B	20.27	10
$\Delta\sigma_4$	B	20.16	10
$\Delta\sigma_5$	C	6.39	10
$\Delta\sigma_6$	C	23.82	10
$\Delta\sigma_7$	C	6.45	10
$\Delta\sigma_8$	C	42.75	10
$\Delta\sigma_9$	C	7.63	10

Abbildung 99: M1 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 5, Detail 2

A.5 Lastkollektive

A.5.1 Detail 1a

A.5.1.1 Zentrische Überfahrt

Abbildung 100 zeigt eine Überfahrt zentrisch am Längsrippensteg. Diese Position wird im Verlauf der Masterarbeit als zentrische Überfahrt bzw. zentrische Spurlage bezeichnet.

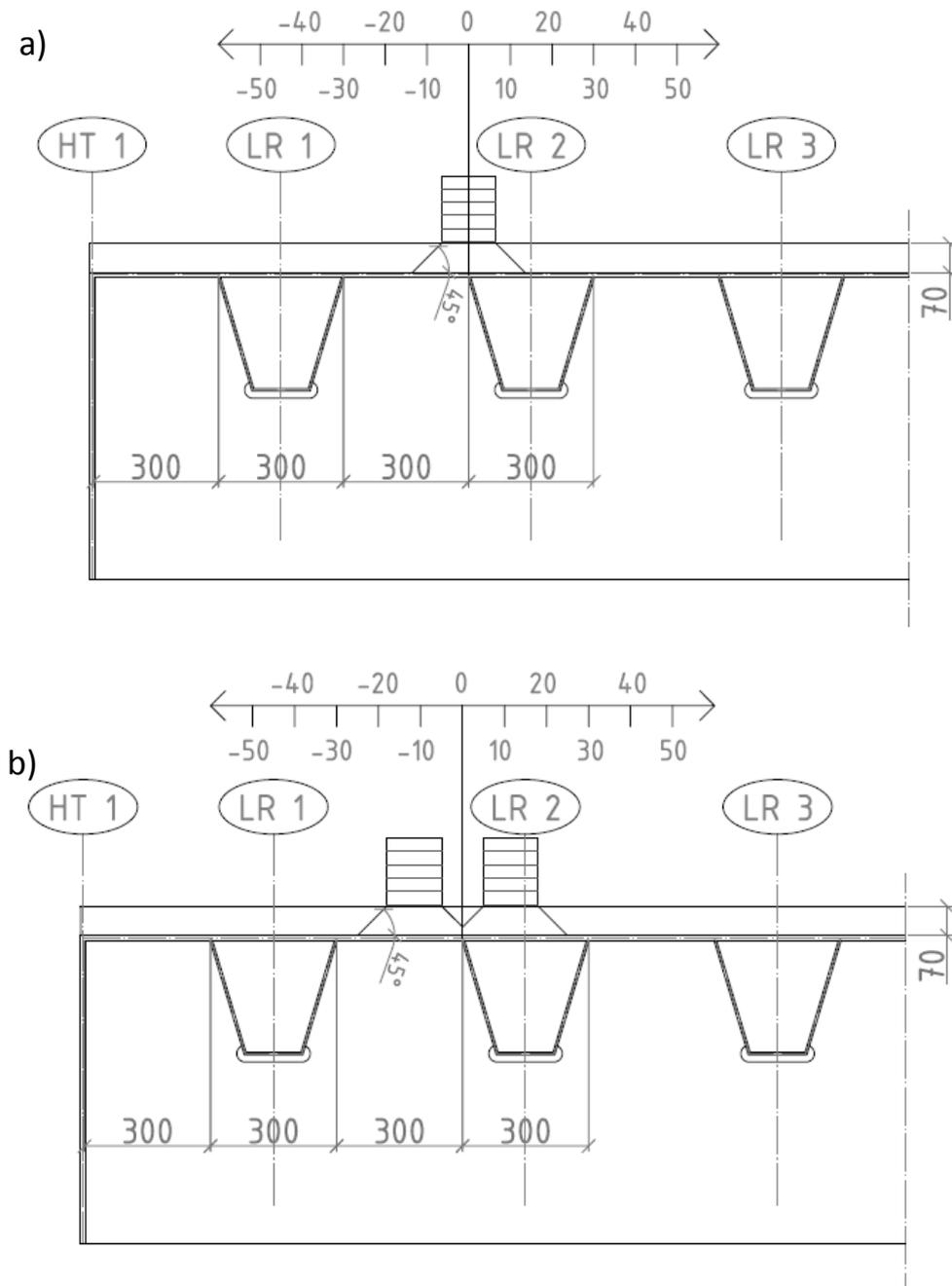


Abbildung 100: Zentrische Überfahrt mittig am Rippensteg der Längsrippe 2 (LR 2) mit einzelbereifter (a) und zwillingbereifter (b) Achse

Abbildung 101 zeigt die Fahrzeugtypen des Ermüdungslastmodells 4. Für die Zuordnung der Spannungsspiele wurden die Achsen nummeriert und der Achstyp dargestellt. Auf den späteren Lastkollektiven ist die verursachende Achse angegeben.

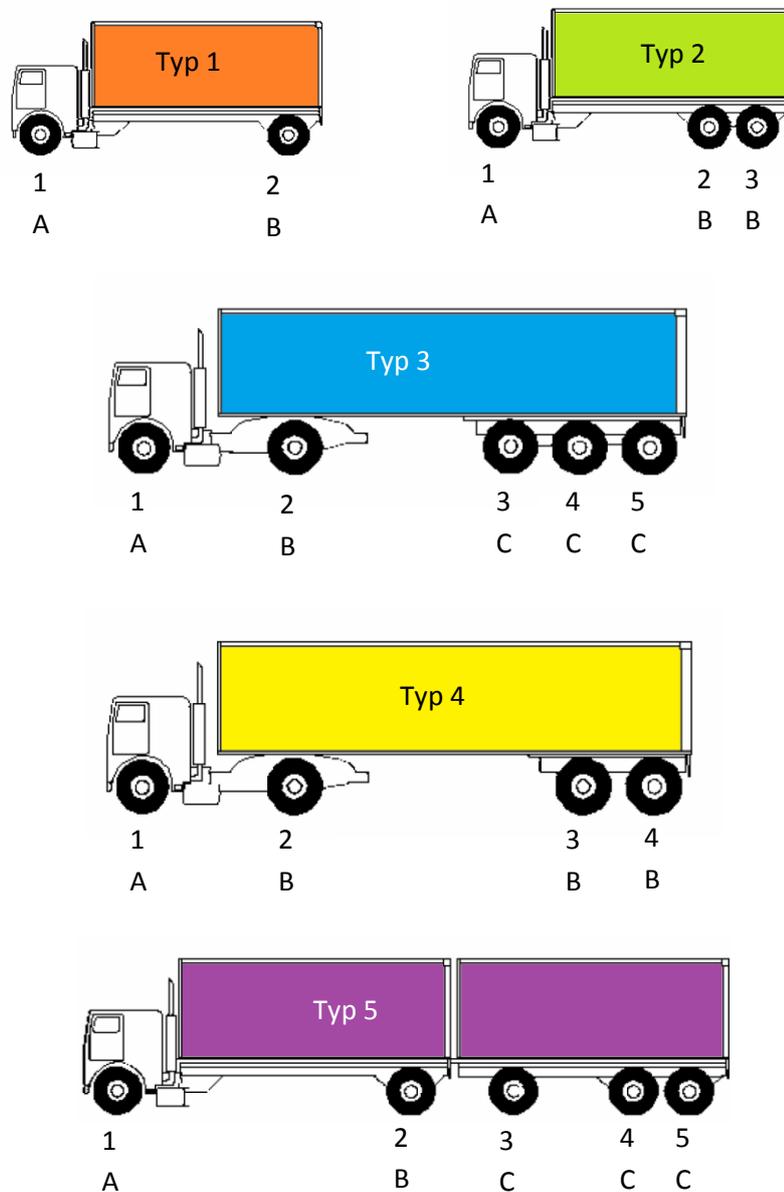


Abbildung 101: Fahrzeugtypen des ELM4 mit Nummerierung und Art der Achsen

Anhand der Spannungsspiele aus Abschnitt A4 konnten die Lastkollektive der untersuchten Details erstellt werden. Auf Abbildung 102 werden Kollektivteile, die schädigend wirken dicker dargestellt, als jene, die keine schädigende Wirkung haben ($\Delta\sigma_i < \Delta\sigma_L$). Um die Gesamtwirkung des Kollektives wiederzugeben, wird das Lastkollektiv in ein schadensäquivalentes Einstufenkollektiv bezogen auf $n_{LKW} = 100$, umgerechnet. Dieses ist in der folgenden Abbildung blau strichliert dargestellt. Dieses Kollektiv wurde durch eine rein zentrische Überfahrt aller Achsen hervorgerufen.

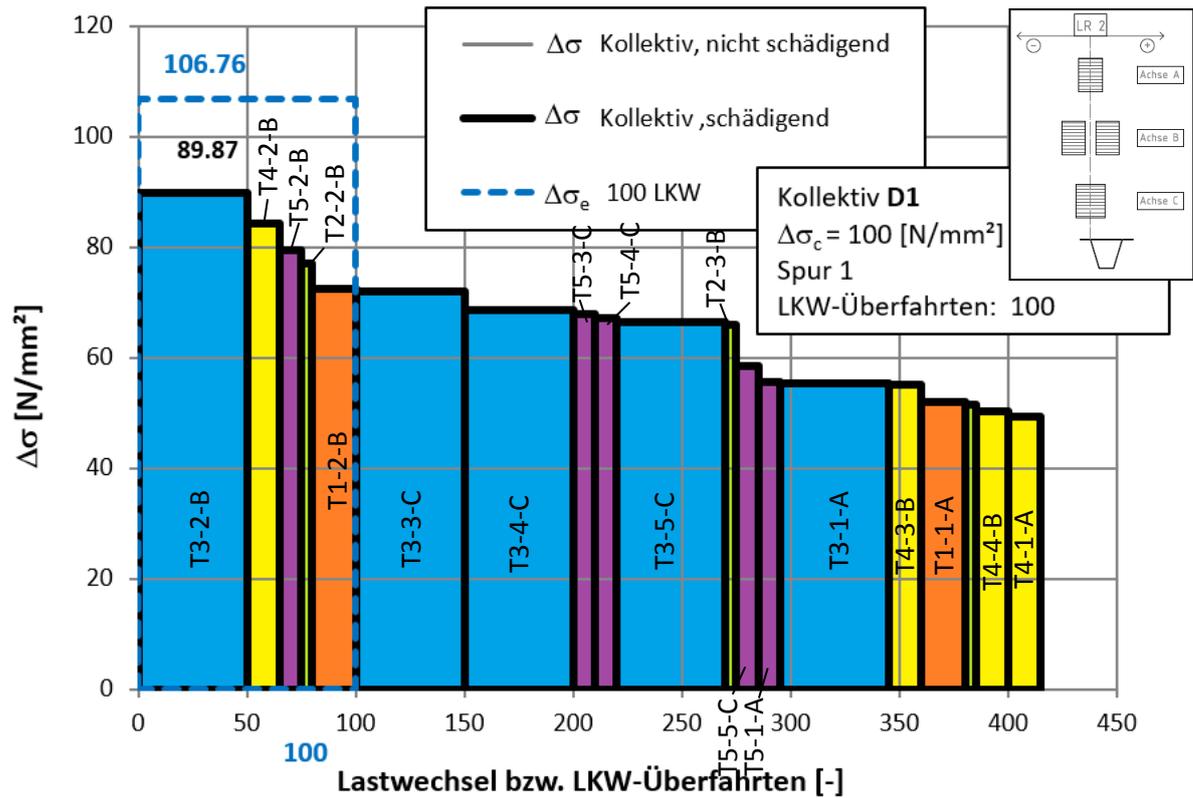


Abbildung 102: M1 - Lastkollektiv der zentrischen Überfahrt an D1a

A.5.1.2 Reale Achsgeometrie

Um die Reale Achsgeometrie zu berücksichtigen wurde die Quereinflusslinie der einzelbereiften und der zwillingsbereiften Achsen in Brückenquerrichtung ermittelt. Da Achse B am Detailpunkt D1a die größten Spannungsspiele hervorruft, wurden Achse A und C um 16 cm verschoben, sodass die Außenkanten aller Räder bündig sind. Achse B überquerte das Brückendeck weiterhin zentrisch über den Längsrippensteg. Die Kollektivteile aus Abbildung 102 der Achsen A und C wurden mit Hilfe der Quereinflusslinie modifiziert.

Abbildung 103 zeigt die Einflusslinie der Achsen A und C und den konservativ gewählten Skalierungsfaktor $\eta = 0,86$.

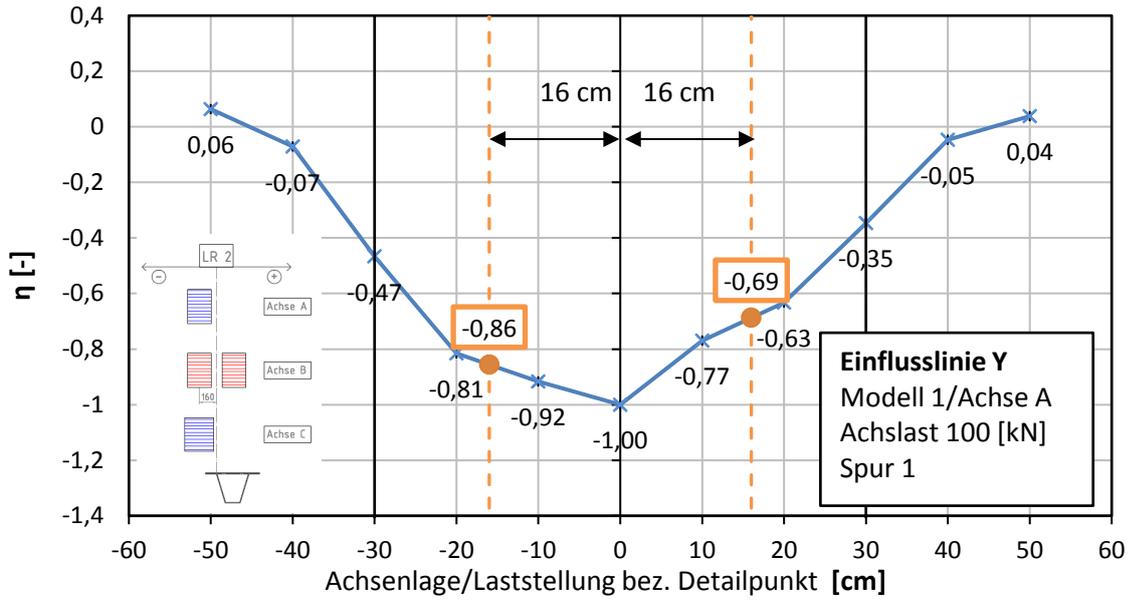


Abbildung 103: M1 - Lasteinflusslinie in Querrichtung Achse A/C Detail 1a

Abbildung 104 zeigt das ermittelte Spannungskollektiv. Daraus wurde das blau gekennzeichnete schadensäquivalente Einstufenkollektiv umgerechnet.

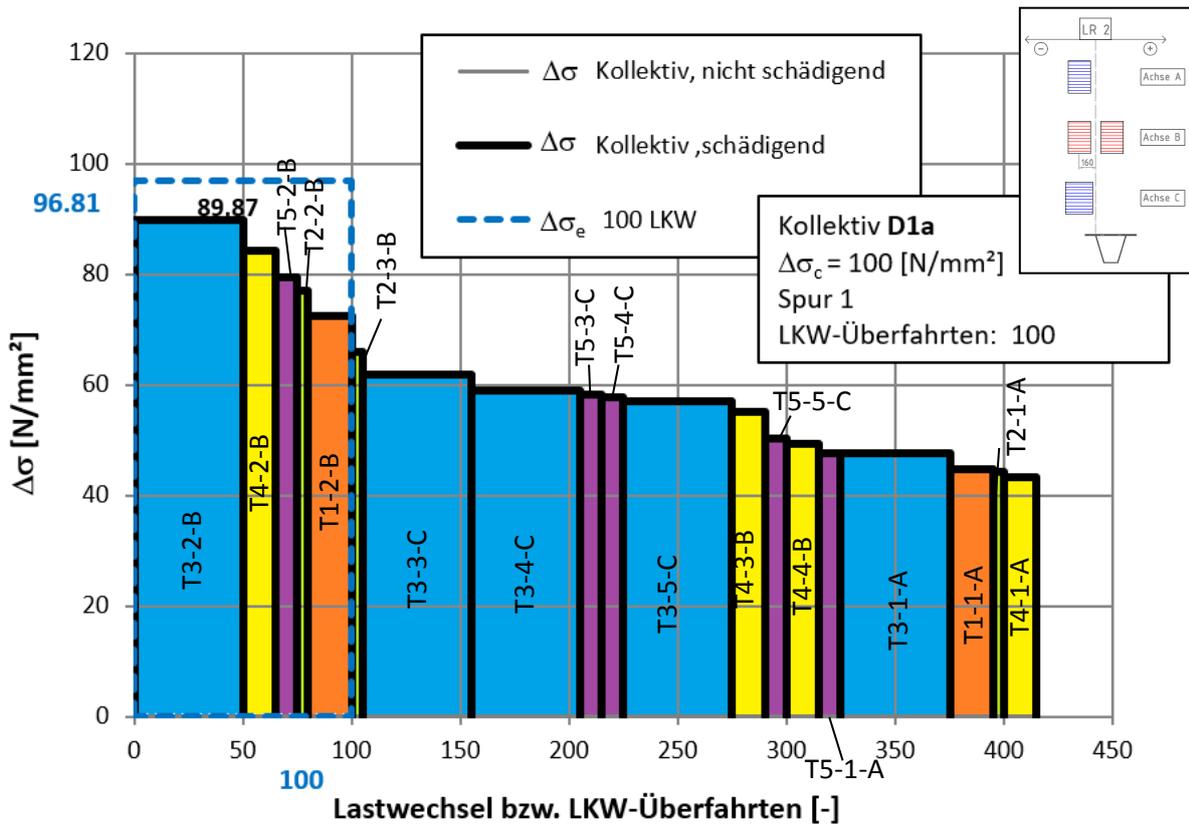


Abbildung 104: M1 - Lastkollektiv unter Berücksichtigung der realen Achsgeometrie an D1a

A.5.1.3 Häufigkeitsverteilung in Brückenquerrichtung nach Blab

Die Prinzipielle Vorgangsweise wird in Kapitel 5 erläutert. Abbildung 105a zeigt die Spurverteilung nach Blab und Abbildung 105b die Quereinflusslinien der einzel- und zwillingsbereiften Achsen.

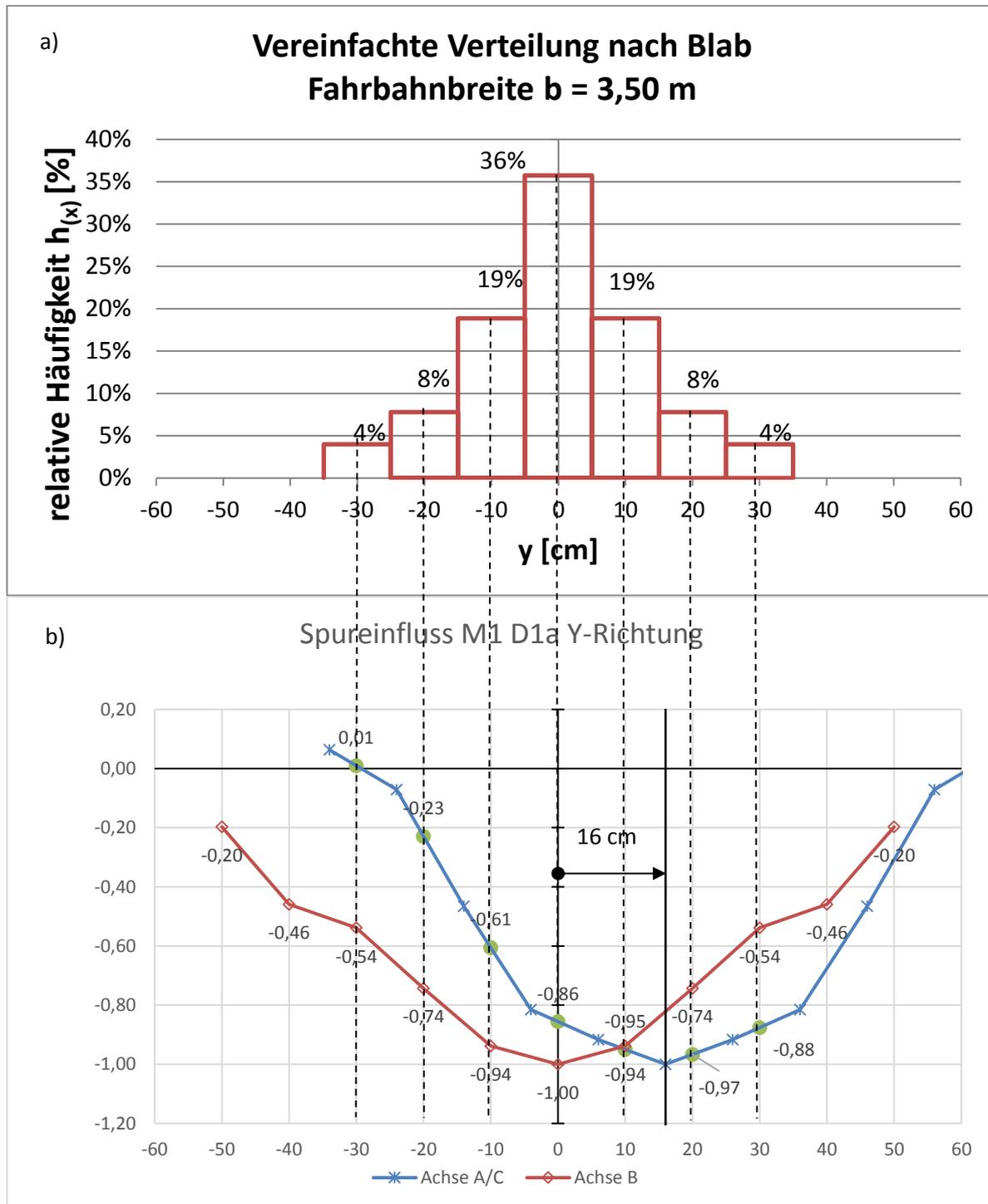


Abbildung 105: Spurverteilung nach Blab und Quereinflusslinien bei verschobener Achsen A/C

Anmerkung: Negatives Vorzeichen von $\eta \rightarrow$ Druckspannungen
 Positives Vorzeichen von $\eta \rightarrow$ Zugspannungen

Tabelle 11 gibt eine Auflistung über die Skalierungsfaktoren η bezogen auf die zugehörige Lage in Brückenquerrichtung.

Achse	- 30 cm	- 20 cm	- 10 cm	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm
B	-0,54	-0,74	-0,94	-1,00	-0,94	-0,74	0,54
A/C	0,01	-0,23	-0,61	-0,84	-0,95	-0,97	-0,88

Tabelle 11:Übersicht der Skalierungsfaktoren je Fahrspur

Das Lastkollektiv in Abbildung 106 wurde anhand der 5 Schritte in Kapitel 5 erstellt. Das schadensäquivalente Einstufenkollektiv wurde mit Hilfe Gleichung {1} berechnet.

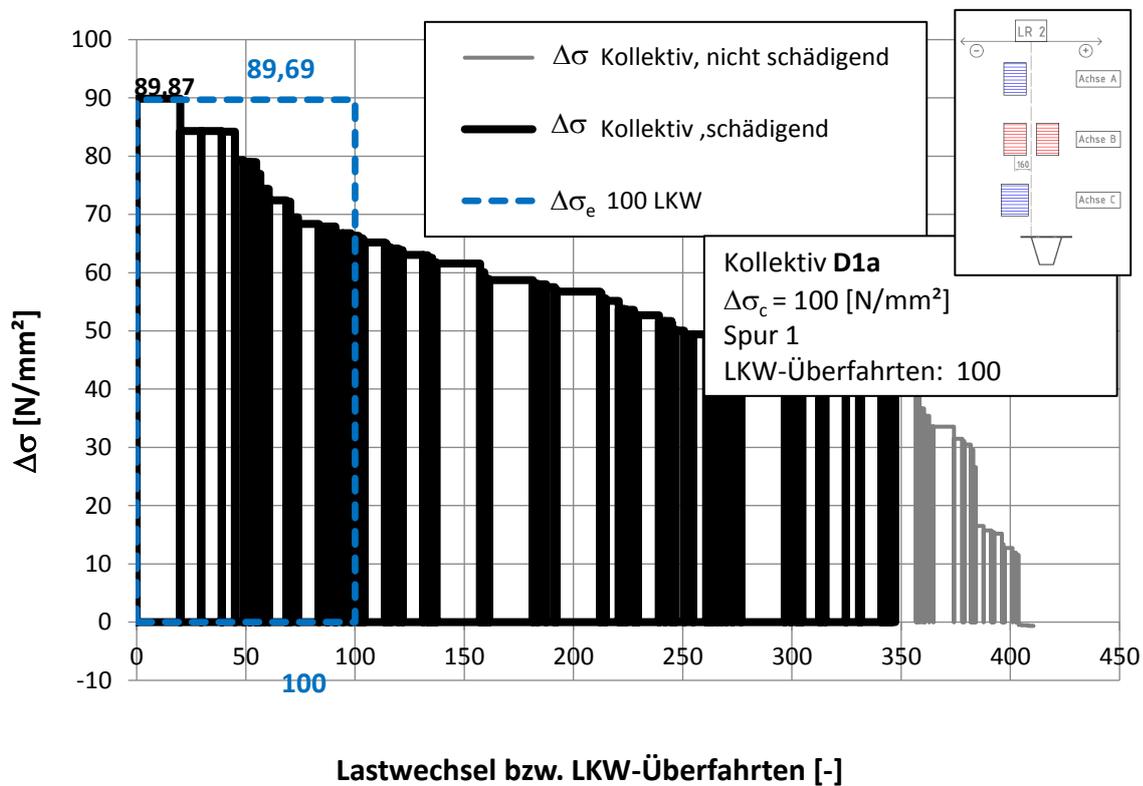


Abbildung 106: M1 - Modifiziertes Lastkollektiv und schadensäquivalentes EK des Details 1a mit Spurverteilung nach Blab ($b=3,5m$)

A.5.1.4 Häufigkeitsverteilung in Brückenquerrichtung nach Eurocode 1991-2

Die Berechnungen für das Lastkollektiv laut EN 1991-2 erfolgt analog zu der Berechnung mit der Spurverteilung nach Blab.

Abbildung 105a zeigt die Verteilung nach EN und Abbildung 105b die dazugehörigen Werte der Quereinflusslinie des Details 1a.

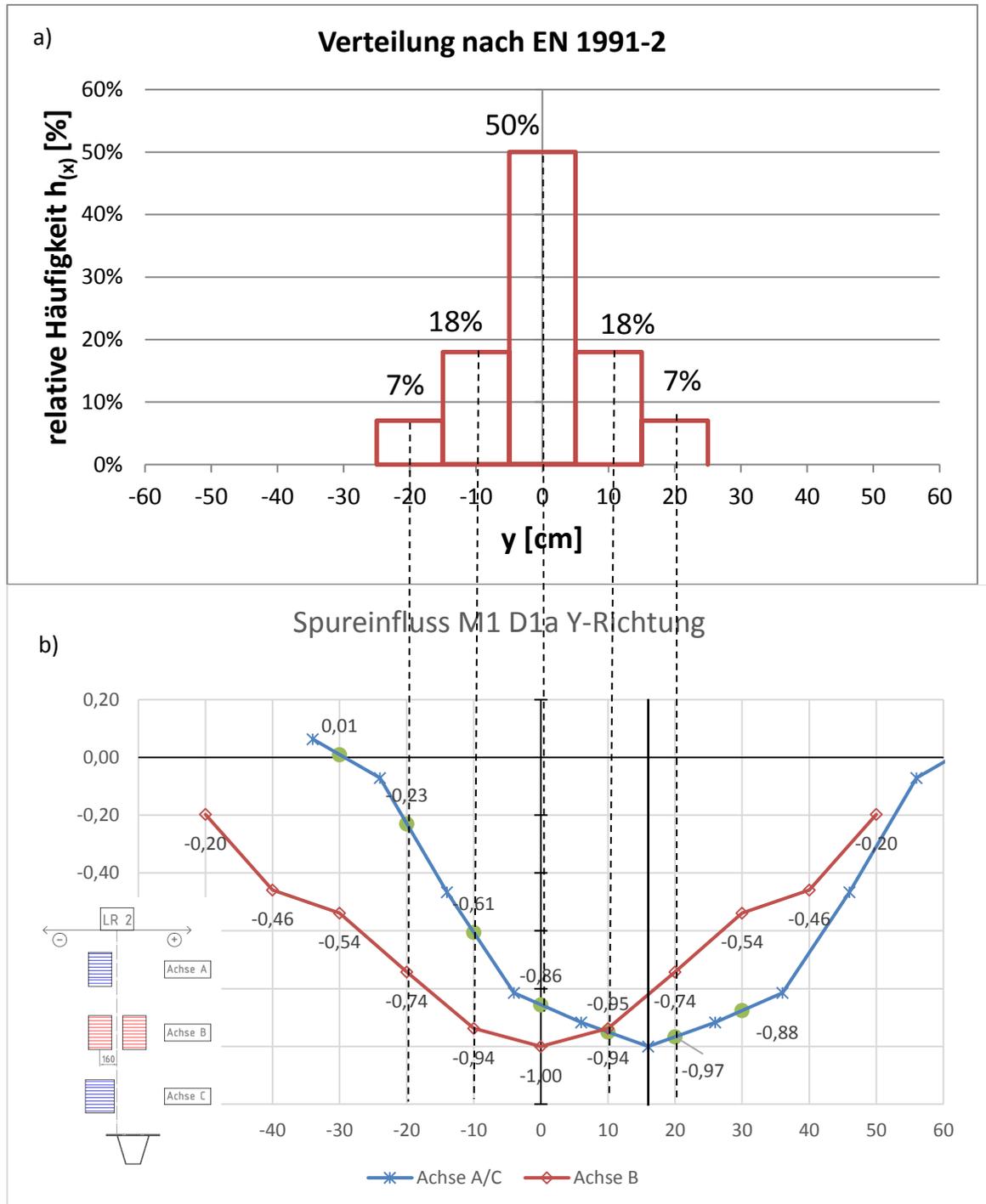


Abbildung 107: Spurverteilung nach EN und Quereinflusslinien bei verschobener Achsen A/C

Anmerkung: Negatives Vorzeichen von η → Druckspannungen
 Positives Vorzeichen von η → Zugspannungen

Tabelle 12 gibt eine Auflistung über die Skalierungsfaktoren η bezogen auf die zugehörige Lage in Brückenquerrichtung.

Achse	- 20 cm	- 10 cm	0 cm	10 cm	20 cm
B	-0,74	-0,94	-1,00	-0,94	-0,74
A/C	-0,23	-0,61	-0,84	-0,95	-0,97

Tabelle 12: Übersicht der Skalierungsfaktoren je Fahrspur

Das Lastkollektiv in Abbildung 108 wurde anhand der 5 Schritte in Kapitel 5 erstellt. Das schadensäquivalente Einstufenkollektiv wurde mit Hilfe Gleichung {1} berechnet.

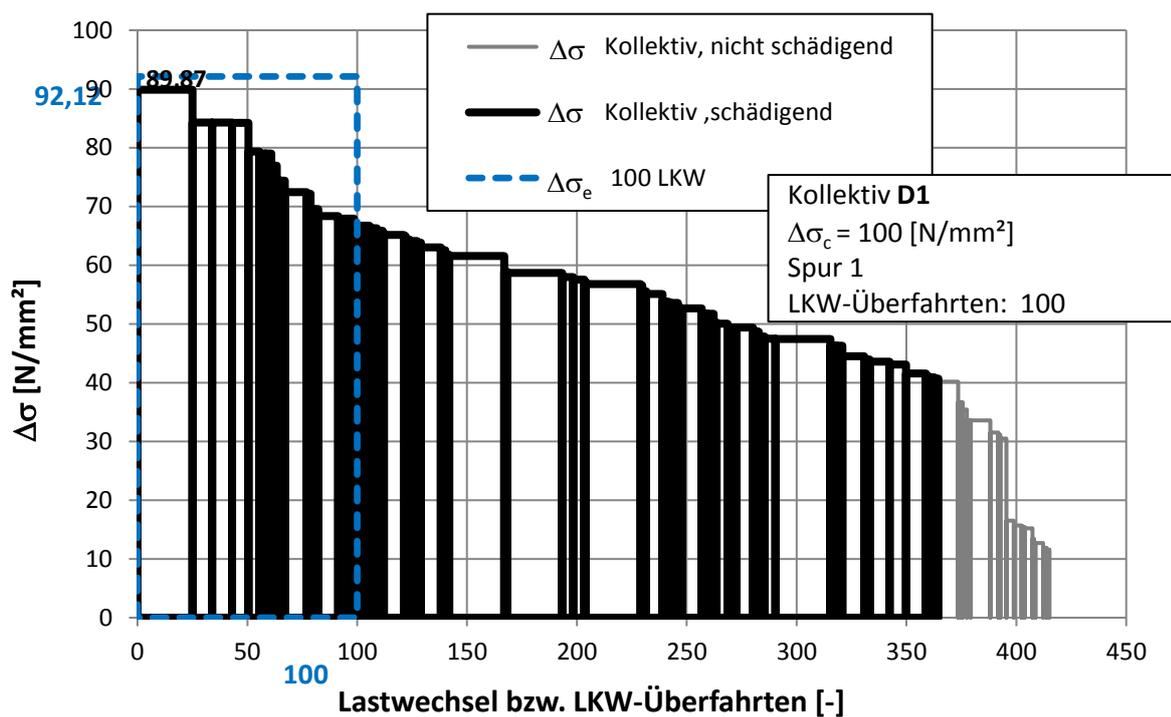


Abbildung 108: M1 - Modifiziertes Lastkollektiv und schadensäquivalentes EK des Details 1a mit Spurverteilung nach EN 1991-2

A.5.2 Detail 1b

A.5.2.1 Zentrische Überfahrt

Das Lastkollektiv der Zentrischen Überfahrt (siehe Abbildung 100) des Details D1b wurde analog zu Detail D1a ermittelt. Dabei ist festzustellen, dass dieses Lastkollektiv keine schädigenden Wirkungen aufweist, wie in Abbildung 109 ersichtlich

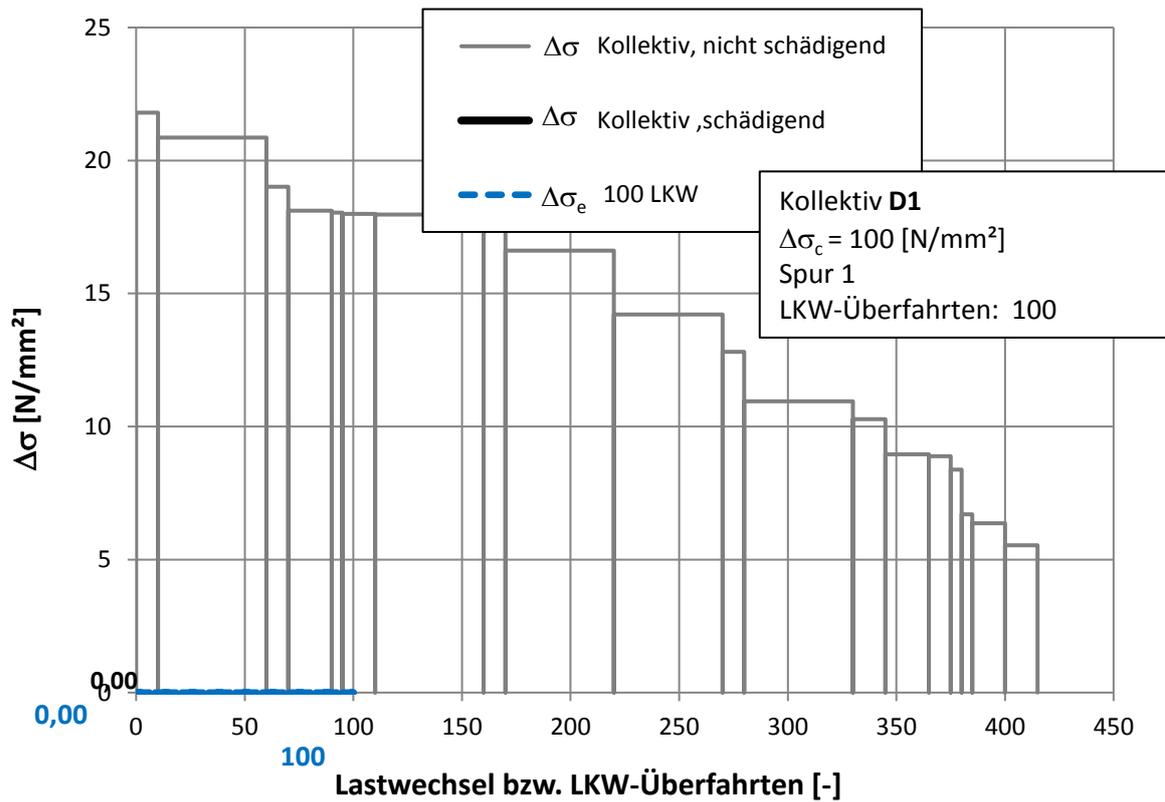
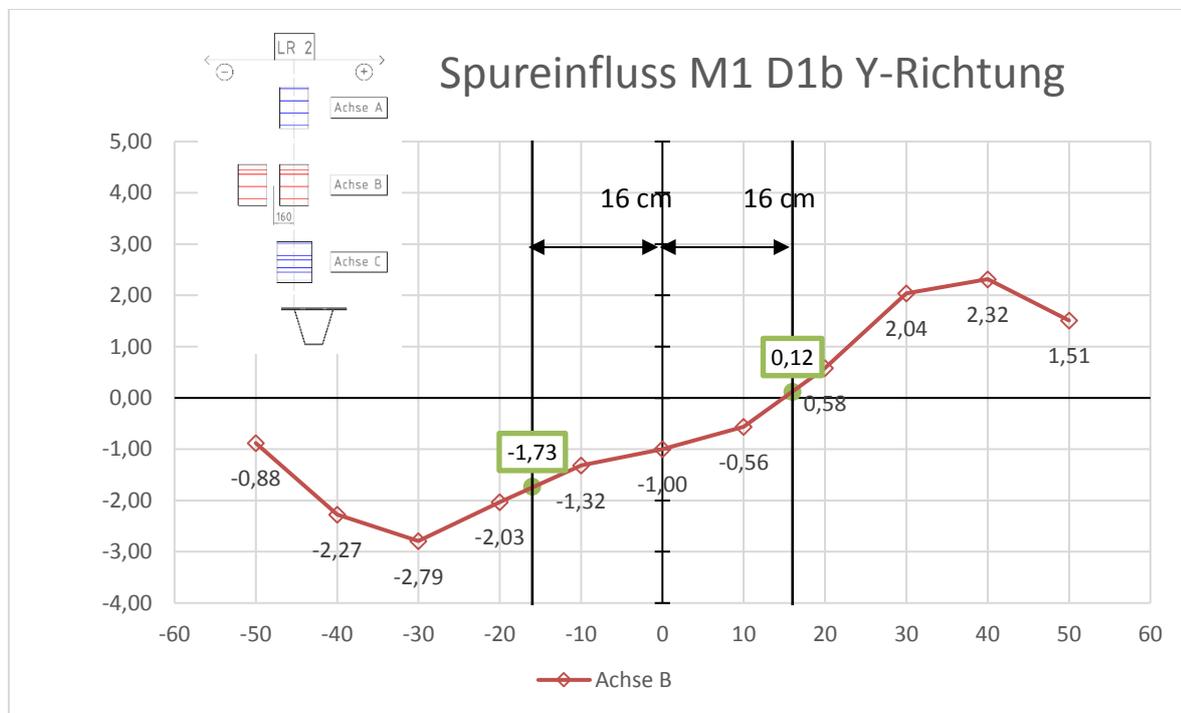


Abbildung 109: M1 - Lastkollektiv der zentrischen Überfahrt an D1b

A.5.2.2 Reale Achsgeometrie

Die Berücksichtigung der realen Achsgeometrie erfolgte ebenfalls analog zum Detail 1a in Abschnitt A.5.1.2. Auf Abbildung 110 sieht man die Quereinflusslinie der Achse B. Die Achsverschiebung der Achse B um 16 cm ist mit dickeren Linien markiert. Für die Modifizierung des Lastkollektives der zentrischen Überfahrt wurde der konservative Wert 1,73 verwendet.



Anmerkung: Negatives Vorzeichen von η → Druckspannungen
 Positives Vorzeichen von η → Zugspannungen

Abbildung 110: M1 Lasteinflusslinie in Querrichtung Achse B im Detail 1b

Abbildung 111 zeigt das, aufgrund der realen Achsgeometrie, modifizierte Lastkollektiv. Es ist ersichtlich, dass auch durch Erhöhung der $\Delta\sigma$, die durch Achse B verursacht wurden, noch keine schädigende Wirkung eintritt.

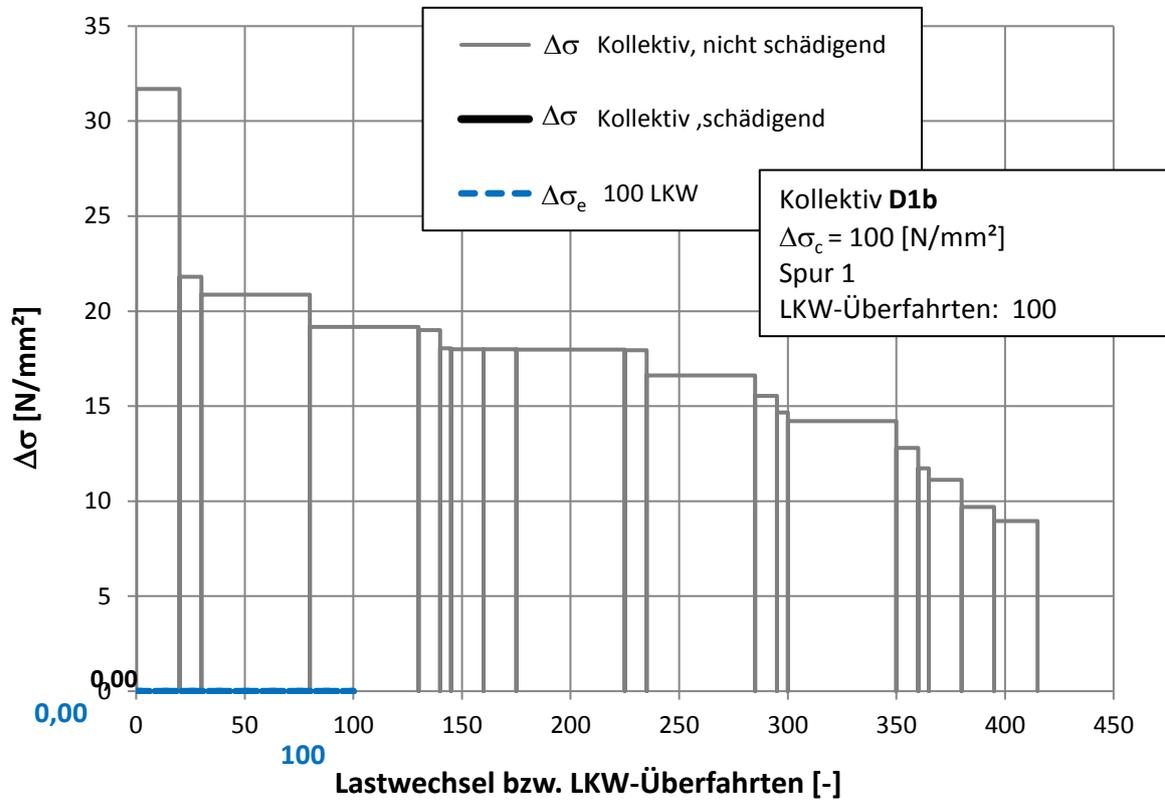


Abbildung 111: M1 - Lastkollektiv unter Berücksichtigung der realen Achsgeometrie an D1b

A.5.2.1 Häufigkeitsverteilung in Brückenquerrichtung nach Blab

Abbildung 112a zeigt die vereinfachte Spurverteilung nach Blab bei einer Fahrbahnbreite von 4 m und Abbildung 112b zeigt die dazugehörigen Werte des Spureinflusses der einzel- und zwillingsbe-
 reiften Achsen. Achse B wurde hierbei um 16 cm verschoben um die reale Achsgeometrie konservativ zu berücksichtigen.

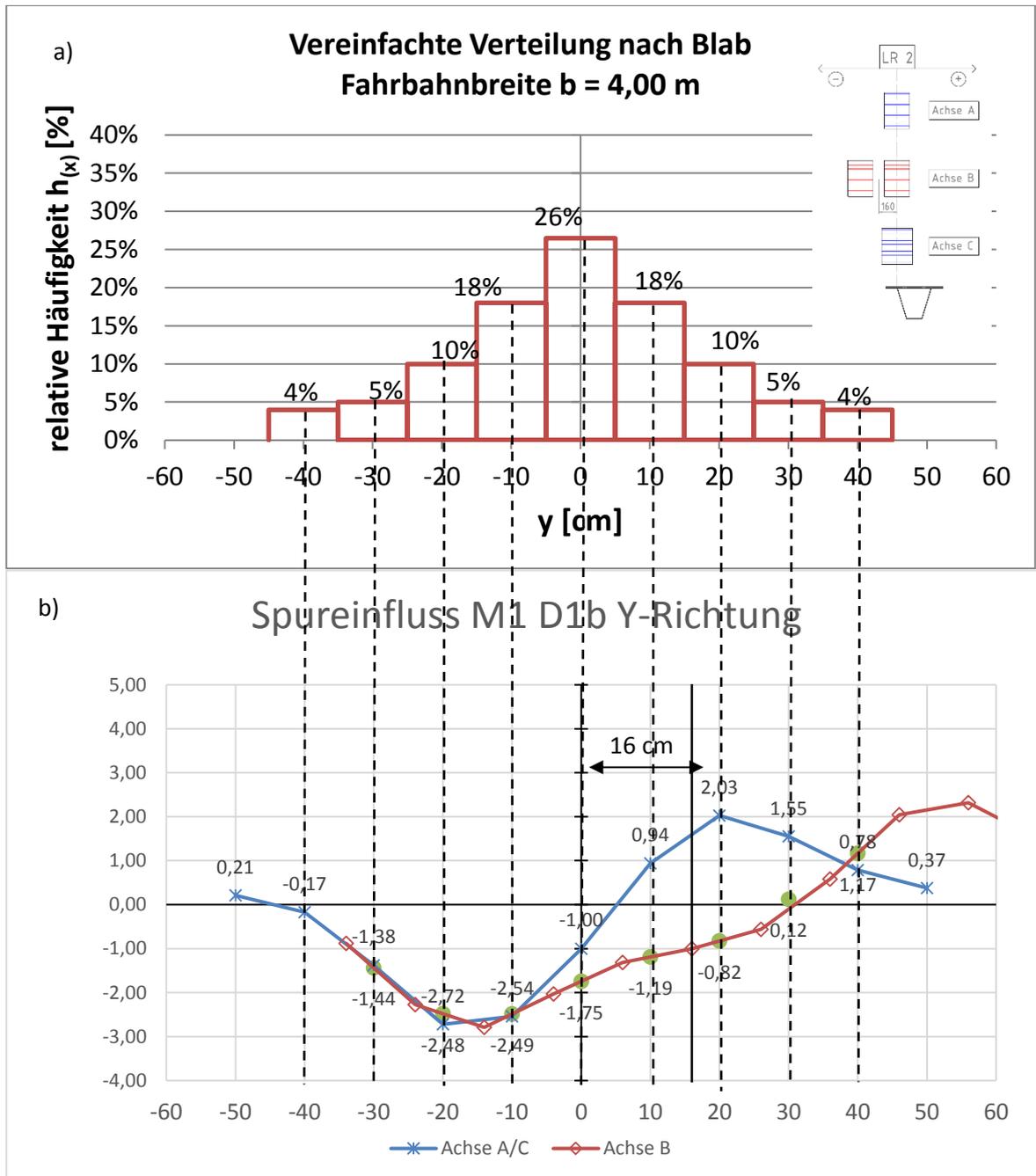


Abbildung 112: M1 - Spurverteilung nach Blab ($b=3,50$) und Quereinflusslinien bei verschobener Achse B

Anmerkung: Negatives Vorzeichen von $\eta \rightarrow$ Druckspannungen
 Positives Vorzeichen von $\eta \rightarrow$ Zugspannungen

In Tabelle 13 sind die Skalierungsfaktoren η noch einmal aufgelistet.

Achse	-40 cm	- 30 cm	- 20 cm	- 10 cm	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm
B	-0.17	-1.38	-2.72	-2.54	-1	0.94	2.03	1.55	0.78
A/C	-0.4	-1.44	-2.48	-2.49	-1.75	-1.19	-1	-0.82	-0.1

Tabelle 13: Übersicht der Skalierungsfaktoren je Fahrspur

Durch die abwechselnde Druck- und Zugbeanspruchung des Detailpunktes D1b war eine Skalierung der Spannungsspiele der Einzelfahrzeuge im Lastkollektiv wie in den Detailpunkten D1a und D2 nicht möglich, da maximale Spannungsspiele über die Spannungsverläufe von mehreren Fahrzeugen gemessen werden mussten. Abbildung 113 zeigt ein Beispiel anhand von drei beliebig gewählter Fahrzeuge.

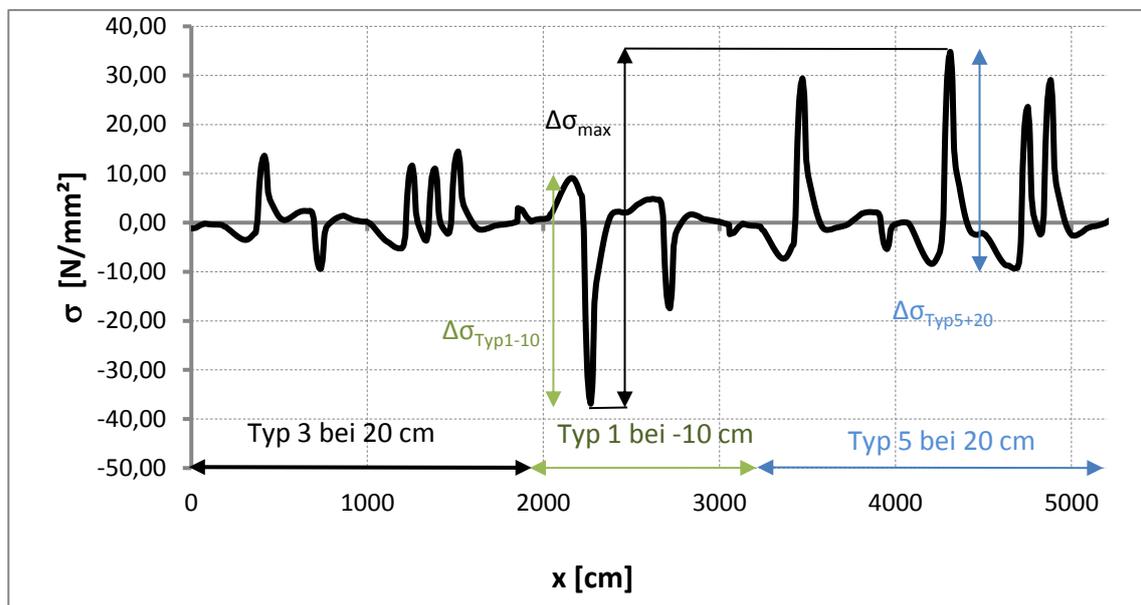


Abbildung 113: Drei beliebig gewählte Spannungsverläufe dreier Fahrzeuge

Um diesen Aspekt in die Berechnungen einfließen zu lassen, mussten zuerst die einzelnen Achsen je nach Spurlage mit den zugehörigen η -Werten aus den Einflusslinien in Brückenquerrichtung skaliert werden. Abbildung 114 zeigt beispielhaft die Skalierung der Achse A an den drei Spurlagen -20, 0 und 20.

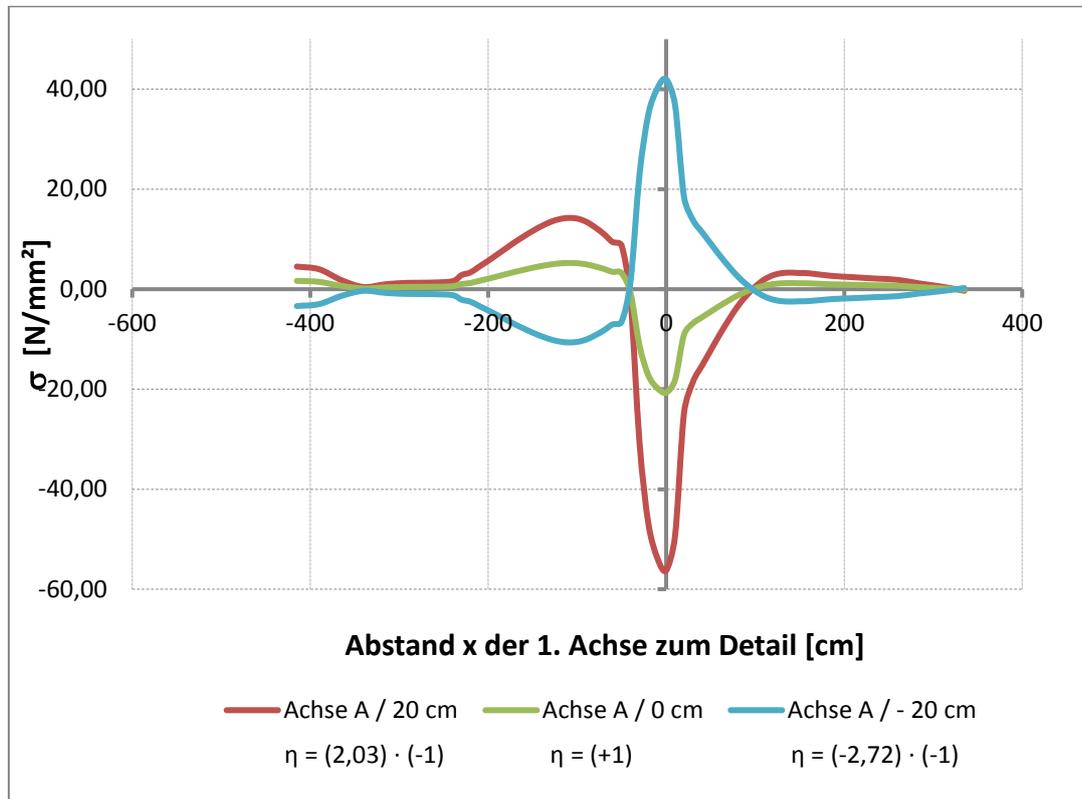


Abbildung 114: Längseinflusslinie der Achse A auf den Spurlagen 20 cm / 0 cm / - 20 cm

Tabelle 14 bis 16 zeigen die Spannungsverläufe der Achsen A bis C auf der jeweiligen Position in Brückenquerrichtung -40 cm bis 40 cm. In der ersten Tabelle sind die Spurlagen der Abbildung 107 farblich gekennzeichnet.

	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
-415	0,28	2,30	4,52	4,22	1,66	1,56	3,38	2,58	1,30
-390	0,25	2,02	3,99	3,73	1,47	1,38	2,98	2,27	1,14
-365	0,11	0,92	1,81	1,69	0,67	0,63	1,35	1,03	0,52
-340	0,03	0,22	0,44	0,41	0,16	0,15	0,32	0,25	0,12
-315	0,06	0,51	1,00	0,93	0,37	0,34	0,74	0,57	0,29
-290	0,08	0,64	1,27	1,19	0,47	0,44	0,95	0,72	0,36
-265	0,08	0,67	1,31	1,23	0,48	0,45	0,98	0,75	0,38
-240	0,10	0,81	1,60	1,50	0,59	0,55	1,20	0,91	0,46
-230	0,18	1,43	2,81	2,62	1,03	0,97	2,10	1,60	0,81
-220	0,21	1,70	3,35	3,12	1,23	1,16	2,50	1,91	0,96
-210	0,28	2,30	4,52	4,22	1,66	1,56	3,38	2,58	1,30
-200	0,36	2,88	5,68	5,31	2,09	1,96	4,24	3,24	1,63
-190	0,43	3,51	6,92	6,46	2,54	2,39	5,16	3,94	1,98
-180	0,51	4,14	8,17	7,63	3,00	2,82	6,10	4,66	2,34
-170	0,59	4,78	9,42	8,80	3,46	3,26	7,03	5,37	2,70
-160	0,66	5,35	10,55	9,86	3,88	3,65	7,88	6,01	3,03
-150	0,73	5,91	11,65	10,88	4,28	4,03	8,70	6,64	3,34
-140	0,79	6,40	12,62	11,79	4,64	4,36	9,42	7,19	3,62
-130	0,84	6,82	13,45	12,56	4,94	4,65	10,03	7,66	3,86
-120	0,88	7,11	14,01	13,08	5,15	4,84	10,45	7,98	4,02
-110	0,89	7,23	14,25	13,31	5,24	4,93	10,64	8,12	4,09
-100	0,88	7,16	14,12	13,18	5,19	4,88	10,54	8,04	4,05
-90	0,84	6,85	13,50	12,61	4,96	4,67	10,08	7,69	3,87
-80	0,77	6,28	12,39	11,57	4,55	4,28	9,24	7,06	3,55
-70	0,69	5,59	11,03	10,30	4,05	3,81	8,23	6,28	3,16
-60	0,59	4,77	9,39	8,77	3,45	3,25	7,01	5,35	2,69
-50	0,54	4,41	8,69	8,11	3,19	3,00	6,48	4,95	2,49
-40	0,14	1,15	2,27	2,12	0,83	0,78	1,69	1,29	0,65
-30	1,91	15,51	30,57	28,55	11,24	10,57	22,82	17,42	8,77
-20	2,93	23,78	46,87	43,76	17,23	16,20	34,98	26,71	13,44
-10	3,36	27,26	53,74	50,18	19,76	18,57	40,11	30,62	15,41
0	3,52	28,55	56,27	52,54	20,69	19,45	41,99	32,06	16,14
10	3,08	25,03	49,34	46,08	18,14	17,05	36,82	28,12	14,15
20	1,55	12,60	24,84	23,20	9,13	8,59	18,54	14,16	7,12
30	1,16	9,43	18,58	17,35	6,83	6,42	13,86	10,59	5,33
40	0,96	7,79	15,36	14,34	5,65	5,31	11,46	8,75	4,40
50	0,77	6,21	12,24	11,43	4,50	4,23	9,14	6,98	3,51
60	0,57	4,62	9,11	8,51	3,35	3,15	6,80	5,19	2,61
70	0,39	3,15	6,21	5,80	2,28	2,15	4,64	3,54	1,78
80	0,22	1,78	3,52	3,29	1,29	1,22	2,63	2,00	1,01
90	0,08	0,67	1,31	1,23	0,48	0,45	0,98	0,75	0,38
100	0,03	0,25	0,50	0,47	0,18	0,17	0,37	0,28	0,14
110	0,12	0,97	1,90	1,78	0,70	0,66	1,42	1,09	0,55
120	0,17	1,41	2,78	2,60	1,02	0,96	2,08	1,59	0,80
130	0,20	1,63	3,21	3,00	1,18	1,11	2,40	1,83	0,92
140	0,21	1,68	3,31	3,09	1,22	1,14	2,47	1,89	0,95
150	0,20	1,64	3,23	3,01	1,19	1,12	2,41	1,84	0,93
160	0,20	1,62	3,19	2,98	1,17	1,10	2,38	1,82	0,92
185	0,17	1,36	2,67	2,50	0,98	0,92	2,00	1,52	0,77
210	0,15	1,22	2,40	2,24	0,88	0,83	1,79	1,37	0,69
235	0,13	1,08	2,13	1,99	0,78	0,74	1,59	1,21	0,61
260	0,12	0,95	1,87	1,74	0,69	0,65	1,39	1,06	0,54
285	0,07	0,58	1,13	1,06	0,42	0,39	0,85	0,65	0,33
310	0,03	0,25	0,50	0,47	0,18	0,17	0,37	0,28	0,14
335	0,02	0,16	0,32	0,30	0,12	0,11	0,24	0,18	0,09

Tabelle 14: Einflusslinien in Brückenlängsrichtung der Achse A an verschiedenen Positionen in Brückenquerrichtung

	-40	-30	-20	-10	0	10	16	20	30	40
-415	-0,04	-0,13	-0,23	-0,23	-0,16	-0,11	-0,09	-0,08	-0,01	0,11
-390	-0,03	-0,10	-0,17	-0,17	-0,12	-0,08	-0,07	-0,05	-0,01	0,08
-365	-0,02	-0,07	-0,13	-0,13	-0,09	-0,06	-0,05	-0,04	-0,01	0,06
-340	-0,01	-0,02	-0,04	-0,04	-0,03	-0,02	-0,02	-0,01	0,00	0,02
-315	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-290	0,02	0,07	0,13	0,13	0,09	0,06	0,05	0,04	0,01	-0,06
-265	0,04	0,13	0,22	0,22	0,15	0,11	0,09	0,07	0,01	-0,10
-240	0,07	0,24	0,42	0,42	0,29	0,20	0,17	0,14	0,02	-0,20
-230	0,10	0,36	0,62	0,62	0,44	0,30	0,25	0,21	0,03	-0,29
-220	0,14	0,51	0,88	0,88	0,62	0,42	0,35	0,29	0,04	-0,41
-210	0,19	0,68	1,18	1,18	0,83	0,56	0,47	0,39	0,05	-0,55
-200	0,24	0,87	1,50	1,50	1,06	0,72	0,60	0,49	0,06	-0,70
-190	0,29	1,05	1,81	1,81	1,28	0,87	0,73	0,60	0,07	-0,85
-180	0,34	1,23	2,12	2,13	1,49	1,02	0,85	0,70	0,09	-1,00
-170	0,39	1,40	2,41	2,42	1,70	1,16	0,97	0,80	0,10	-1,13
-160	0,44	1,58	2,73	2,74	1,92	1,31	1,10	0,90	0,11	-1,28
-150	0,48	1,74	3,00	3,01	2,12	1,44	1,21	0,99	0,12	-1,41
-140	0,53	1,91	3,28	3,30	2,32	1,58	1,32	1,09	0,13	-1,54
-130	0,57	2,04	3,51	3,52	2,47	1,68	1,41	1,16	0,14	-1,65
-120	0,60	2,15	3,70	3,71	2,61	1,77	1,49	1,22	0,15	-1,74
-110	0,62	2,22	3,82	3,83	2,69	1,83	1,54	1,26	0,15	-1,79
-100	0,62	2,25	3,87	3,88	2,73	1,86	1,56	1,28	0,16	-1,82
-90	0,62	2,23	3,84	3,86	2,71	1,84	1,55	1,27	0,15	-1,81
-80	0,61	2,18	3,76	3,77	2,65	1,80	1,51	1,24	0,15	-1,77
-70	0,60	2,16	3,72	3,74	2,63	1,79	1,50	1,23	0,15	-1,75
-60	0,60	2,17	3,74	3,76	2,64	1,80	1,51	1,24	0,15	-1,76
-50	0,52	1,88	3,23	3,25	2,28	1,55	1,30	1,07	0,13	-1,52
-40	0,18	0,66	1,14	1,14	0,80	0,55	0,46	0,38	0,05	-0,53
-30	-1,06	-3,82	-6,59	-6,61	-4,65	-3,16	-2,66	-2,18	-0,27	3,10
-20	-1,80	-6,48	-11,16	-11,20	-7,87	-5,35	-4,50	-3,69	-0,45	5,24
-10	-2,09	-7,52	-12,95	-13,00	-9,14	-6,21	-5,22	-4,28	-0,52	6,09
0	-2,14	-7,72	-13,29	-13,34	-9,38	-6,38	-5,36	-4,39	-0,54	6,25
10	-1,74	-6,27	-10,80	-10,84	-7,62	-5,18	-4,35	-3,57	-0,44	5,08
20	-0,59	-2,14	-3,68	-3,70	-2,60	-1,77	-1,49	-1,22	-0,15	1,73
30	-0,28	-1,01	-1,75	-1,75	-1,23	-0,84	-0,70	-0,58	-0,07	0,82
40	-0,17	-0,60	-1,04	-1,05	-0,74	-0,50	-0,42	-0,34	-0,04	0,49
50	-0,09	-0,33	-0,56	-0,57	-0,40	-0,27	-0,23	-0,19	-0,02	0,27
60	-0,02	-0,07	-0,12	-0,12	-0,09	-0,06	-0,05	-0,04	0,00	0,06
70	0,05	0,18	0,30	0,30	0,21	0,14	0,12	0,10	0,01	-0,14
80	0,11	0,39	0,67	0,68	0,48	0,32	0,27	0,22	0,03	-0,32
90	0,15	0,56	0,96	0,96	0,68	0,46	0,39	0,32	0,04	-0,45
100	0,19	0,68	1,18	1,18	0,83	0,56	0,47	0,39	0,05	-0,55
110	0,21	0,76	1,32	1,32	0,93	0,63	0,53	0,44	0,05	-0,62
120	0,22	0,80	1,38	1,38	0,97	0,66	0,56	0,46	0,06	-0,65
130	0,22	0,79	1,35	1,36	0,95	0,65	0,55	0,45	0,05	-0,64
140	0,21	0,74	1,27	1,28	0,90	0,61	0,51	0,42	0,05	-0,60
150	0,19	0,68	1,18	1,18	0,83	0,56	0,47	0,39	0,05	-0,55
160	0,17	0,62	1,06	1,07	0,75	0,51	0,43	0,35	0,04	-0,50
185	0,10	0,38	0,65	0,65	0,46	0,31	0,26	0,21	0,03	-0,30
210	0,08	0,30	0,52	0,52	0,36	0,25	0,21	0,17	0,02	-0,24
235	0,06	0,22	0,39	0,39	0,27	0,18	0,16	0,13	0,02	-0,18
260	0,04	0,15	0,26	0,26	0,18	0,12	0,10	0,09	0,01	-0,12
285	0,02	0,07	0,13	0,13	0,09	0,06	0,05	0,04	0,01	-0,06
310	-0,02	-0,06	-0,11	-0,11	-0,07	-0,05	-0,04	-0,03	0,00	0,05
335	-0,05	-0,19	-0,32	-0,33	-0,23	-0,16	-0,13	-0,11	-0,01	0,15

Tabelle 15: Einflusslinien in Brückenlängsrichtung der Achse B an verschiedenen Positionen in Brückenquerrichtung

	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
-415	-0,02	-0,12	-0,24	-0,23	-0,09	0,08	0,18	0,14	0,07
-390	-0,05	-0,41	0,82	0,76	-0,30	0,28	-0,61	0,47	0,23
-365	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-340	0,02	0,18	-0,35	-0,33	0,13	-0,12	0,26	-0,20	-0,10
-315	0,03	0,28	-0,54	-0,51	0,20	-0,19	0,41	-0,31	-0,16
-290	0,05	0,41	-0,82	-0,76	0,30	-0,28	0,61	-0,47	-0,23
-265	0,07	0,55	-1,09	-1,02	0,40	-0,38	0,81	-0,62	-0,31
-240	0,09	0,76	-1,50	-1,40	0,55	-0,52	1,12	-0,85	-0,43
-230	0,14	1,11	-2,19	-2,05	0,81	-0,76	1,64	-1,25	-0,63
-220	0,19	1,56	-3,08	-2,88	1,13	-1,07	2,30	-1,76	-0,88
-210	0,26	2,12	-4,18	-3,90	1,54	-1,44	3,12	-2,38	-1,20
-200	0,33	2,69	-5,30	-4,95	1,95	-1,83	3,96	-3,02	-1,52
-190	0,40	3,26	-6,43	-6,00	2,36	-2,22	4,80	-3,66	-1,84
-180	0,47	3,85	-7,58	-7,08	2,79	-2,62	5,66	-4,32	-2,17
-170	0,54	4,42	-8,70	-8,13	3,20	-3,01	6,50	-4,96	-2,50
-160	0,61	4,97	-9,80	-9,15	3,60	-3,39	7,31	-5,59	-2,81
-150	0,68	5,49	-10,82	-10,10	3,98	-3,74	8,07	-6,16	-3,10
-140	0,73	5,94	-11,71	-10,93	4,30	-4,05	8,74	-6,67	-3,36
-130	0,78	6,32	-12,46	-11,63	4,58	-4,31	9,30	-7,10	-3,57
-120	0,81	6,59	-12,99	-12,13	4,78	-4,49	9,70	-7,40	-3,73
-110	0,83	6,74	-13,28	-12,40	4,88	-4,59	9,91	-7,57	-3,81
-100	0,82	6,68	-13,17	-12,30	4,84	-4,55	9,83	-7,51	-3,78
-90	0,79	6,42	-12,65	-11,81	4,65	-4,37	9,44	-7,21	-3,63
-80	0,73	5,97	-11,76	-10,98	4,32	-4,06	8,78	-6,70	-3,37
-70	0,66	5,39	-10,63	-9,92	3,91	-3,67	7,93	-6,06	-3,05
-60	0,59	4,77	-9,39	-8,77	3,45	-3,25	7,01	-5,35	-2,69
-50	0,40	3,23	-6,36	-5,94	2,34	-2,20	4,75	-3,63	-1,83
-40	-0,09	-0,74	1,46	1,36	-0,54	0,50	-1,09	0,83	0,42
-30	-1,72	-13,98	27,56	25,74	-10,13	9,53	-20,57	15,71	7,90
-20	-2,68	-21,79	42,94	40,10	-15,79	14,84	-32,05	24,47	12,31
-10	-3,09	-25,11	49,49	46,22	-18,20	17,10	-36,94	28,20	14,19
0	-3,23	-26,22	51,68	48,26	-19,00	17,86	-38,57	29,45	14,82
10	-2,80	-22,75	44,83	41,87	-16,48	15,49	-33,46	25,55	12,86
20	-1,39	-11,26	22,20	20,73	-8,16	7,67	-16,56	12,65	6,36
30	-1,00	-8,14	16,04	14,98	-5,90	5,54	-11,97	9,14	4,60
40	-0,82	-6,64	13,08	12,22	-4,81	4,52	-9,76	7,46	3,75
50	-0,64	-5,23	10,31	9,63	-3,79	3,56	-7,69	5,87	2,96
60	-0,47	-3,83	7,55	7,05	-2,78	2,61	-5,64	4,30	2,17
70	-0,31	-2,52	4,96	4,63	-1,82	1,71	-3,70	2,83	1,42
80	-0,16	-1,32	2,61	2,44	-0,96	0,90	-1,95	1,49	0,75
90	-0,04	-0,32	0,63	0,59	-0,23	0,22	-0,47	0,36	0,18
100	0,06	0,46	-0,90	-0,84	0,33	-0,31	0,67	-0,51	-0,26
110	0,13	1,05	-2,07	-1,93	0,76	-0,71	1,54	-1,18	-0,59
120	0,18	1,44	-2,84	-2,65	1,04	-0,98	2,12	-1,62	-0,81
130	0,19	1,54	-3,03	-2,83	1,11	-1,05	2,26	-1,73	-0,87
140	0,20	1,61	-3,18	-2,97	1,17	-1,10	2,38	-1,81	-0,91
150	0,20	1,59	-3,14	-2,93	1,15	-1,08	2,34	-1,79	-0,90
160	0,19	1,53	-3,01	-2,81	1,11	-1,04	2,25	-1,72	-0,86
185	0,17	1,36	-2,67	-2,50	0,98	-0,92	2,00	-1,52	-0,77
210	0,15	1,22	-2,40	-2,24	0,88	-0,83	1,79	-1,37	-0,69
235	0,12	0,94	-1,86	-1,74	0,68	-0,64	1,39	-1,06	-0,53
260	0,10	0,83	-1,63	-1,52	0,60	-0,56	1,22	-0,93	-0,47
285	0,07	0,60	-1,18	-1,10	0,43	-0,41	0,88	-0,67	-0,34
310	0,04	0,32	-0,63	-0,59	0,23	-0,22	0,47	-0,36	-0,18
335	-0,02	-0,18	0,35	0,33	-0,13	0,12	-0,26	0,20	0,10

- Tabelle 16: Einflusslinien in Brückenlängsrichtung der Achse C an verschiedenen Positionen in Brückenquerrichtung

Mit Hilfe dieser Einflusslinien wurden daraufhin durch Superposition der Spannungsverläufe der einzelnen Fahrzeuge infolge isolierter Überfahrt gebildet. Abbildung 115 zeigt beispielhaft die Einflusslinien des Fahrzeugtyps T1, wenn dieser bei den Positionen -20, 0 und +20 das Brückendeck überfährt.

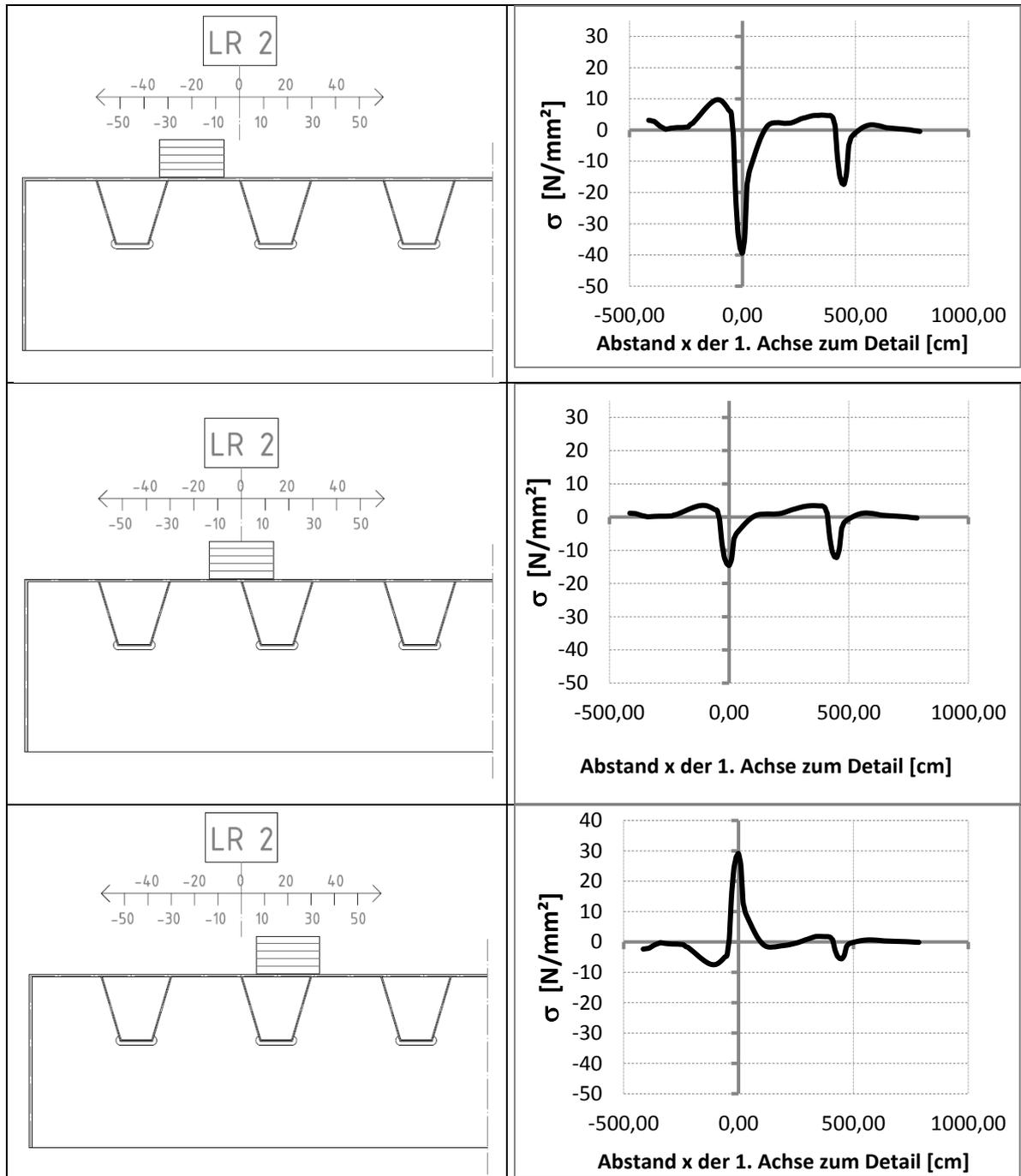


Abbildung 115: Vergleich der Spannungsverläufe des Details 1b Fahrzeug T1, je nach Achsstellung

Tabelle 17 zeigt die Verkehrsverteilung von 1000 Fahrzeugen aufgeteilt auf die Fahrzeugtypen in Spalte n_{Ti} . Die Fahrzeugtypen wurden anhand der Häufigkeitsverteilung nach Blab (h_i) der einzelnen Fahrspuren (-40 cm bis +40 cm) aufgeteilt. Als Beispiel: der Fahrzeugtyp T2 quert fünf Mal das Brückendeck auf der Fahrspur -20 cm. Aufgrund von Rundung beträgt die Summe von n_i 1002 Fahrzeuge.

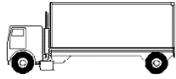
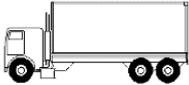
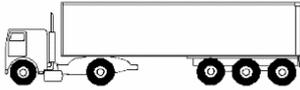
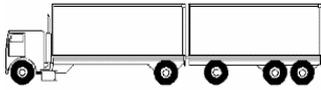
Typ-Nr.	Fzg. Position (y)	n_{Ti}	h_i	n_i
T1 	-40	200	0.04	8
	-30		0.05	10
	-20		0.1	20
	-10		0.18	36
	0		0.26	52
	10		0.18	36
	20		0.1	20
	30		0.05	10
	40		0.04	8
T2 	-40	50	0.04	2
	-30		0.05	3
	-20		0.1	5
	-10		0.18	9
	0		0.26	13
	10		0.18	9
	20		0.1	5
	30		0.05	3
	40		0.04	2
T3 	-40	500	0.04	20
	-30		0.05	25
	-20		0.1	50
	-10		0.18	90
	0		0.26	130
	10		0.18	90
	20		0.1	50
	30		0.05	25
	40		0.04	20
T4 	-40	150	0.04	6
	-30		0.05	8
	-20		0.1	15
	-10		0.18	27
	0		0.26	39
	10		0.18	27
	20		0.1	15
	30		0.05	8
	40		0.04	6
T5 	-40	100	0.04	4
	-30		0.05	5
	-20		0.1	10
	-10		0.18	18
	0		0.26	26
	10		0.18	18
	20		0.1	10
	30		0.05	5
	40		0.04	4
		1000		1002

Tabelle 17: Verteilung der Fahrzeugtypen auf Fahrspuren -40 bis +40

Danach wurden die Spannungsverläufe der 1002 Überfahrten mittels Zufallsgenerator aneinandergereiht und, mit Hilfe der Rainflow-Methode, die Lastspiele ausgewertet. Damit wurde das Lastkollektiv auf Abbildung 116 gebildet und $\Delta\sigma_e$ errechnet. Es wurden insgesamt vier unterschiedliche, zufallsgenerierte, Abfolgen analysiert und ausgewertet. Die jeweiligen Einstufenkollektive $\Delta\sigma_e$ der vier Abfolgen zeigen allerdings vernachlässigbar, geringe Abweichungen voneinander.

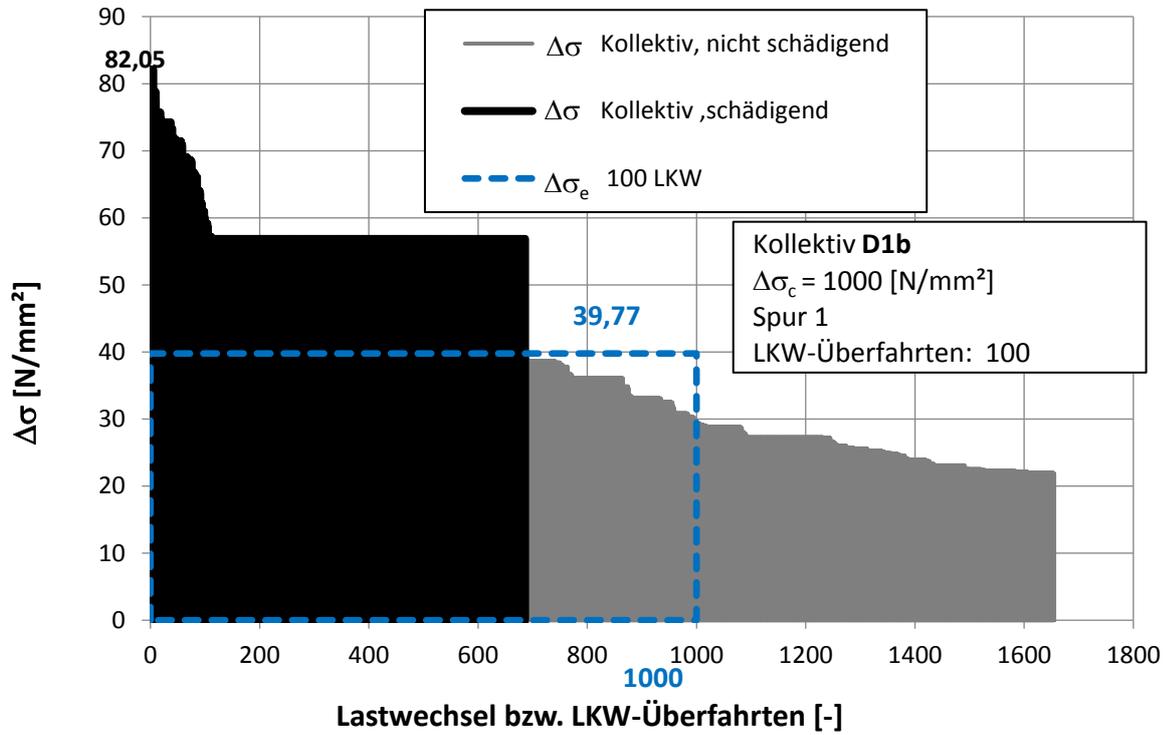


Abbildung 116: M1 - Lastkollektiv und schadensäquivalentes EK des Details 1b mit Spurvverteilung nach Blab (b=4m)

A.5.3 Detail 2

A.5.3.1 Zentrische Überfahrt

Die Definition der zentrischen Überfahrt befindet sich in Kapitel A.5.1. Für das Lastkollektiv, das auf Abbildung 117 zu sehen ist, wurden die Spannungsspiele aus die Detailpunkt 2 analysiert.

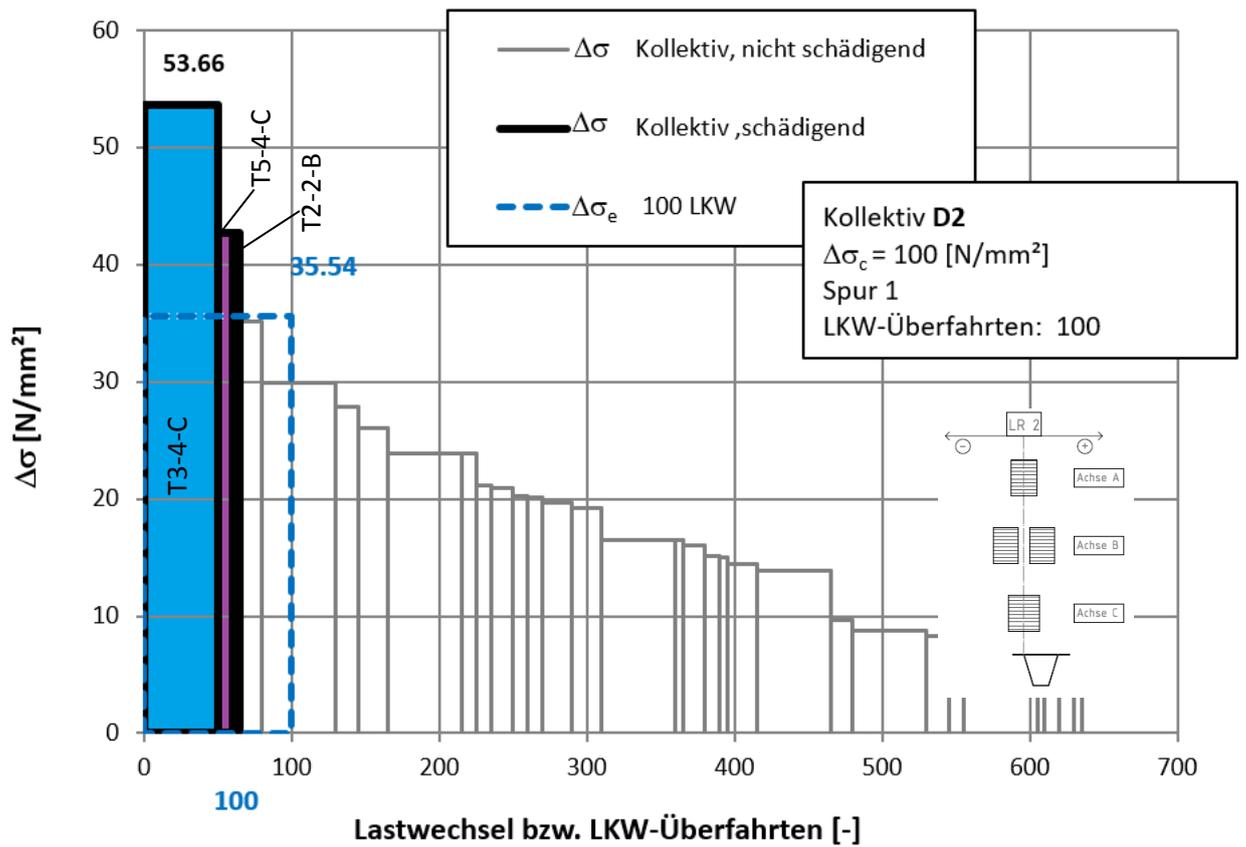


Abbildung 117: M1 – Lastkollektiv der zentrischen Überfahrt an D2

A.5.3.2 Reale Achsgeometrie

Um die Reale Achsgeometrie zu berücksichtigen wurde die Einflusslinien in Brückenquerrichtung der einzelbereiften und der zwillingsbereiften Achsen ermittelt. Da die Achse B zu den anderen beiden Achsen um 16 cm verschoben ist und Achse C die maximalen Spannungsspiele verursacht, wurden die Kollektivteile der Achse B mit Hilfe der Quereinflusslinie modifiziert. Abbildung 118 zeigt die Einflusslinie der Achse B und den konservativ gewählten Skalierungsfaktor $\eta = 0,81$.

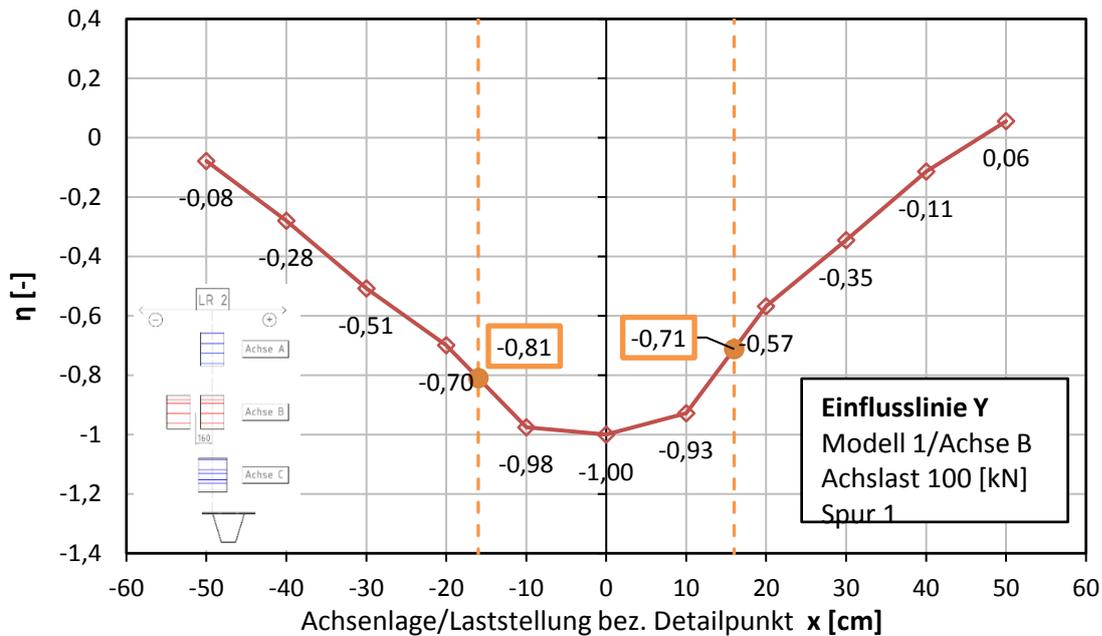


Abbildung 118: M1 – Lasteinflusslinie in Querrichtung Achse B Detail 2

Abbildung 119 zeigt das, aufgrund der realen Achsgeometrie, modifizierte Lastkollektiv. Es ist ersichtlich, dass aufgrund der Reduktion der $\Delta\sigma$, die durch Achse B verursacht wurden, ein geringfügig vermindertes schadensäquivalentes Einstufenkollektiv entsteht.

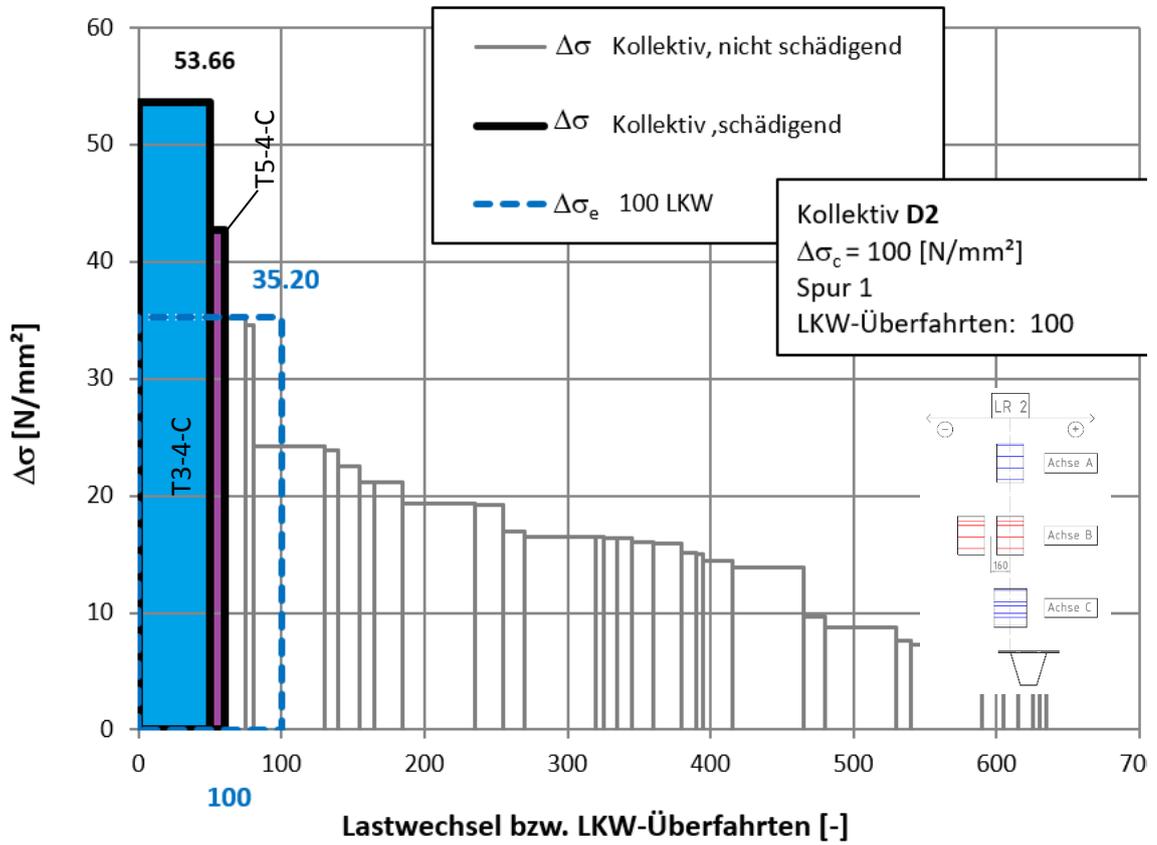


Abbildung 119: M1 – Lastkollektiv unter Berücksichtigung der realen Achsgeometrie an D2

A.5.3.1 Häufigkeitsverteilung in Brückenquerrichtung nach Blab

Abbildung 120a zeigt die vereinfachte Spurverteilung nach Blab bei einer Fahrbahnbreite von 3,5 m und Abbildung 120b die dazugehörigen η -Werte des Spureinflusses der einzel- und zwillingsbereiften Achsen. Achse B wurde hierbei um 16 cm verschoben um die reale Achsgeometrie zu berücksichtigen.

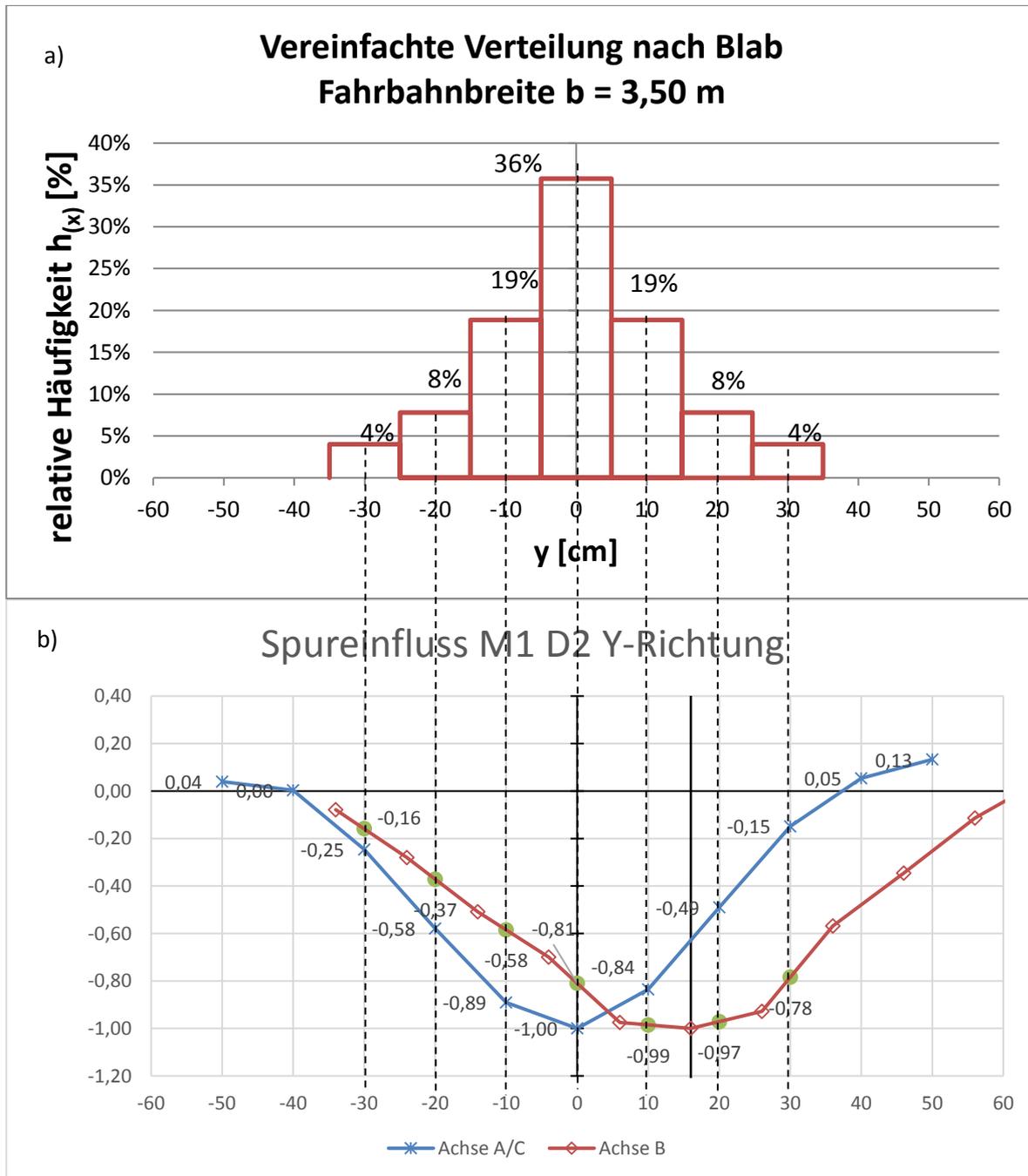


Abbildung 120: M1 - Spurverteilung nach Blab ($b=3,5\text{ cm}$) dazugehörige und die Quereinflusslinien der verschobenen Achse B

Anmerkung: Negatives Vorzeichen von $\eta \rightarrow$ Druckspannungen
 Positives Vorzeichen von $\eta \rightarrow$ Zugspannungen

In Tabelle 18 sind die Skalierungsfaktoren η noch einmal aufgelistet.

Achse	- 30 cm	- 20 cm	- 10 cm	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm
B	- 0,16	- 0,37	- 0,58	- 0,81	- 0,84	- 0,49	- 0,15
A/C	- 0,25	- 0,58	- 0,89	- 1,00	- 0,99	- 0,97	- 0,78

Tabelle 18: Übersicht der Skalierungsfaktoren je Fahrspur

Abbildung 121 stellt das modifizierte Lastkollektiv aufgrund Berücksichtigung realer Achsgeometrie der Spurverteilung nach Blab für Fahrstreifenbreiten von $b = 3,5 m$ dar.

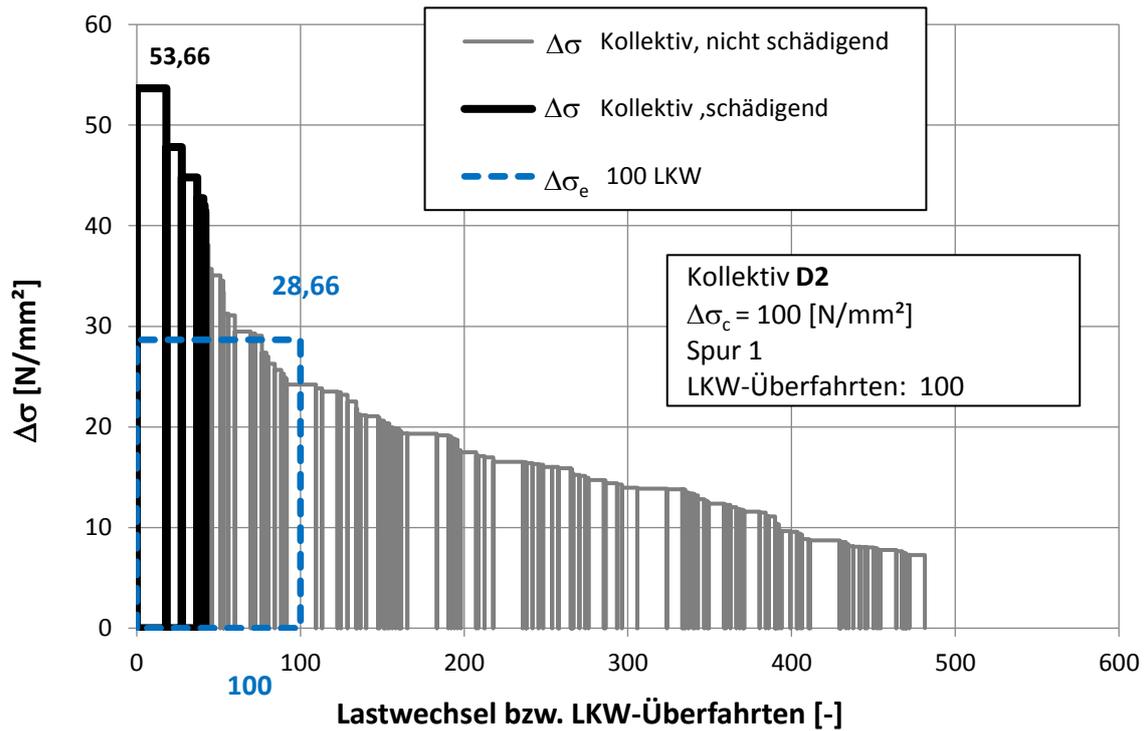


Abbildung 121: M1 - Modifiziertes Lastkollektiv und schadensäquivalentes EK des Details 2 mit Spurverteilung nach Blab ($b=3,5 m$)

A.5.3.2 Verteilung nach Eurocode 1991-2

Die Berechnungen für das Lastkollektiv laut EN 1991-2 erfolgt analog zu der Berechnung mit der Spurverteilung nach Blab.

Abbildung 122a zeigt die Verteilung nach EN und Abbildung 122b die dazugehörigen η -Werte der Quereinflusslinie des Details 2.

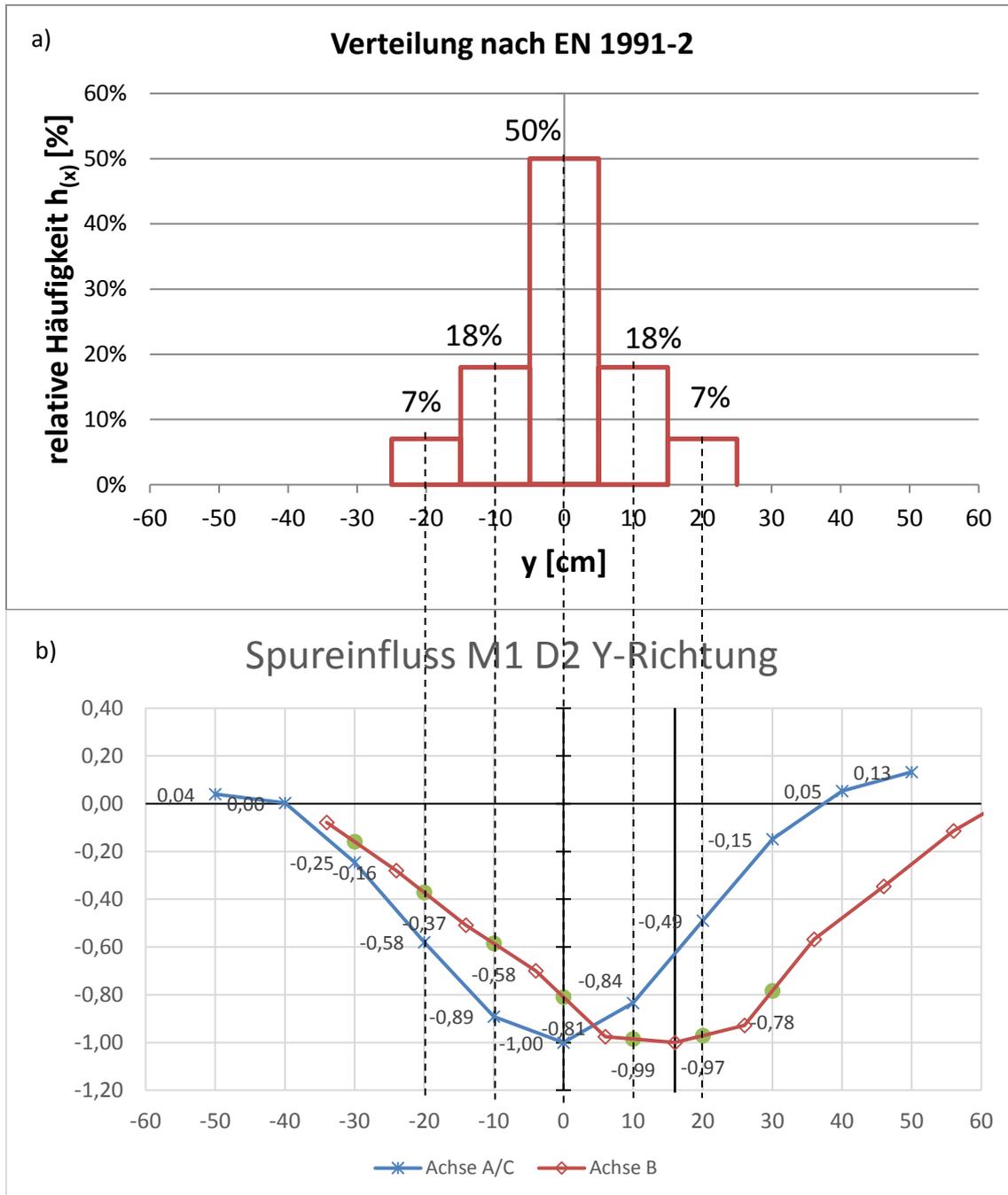


Abbildung 122: Spurverteilung nach EN 1991-2 und die dazugehörige Quereinflusslinien der verschobener Achse B

Anmerkung: Negatives Vorzeichen von η \rightarrow Druckspannungen
 Positives Vorzeichen von η \rightarrow Zugspannungen

In Tabelle 19 sind die Skalierungsfaktoren η noch einmal aufgelistet.

Achse	- 20 cm	- 10 cm	0 cm	10 cm	20 cm
B	- 0,37	- 0,58	- 0,81	- 0,84	- 0,49
A/C	- 0,58	- 0,89	- 1,00	- 0,99	- 0,97

Tabelle 19:Übersicht der Skalierungsfaktoren je Fahrspur

Abbildung 123 stellt das modifizierte Lastkollektiv aufgrund der Spurverteilung nach EN 1991-2 dar.

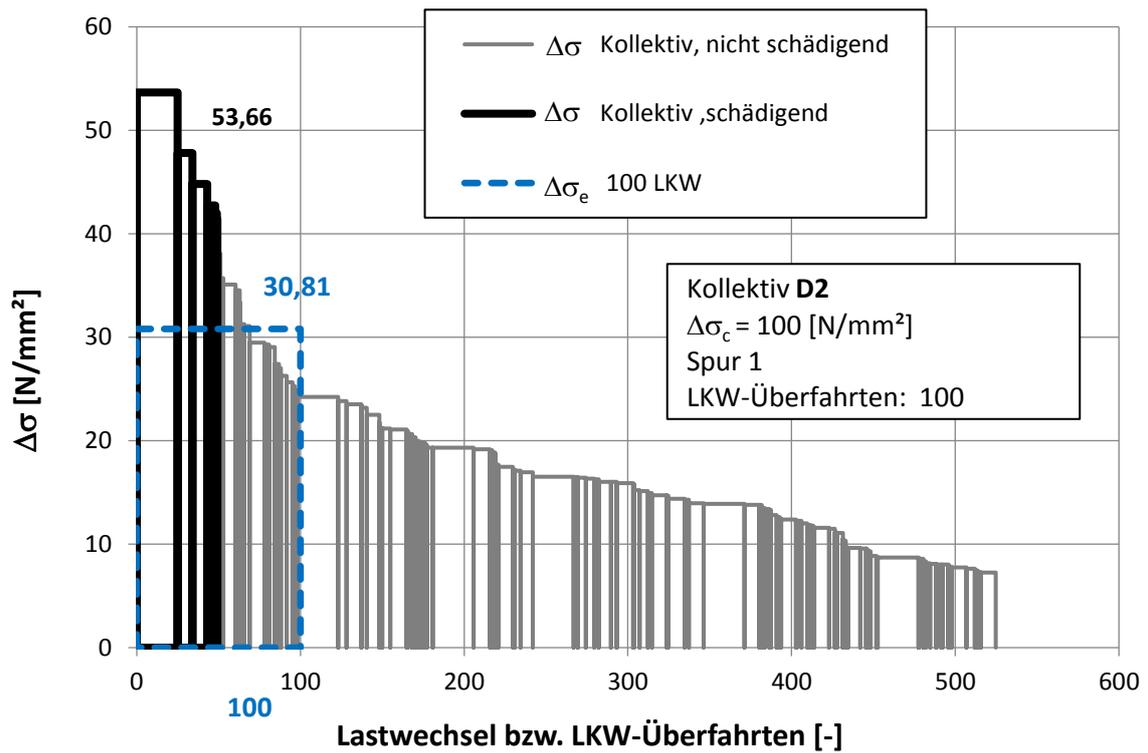


Abbildung 123: M1 - Modifiziertes Lastkollektiv und schadensäquivalentes EK des Details 2 mit Spurverteilung nach EN 1991-2

Anhang B

B Modell 2: Orthotrope Platte – Querträgerabstand $e_{QT}=4m$

Das Berechnungsbeispiel aus dem Leitfaden zum DIN Fachbericht 103 diente als Basis für dieses Modell.

B.1 Geometrie

Das Brückendeck besteht aus zwei Hauptträgern, fünf Querträgern bzw. Querrippen und zwölf trapezförmige Längsrippen als Grundgerüst, das vom Deckblech bedeckt ist. Abbildung 124 zeigt den Grundriss des Modells. Abbildung 125 und Abbildung 126 stellen die Schnitte A-A und B-B dar. Abbildung 127 zeigt eine genaue Darstellung der Rippen.

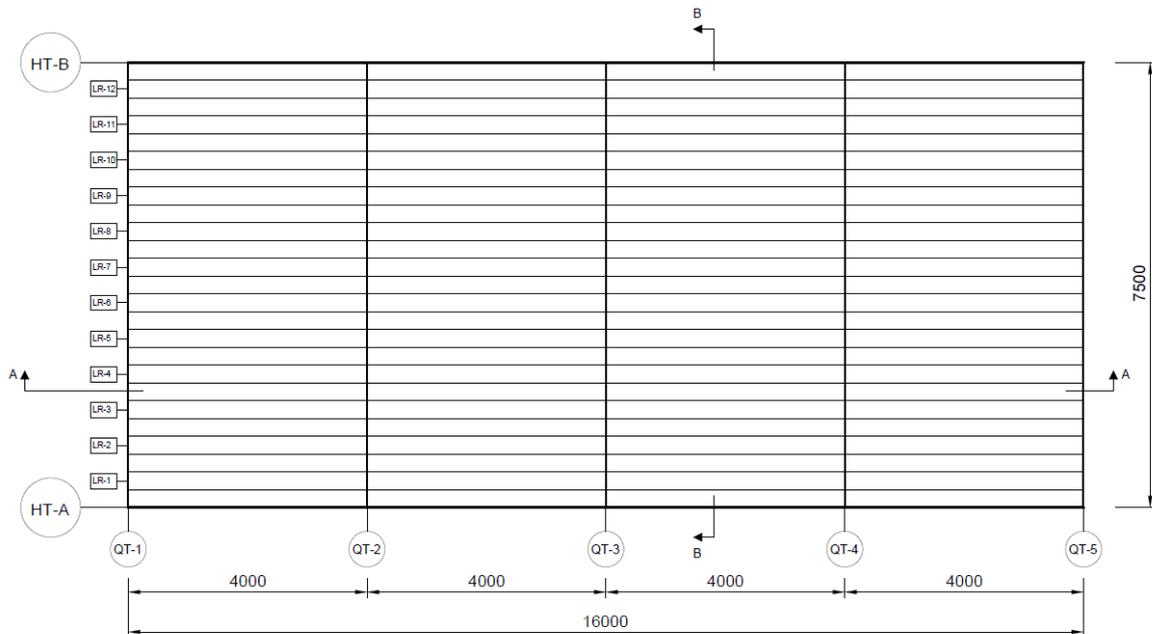


Abbildung 124: Modell 2 -Grundriss des Deckblechs

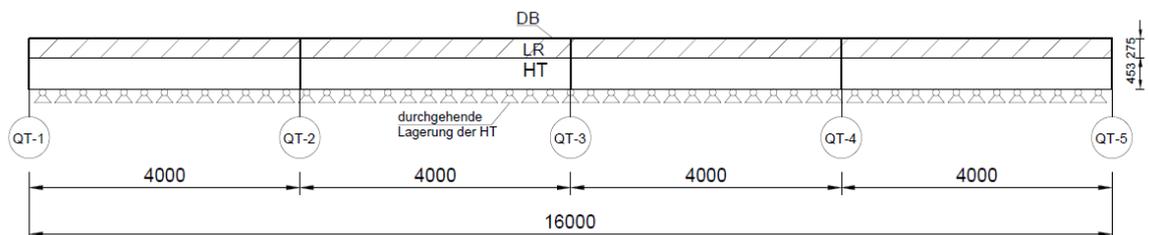


Abbildung 125: Modell 2 Schnitt A-A

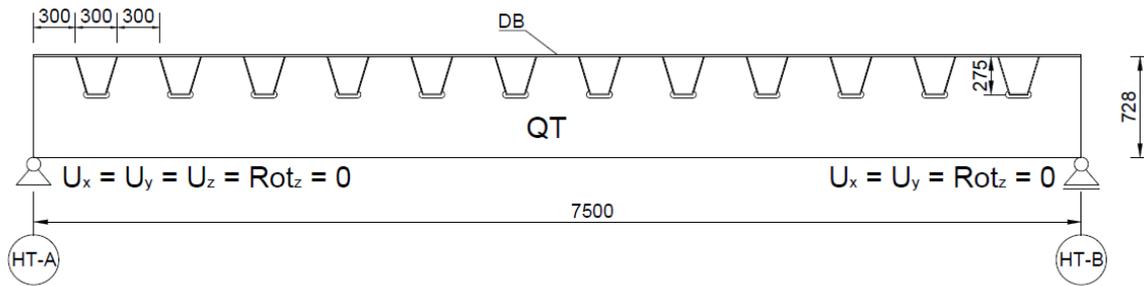


Abbildung 126: Modell 2 – Schnitt B-B

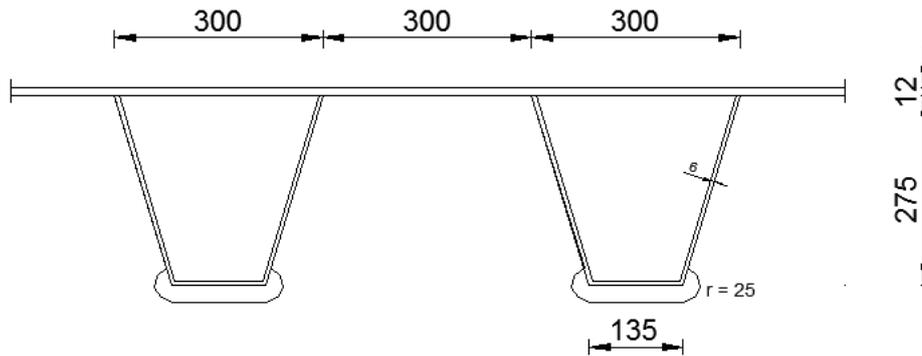


Abbildung 127: Modell 2 – Abmessungen der Längsrippen

B.2 Finite-Elemente-Modellierung

Die FE-Modellierung erfolgte im Programm Abaqus [12]. Für Modell 2 wurden 2 Varianten im Programm Abaqus modelliert, beide entsprechen den Geometrien aus Kapitel B.1:

Variante A: alle Rippen wurden als Schalenelemente modelliert, die Spannungen der Details 1a und 2 wurden damit ermittelt. Die Definition der Details 1a und 2 sind in Abschnitt 4 zu finden.

Variante B: Längsrippe 2 wurde als Volumenelement modelliert um genauere Spannungswerte des Details 1b zu erhalten. Die Definition von Detail 1b ist in Abschnitt 4.1 zu finden.

Im Folgenden werden die Modellparameter der Variante A erläutert.

B.2.1 Materialeigenschaften

Das gesamte Modell des Brückenelements wurde aus Stahl modelliert. Es wurden folgende Eigenschaften angewandt:

- Elastizitätsmodul $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$
- Querdehnungszahl/Poisson'sche Zahl $\nu = 0,3$

B.2.2 Bauteileigenschaften – Variante A

Das Brückendeck wurde aus einzelnen Bauteilen modelliert. Diese können im Programm Abaqus durch die Modellierungsart als Volumen-, Schalen- und Stabelemente dargestellt werden. Tabelle 20 zeigt einen Überblick über die Modellierungsarten der Bauteile.

Bauteile	Dicke	Element	Abbildung
Deckblech	$t_{DB} = 12 \text{ mm}$	solid	Abbildung 128
Schweißnähte LR an DB	siehe Geometrie	solid	Abbildung 129
Hauptträger	$t_{HT} = 12 \text{ mm}$	shell	Abbildung 130
Querträger	$t_{QT} = 8 \text{ mm}$	shell	Abbildung 131
Längsrippen	$t_{LR} = 6 \text{ mm}$	shell	Abbildung 132
Querträger Untergurt	160x8	beam	Abbildung 133

Tabelle 20: Übersicht der Bauteile und ihrer Eigenschaften

In Abbildung 128 bis Abbildung 133 findet man Darstellungen der Bauteile zur Übersicht. Die genauen Geometrien sind Kapitel B.1 zu entnehmen.

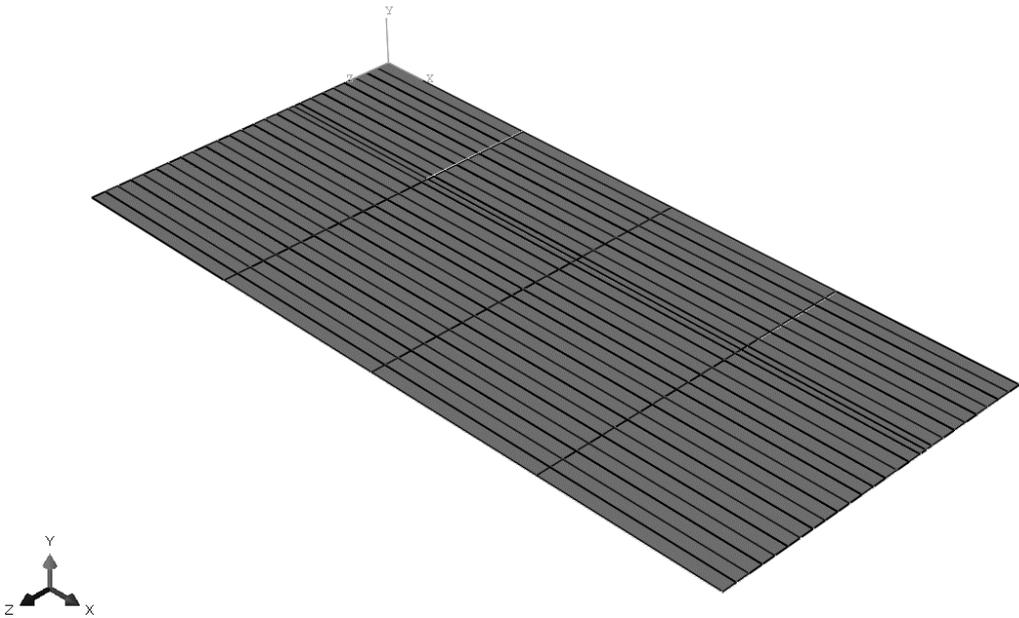


Abbildung 128: Modell 2 - Deckblech

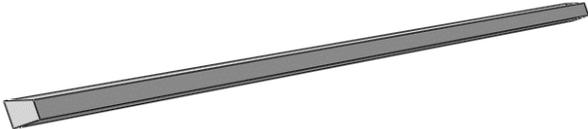


Abbildung 129: Modell 2 – Schweißnaht

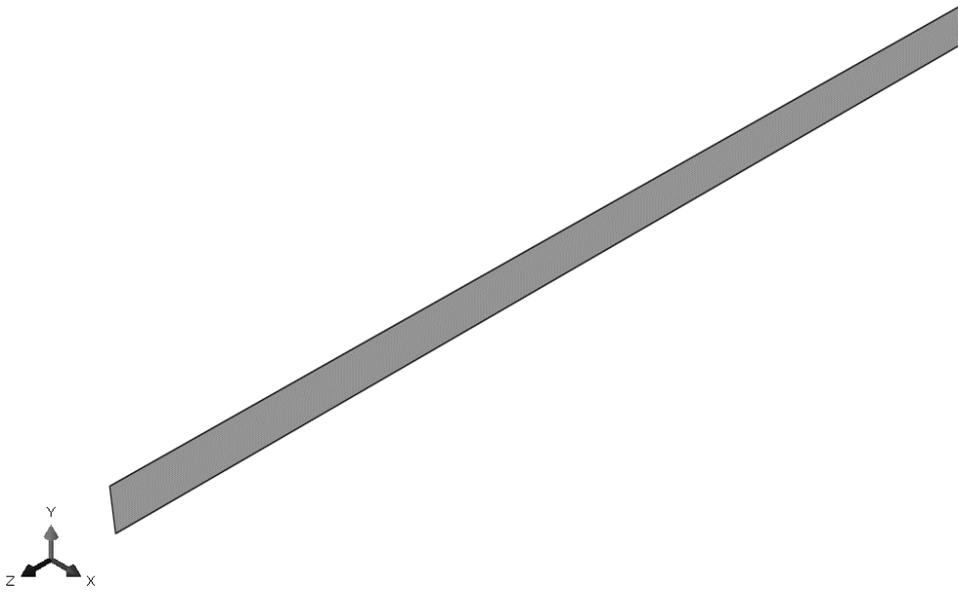


Abbildung 130: Modell 2 – Hauptträger

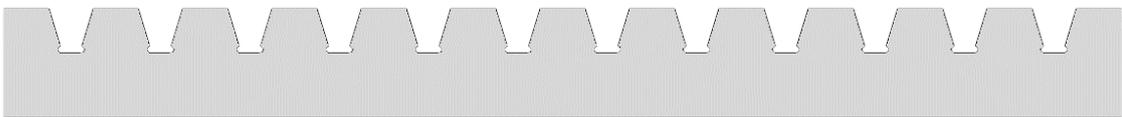


Abbildung 131: Modell 2 – Querträger

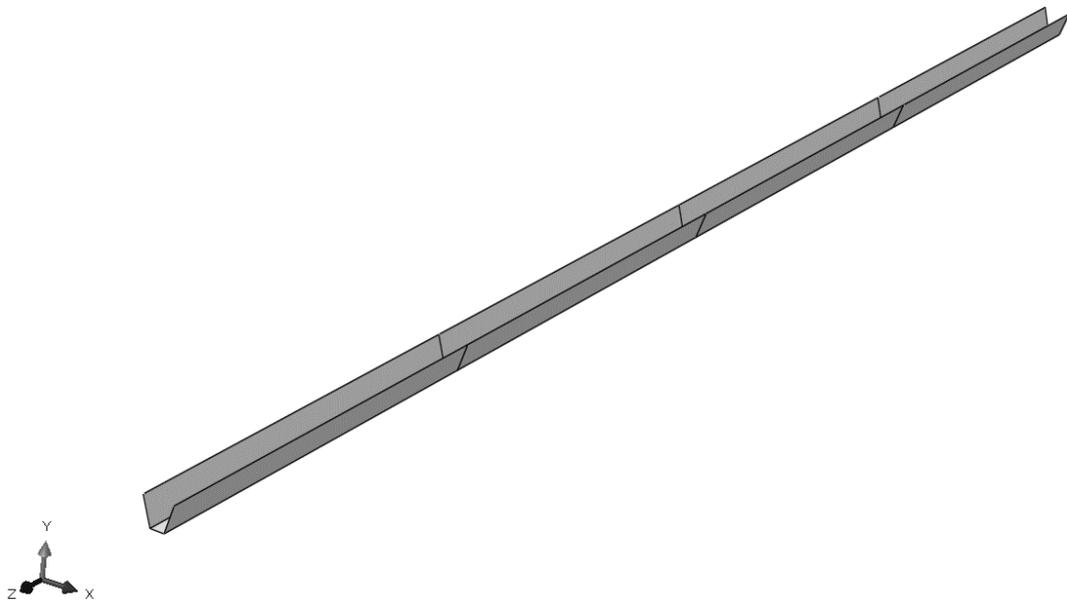


Abbildung 132: Modell 2 – Längsrippe



Abbildung 133: Modell 2 – Querträger Untergurt

B.2.3 Netzgenerierung – Variante A

Abbildung 134 zeigt die Netzgenerierung des Modells 2. Das Deckblech wurde in einen inneren, feinvernetzten Part und in einen äußeren, grob vernetzten Part geteilt. Desweiteren wurde an der Längsrippe 2 mittig eine Netzfeinheit von $10 \times 10 \text{ mm}$ verwendet. Die vorgegebenen Netzfeinheiten sind ebenfalls Abbildung 134 zu entnehmen, diese können allerdings aufgrund der automatischen Optimierung variieren. Abbildung 135 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt des verfeinerten Netzes in Längsrippe 2.

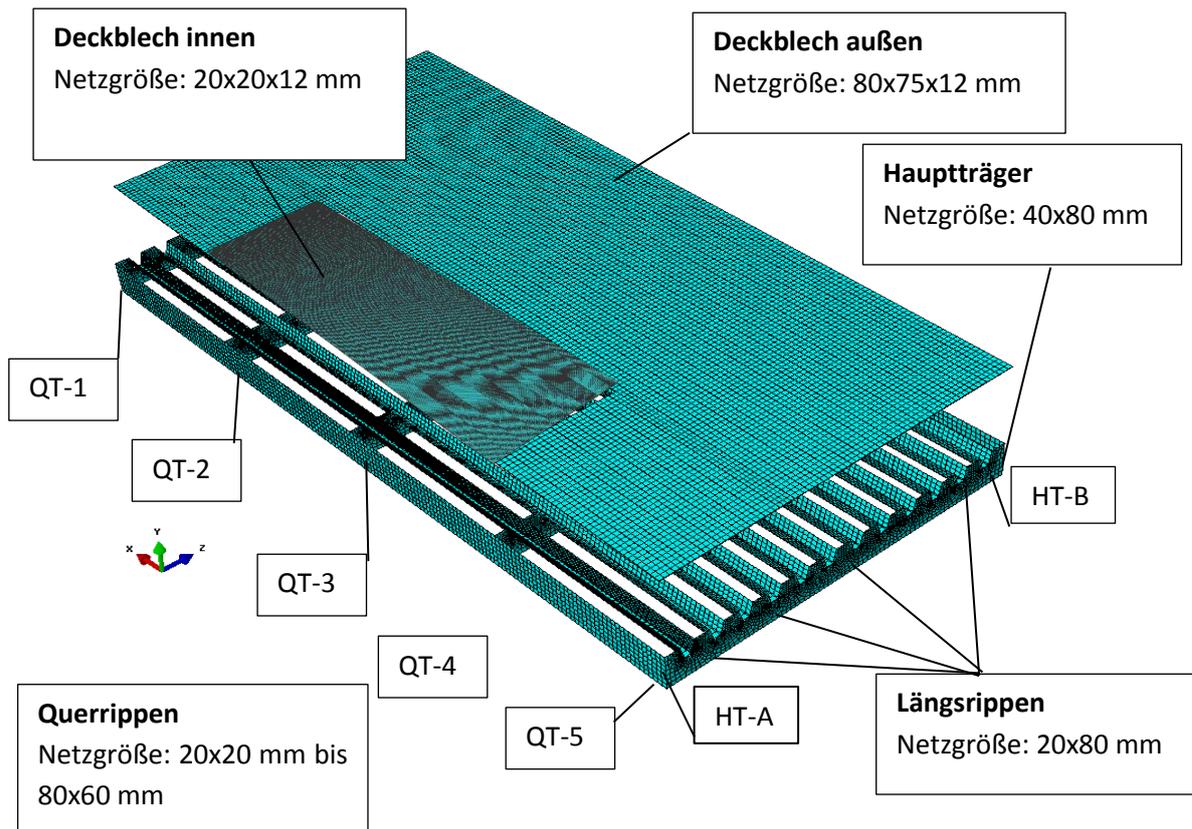


Abbildung 134: Bauteile mit verschiedenen Netzfeinheiten

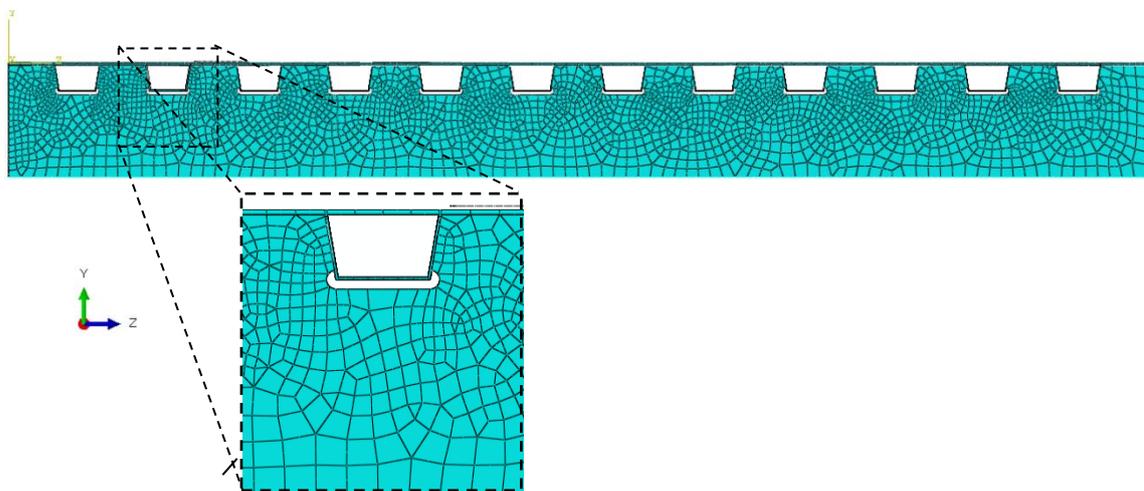


Abbildung 135: Netzverfeinerung im Bereich der Längsrippe 2

B.2.4 Bauteilkopplungen – Variante A

Die einzelnen Bauteile werden durch Kopplungen miteinander verbunden. In Tabelle 21 werden die Verbindungstypen der Bauteile zueinander aufgelistet.

Bauteil 1	Bauteil 2	Kopplungstyp
Hauptträger	Querträger, Längsrippe	Merge
Außenseite Deckblech	Schweißnähte	Merge
Innenseite Deckblech	Außenseite Deckblech	Tie
Rippen schalenförmig	Deckblech	Shell-to-solid
Querträger	QT-Untergurt	Tie

Tabelle 21: Übersicht der Bauteilkopplungen

Dabei bezeichnet man als „merge“ die Verbindung zwischen Elementen, die damit starr zusammengefügt werden, und so als ein Bauteil gelten. „Tie“ ist die starre Verbindung zwischen zwei Elementen, sie bleiben allerdings als einzelne Bauteile bestehen. Um eine Kopplung zwischen Schalenelement und Volumenelement herzustellen ist die Verbindung „shell-to-solid“ notwendig.

B.2.5 Variante B

Um bei Detail 1b genauere Ergebnisse zu erzielen wurde die Längsrippe 2 in einem weiteren Modell als Volumselement (siehe Abbildung 136) modelliert. Da das Modell in allen Geometrien, Materialeigenschaften und Verbindungen der Variante A entspricht wird nur auf die Besonderheiten der Variante B eingegangen.

Die Kopplung zwischen Längsrippe 2 und Deckblech erfolgte mittels der Funktion „Tie“.

Die Netzgenerierung im mittleren Bereich der Rippe beträgt $20 \times 20 \times 6$ mm und im äußeren Bereich $100 \times 100 \times 6$ mm.

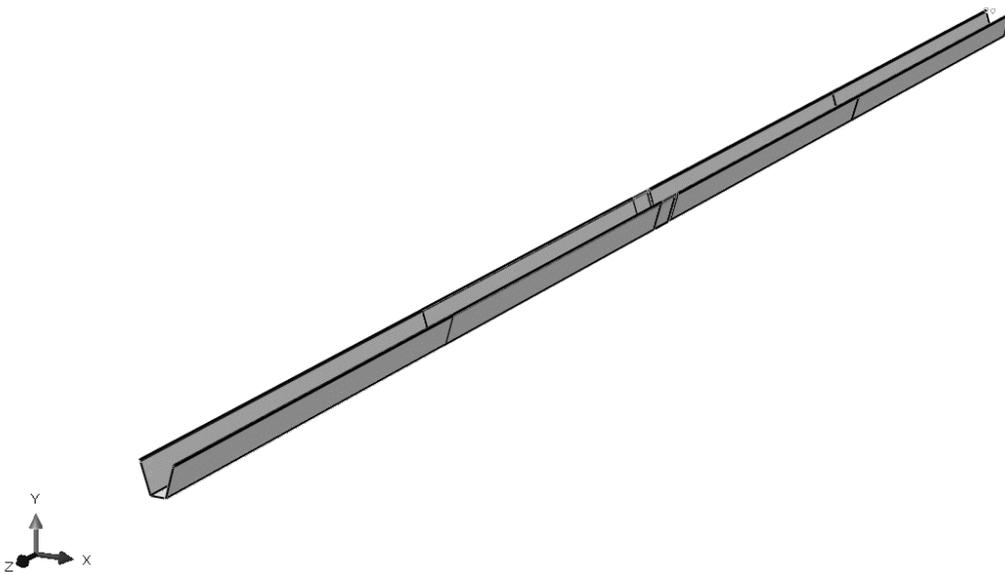


Abbildung 136: Längsrippe 2 als solid-Element gebildet

B.3 Einflusslinien

In Abbildung 137 bis Abbildung 154 werden die jeweiligen Einflusslinien zu allen drei Details im Modell 2, sowohl in X- als auch in Y-Richtung dargestellt. Zuerst wurde ein Lastenzug in Längsrichtung zentrisch über den Rippensteg generiert. Die Auswertung der Spannung erfolgte für jede Laststellung am jeweiligen Detailpunkt. An der Laststellung mit der maximalen Spannungswirkung wurde dann im selben Verfahren die Einflusslinie in Brückenquerrichtung erstellt.

xBrückenlängsrichtung

yBrückenquerrichtung

B.3.1 Detail D1a – Einflusslinie in Brückenlängsrichtung

Abbildung 137 bis Abbildung 139 zeigen, dass die maßgebende Laststellung genau über dem Detailpunkt 1a liegt. In den folgenden Grafiken ist der Querträger 2 und 4 jeweils mit einer dickeren vertikalen Linie bei $x = -430$ und $x = 370$ gekennzeichnet.

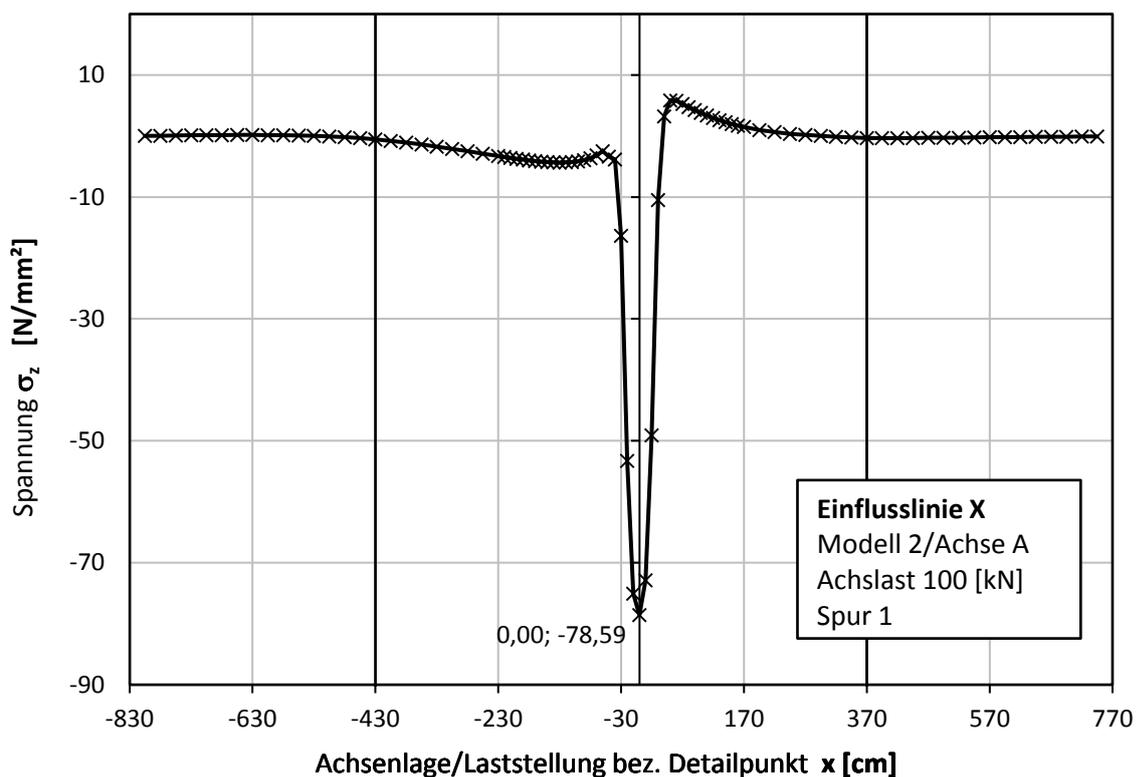


Abbildung 137: Spureinfluss Modell 2 D1a – Achse A

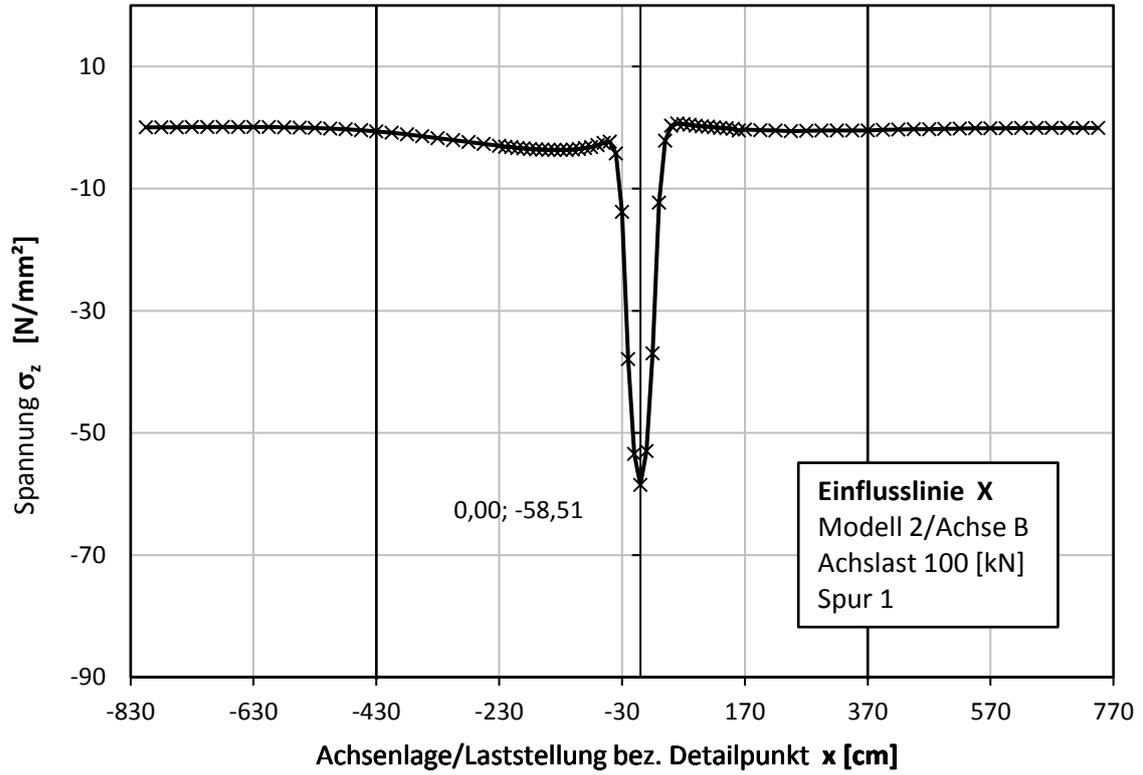


Abbildung 138: Spureinfluss Modell 2 D1a – Achse B

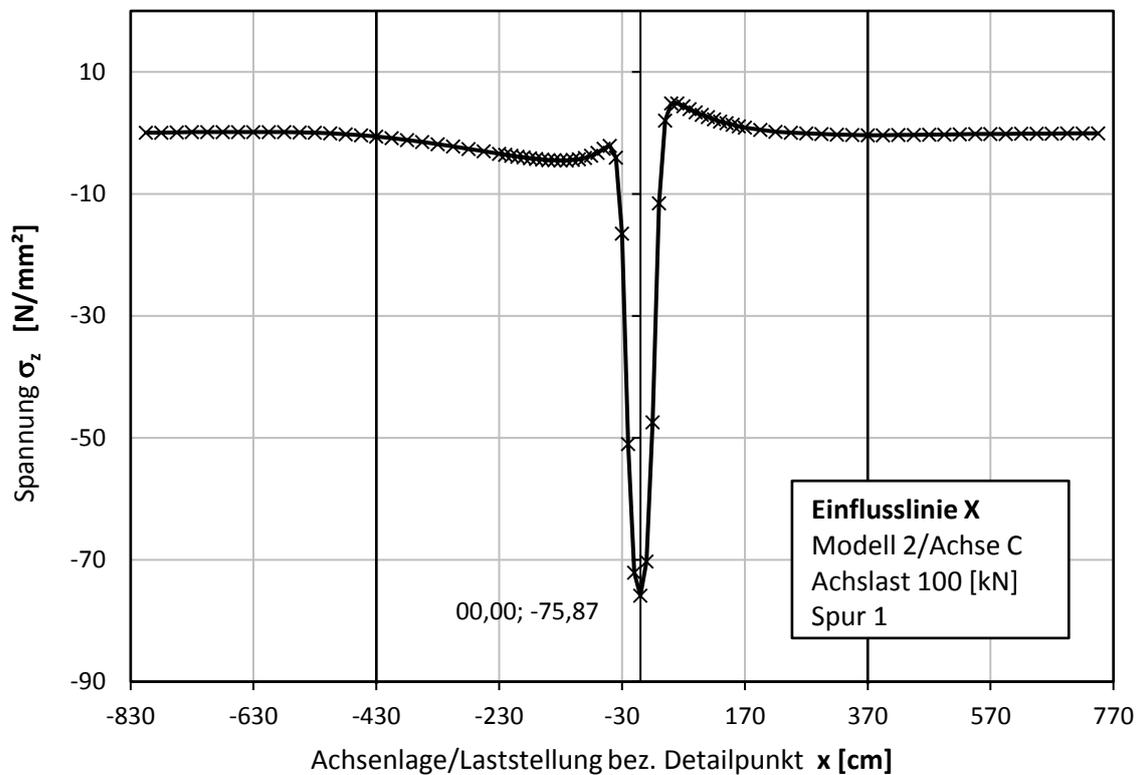


Abbildung 139: Spureinfluss Modell 2 D1a – Achse C

B.3.2 Detail D1a – Einflusslinie in Brückenquerrichtung

In den Abbildung 140 ist die Quereinflusslinie beider Achsen für Detail D1a dargestellt. Hier wird durch die Verschiebung der Achse A um 16 cm die reale Achsgeometrie dargestellt. Die Achse B bleibt zentrisch, da sie höhere Spannungsschwingspiele verursacht. Somit führt diese Berechnung zu konservativeren Ergebnissen. In Abbildung 141 und Abbildung 142 sind die einzelnen Quereinflusslinien der Achse A bzw. B dargestellt. Die Werte der Ordinate wurden normiert.

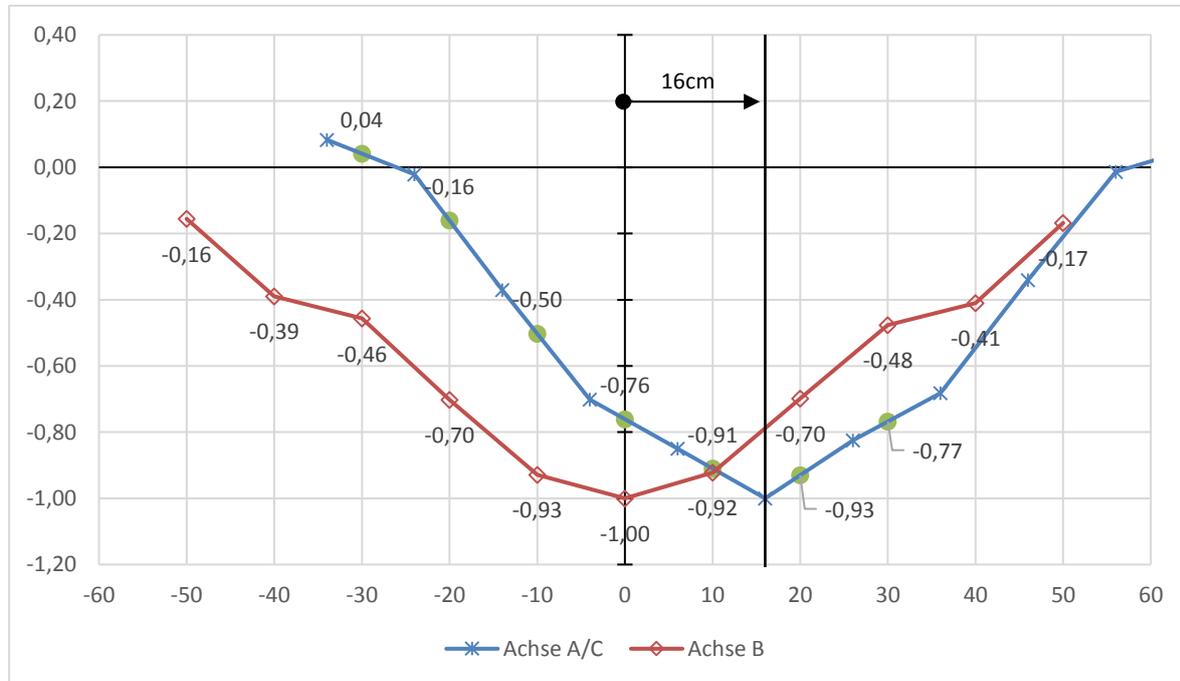


Abbildung 140: Spureinfluss Modell 2 D1a Y-Richtung

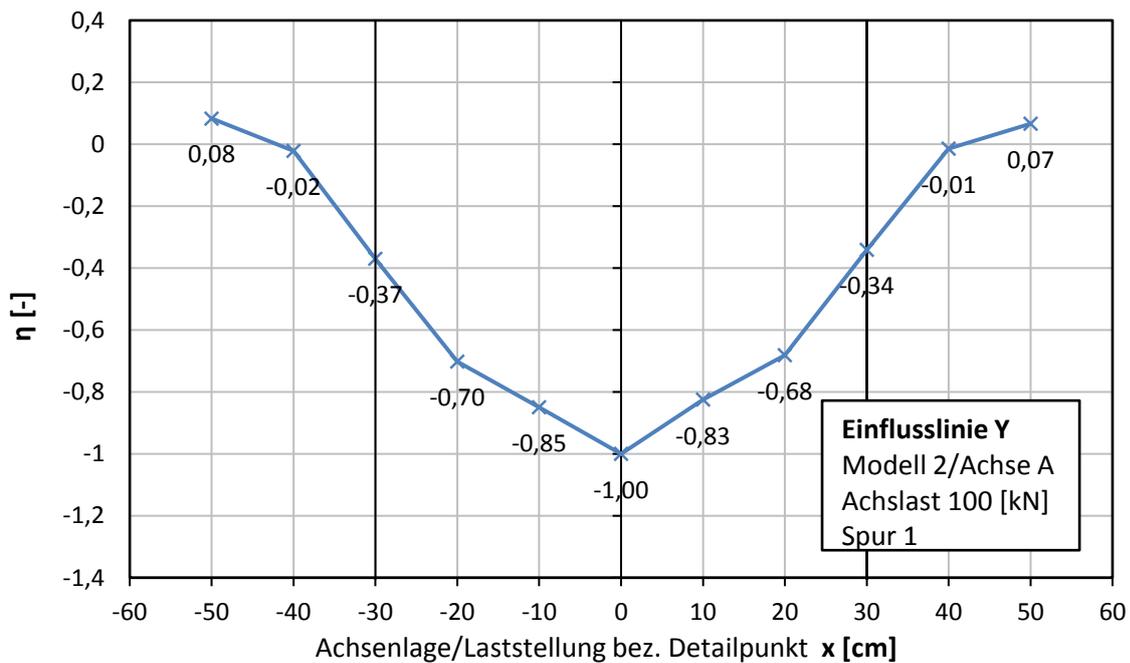


Abbildung 141: Spureinfluss Modell 2 D1a – Achse A

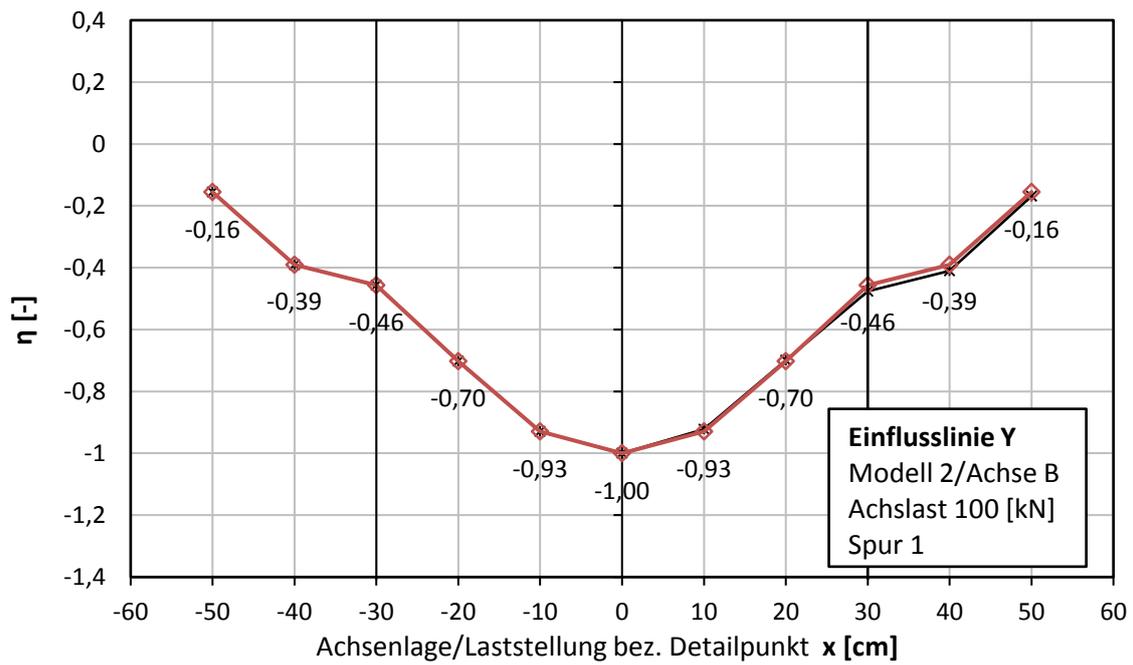


Abbildung 142: Spureinfluss Modell 2 D1a – Achse B

B.3.3 Detail D1b – Einflusslinie in Brückenlängsrichtung

Abbildung 143 bis Abbildung 145 zeigen, dass die maximale Laststellung genau über dem Detailpunkt 1a liegt. In den folgenden Grafiken ist der Querträger 2 und 4 jeweils mit einer dickeren vertikalen Linie bei $x = -430$ und $x = 370$ gekennzeichnet.

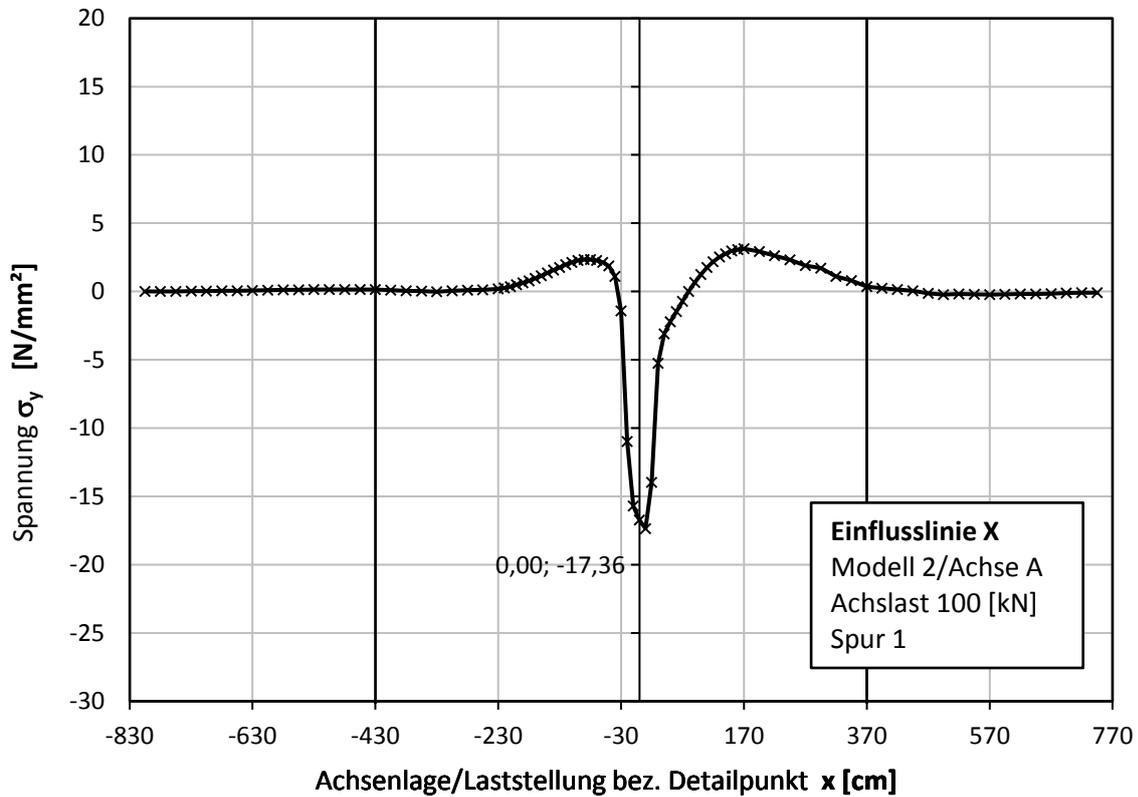


Abbildung 143: Spureinfluss Modell 2 D1b – Achse A

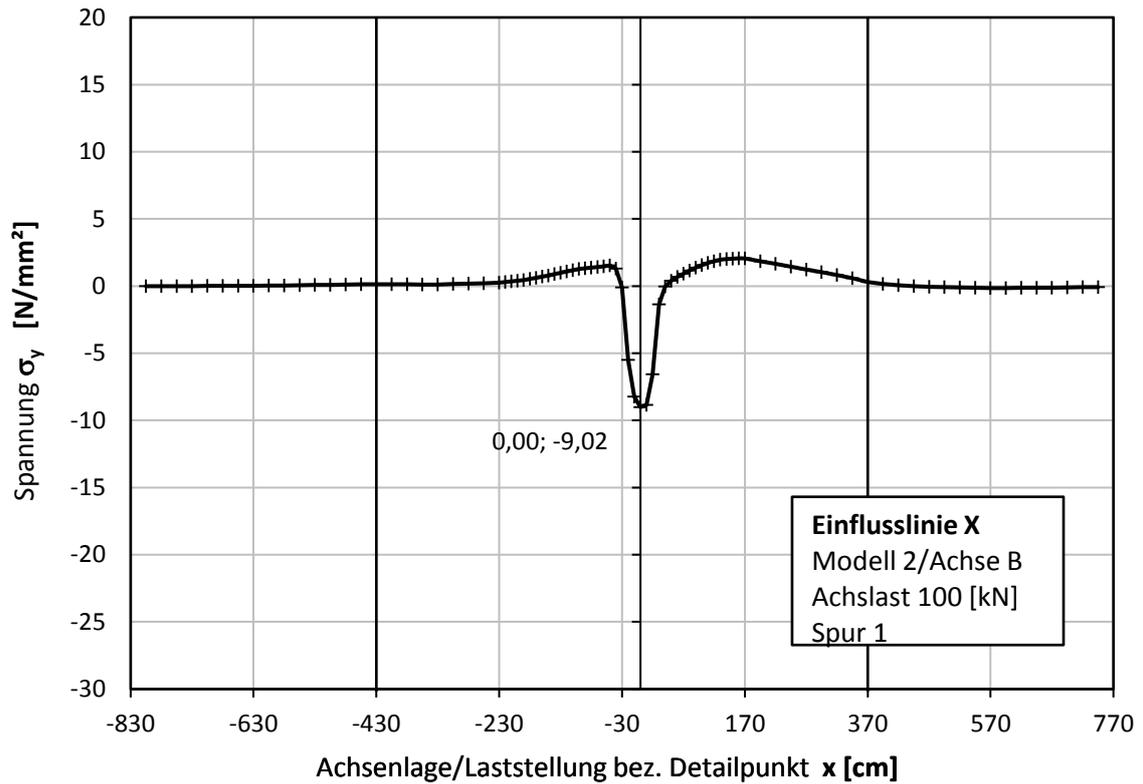


Abbildung 144: Spureinfluss Modell 2 D1b – Achse B

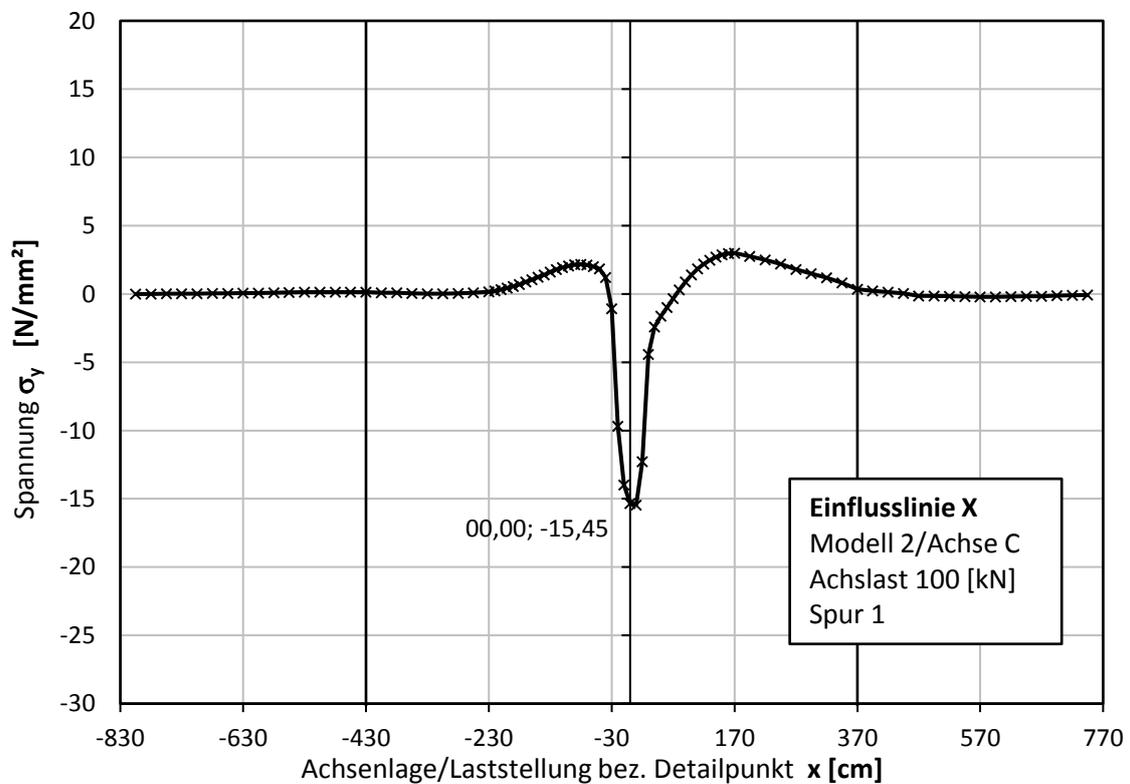


Abbildung 145: Spureinfluss Modell 2 D1b – Achse C

B.3.4 Detail D1b – Einflusslinie in Brückenquerrichtung

In Abbildung 146 ist die Quereinflusslinie beider Achsen für Detail D1b dargestellt. Hier wird durch die Verschiebung der Achse B um 16 cm die reale Achsgeometrie dargestellt. Die Achsen A und C bleiben zentrisch, da sie höhere Spannungsschwingspiele verursachen und somit konservativere Ergebnisse entstehen. In Abbildung 147 und Abbildung 148 sind die einzelnen Quereinflusslinien der Achse A bzw. B dargestellt. Die Werte der Ordinate wurden normiert.

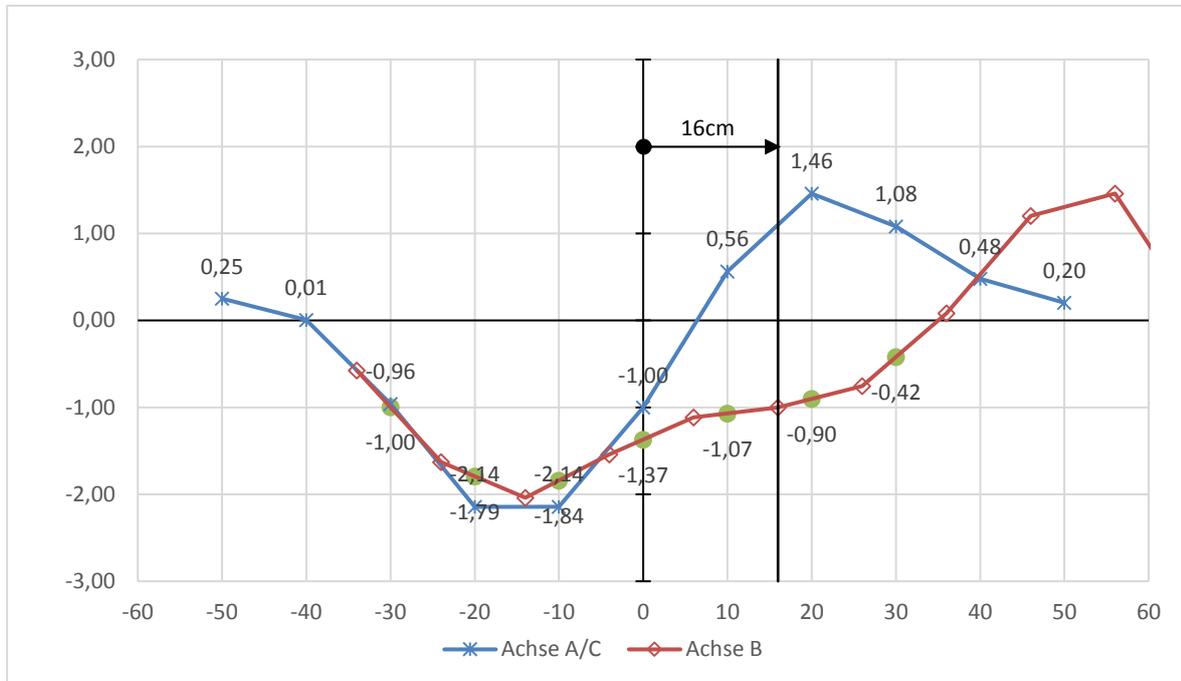


Abbildung 146: Spureinfluss Modell 2 D1b Y-Richtung

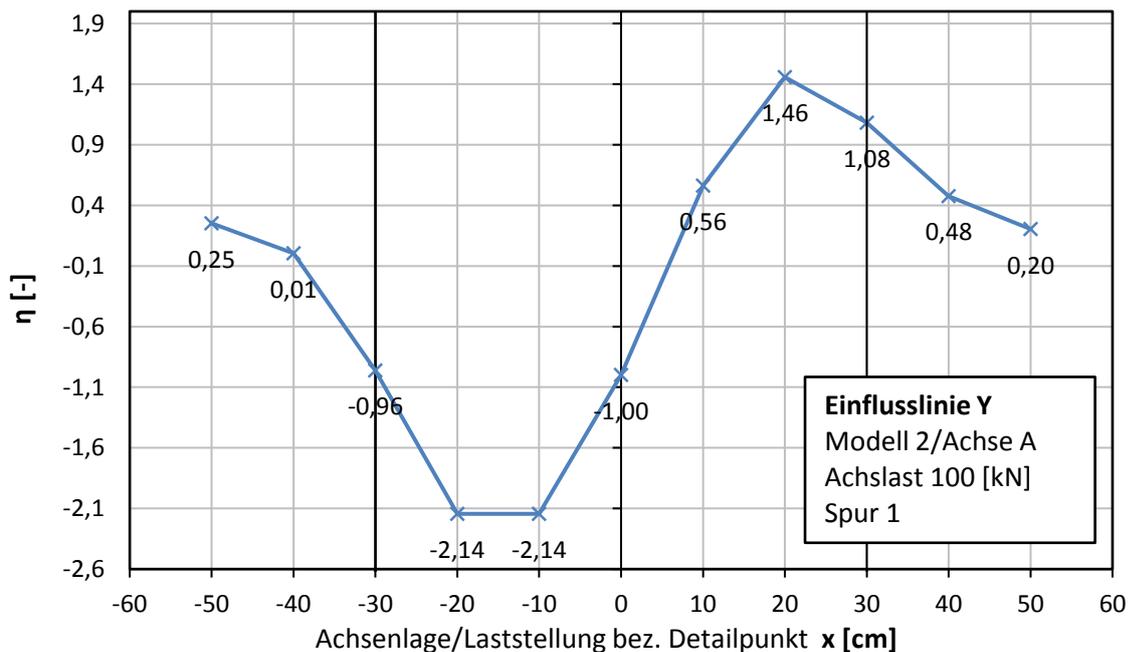


Abbildung 147: Spureinfluss Modell 2 D1b – Achse A

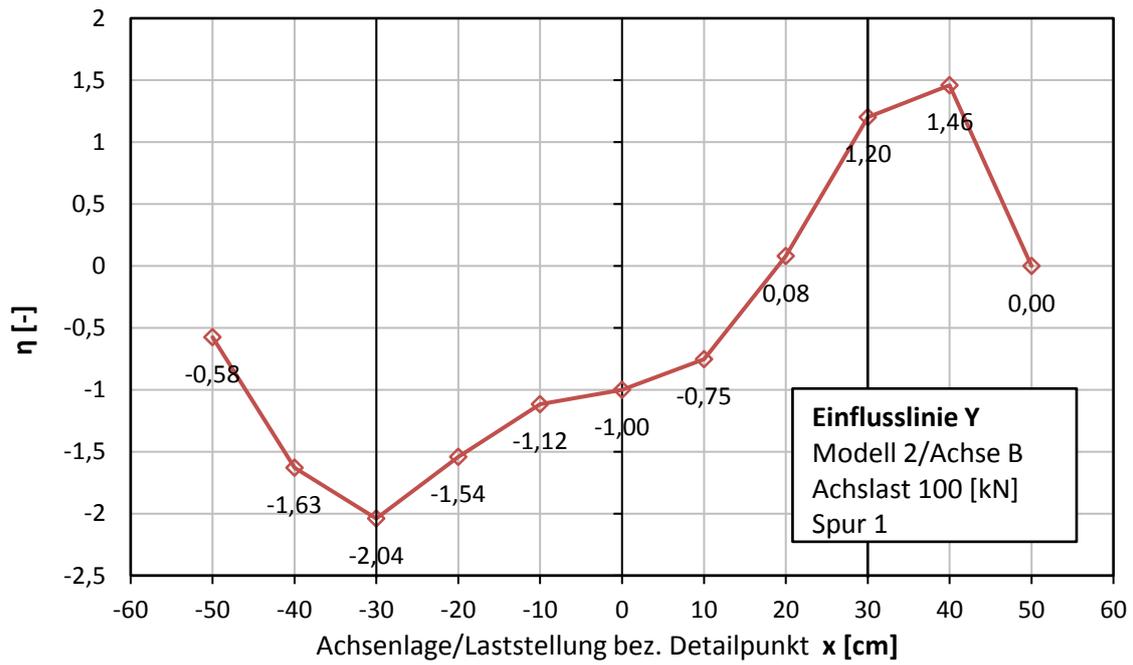


Abbildung 148: Spureinfluss Modell 2 D1b – Achse B

B.3.5 Detail D2 – Einflusslinie in Brückenlängsrichtung

Abbildung 149 bis Abbildung 151 zeigen, dass die maximale Laststellung von Detailpunkt 2 80 cm in Längsrichtung entfernt ist. In den folgenden Grafiken ist der Querträger 2 und 4 jeweils mit einer dickeren vertikalen Linie bei $x = -400$ und $x = 400$ gekennzeichnet.

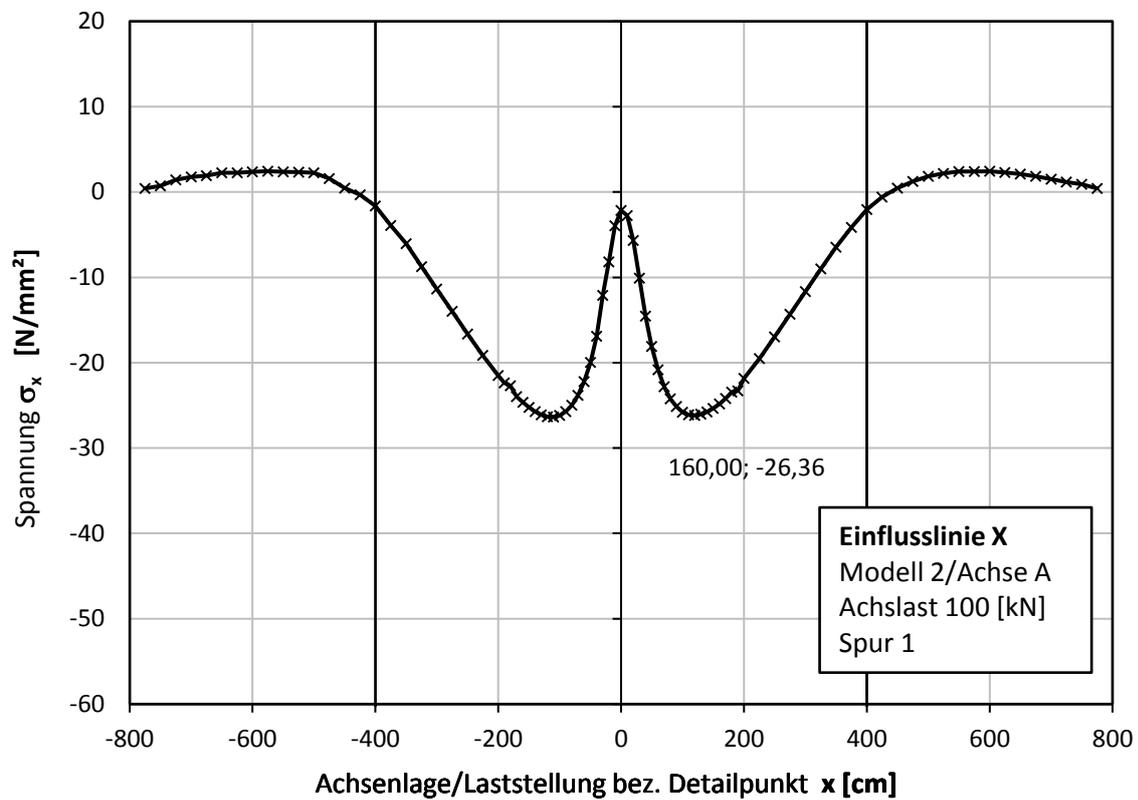


Abbildung 149: Spureinfluss Modell 2 D2 – Achse A

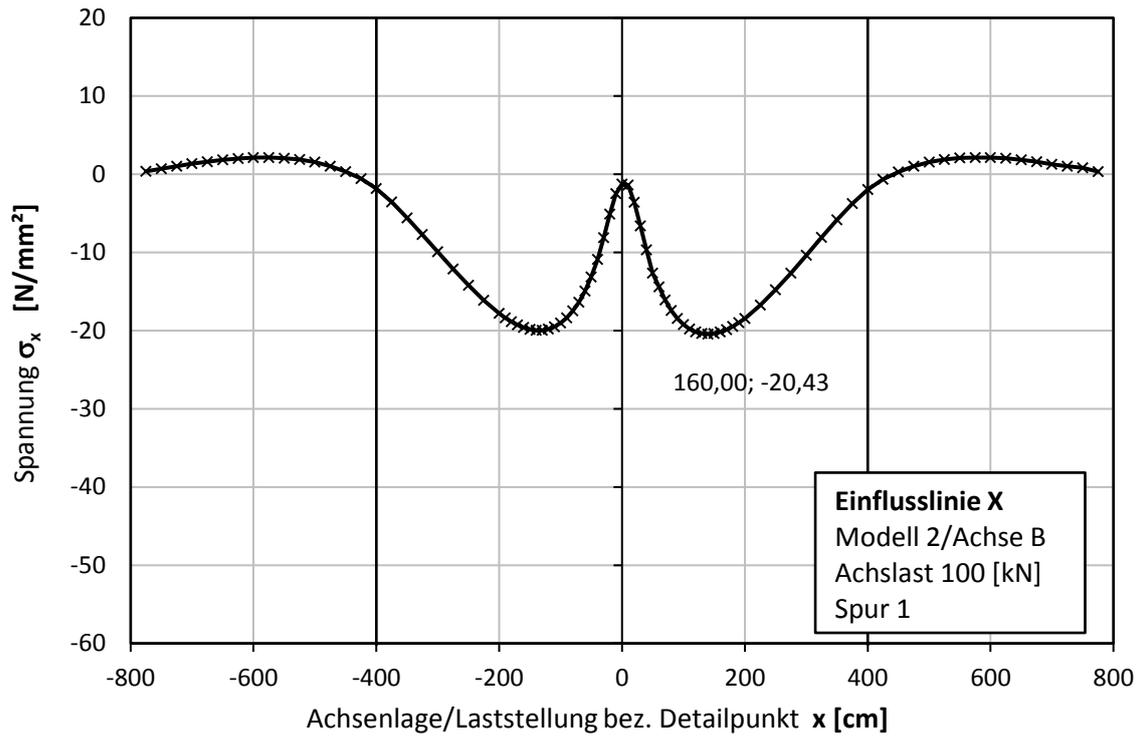


Abbildung 150: Spureinfluss Modell 2 D2 – Achse B

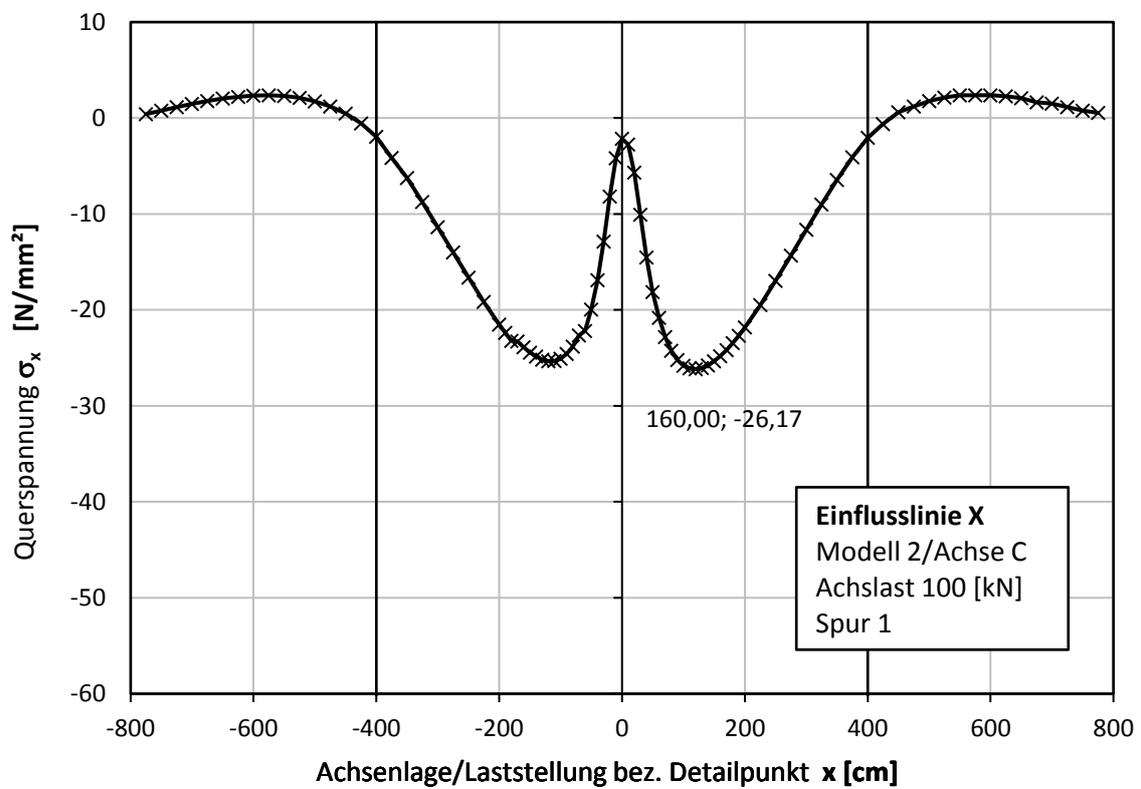


Abbildung 151: Spureinfluss Modell 2 D2 – Achse C

B.3.6 Detail D2 – Einflusslinie in Brückenquerrichtung

In Abbildung 156 und Abbildung 157 sind die einzelnen Quereinflusslinien der Achse A bzw. B dargestellt. Die Werte der Ordinate wurden normiert. In der Abbildung 154 ist die Quereinflusslinie beider Achsen für Detail D1b dargestellt. Hier wird durch die Verschiebung der Achse B um 16 cm die reale Achsgeometrie dargestellt. Die Achsen A und C bleiben zentrisch, da sie höhere Spannungsschwingspiele verursachen. Somit führt diese Berechnung zu konservativeren Ergebnissen.

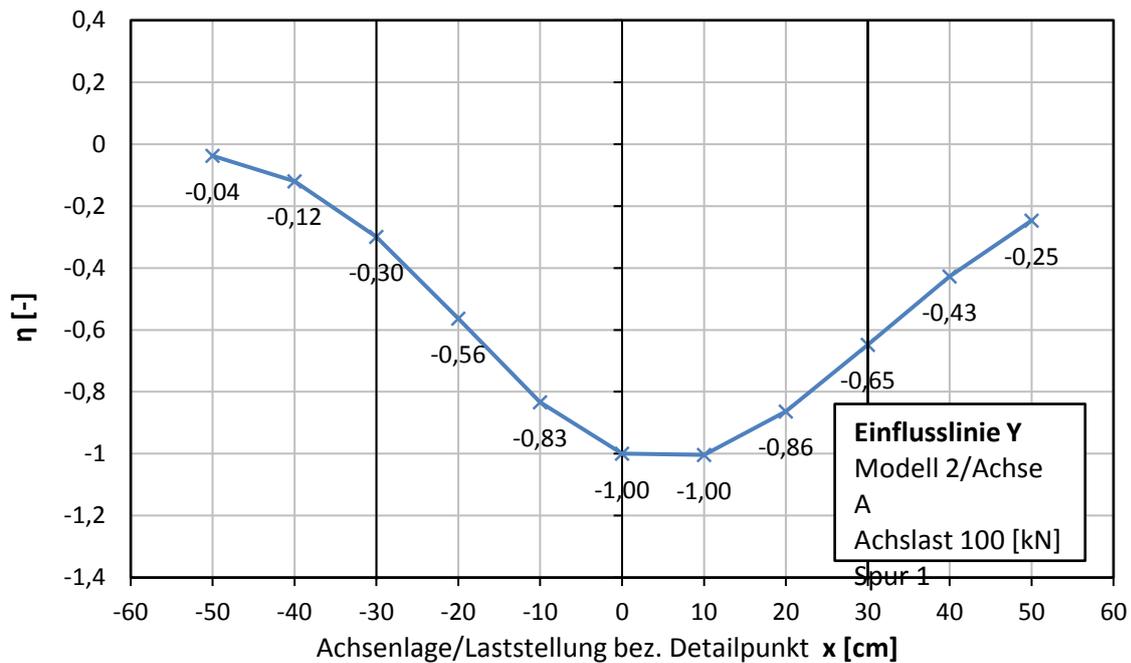


Abbildung 152: Spureinfluss Modell 2 D2 – Achse A

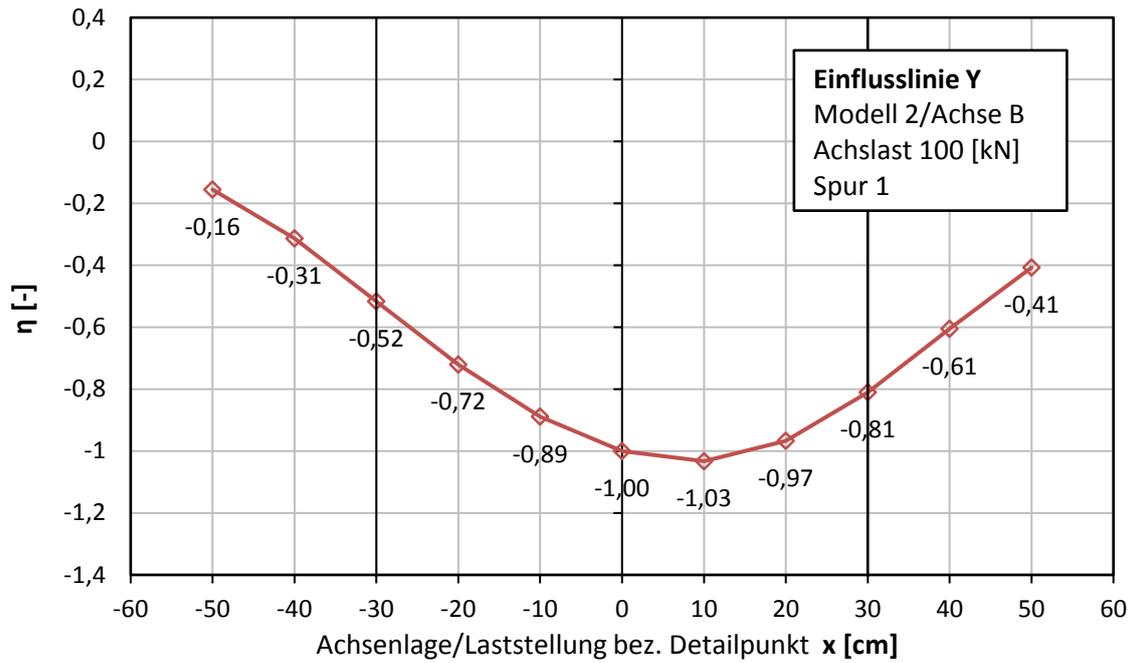


Abbildung 153: Spureinfluss Modell 2 D2 – Achse B

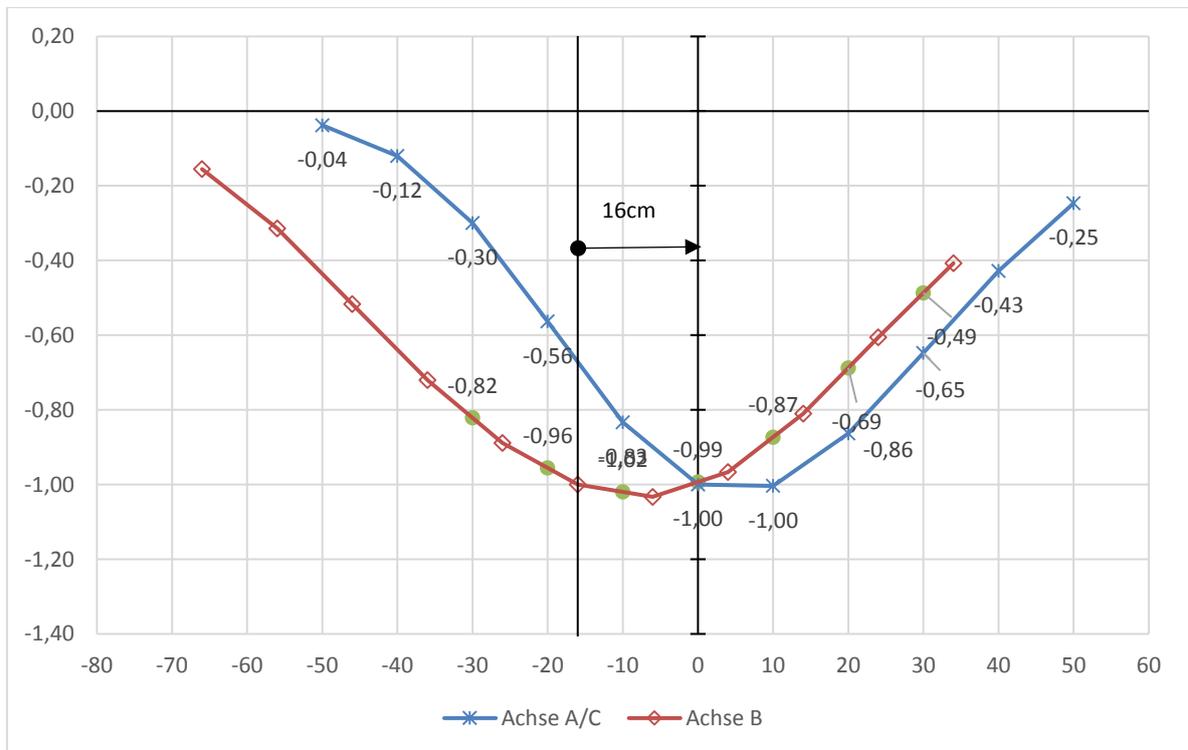


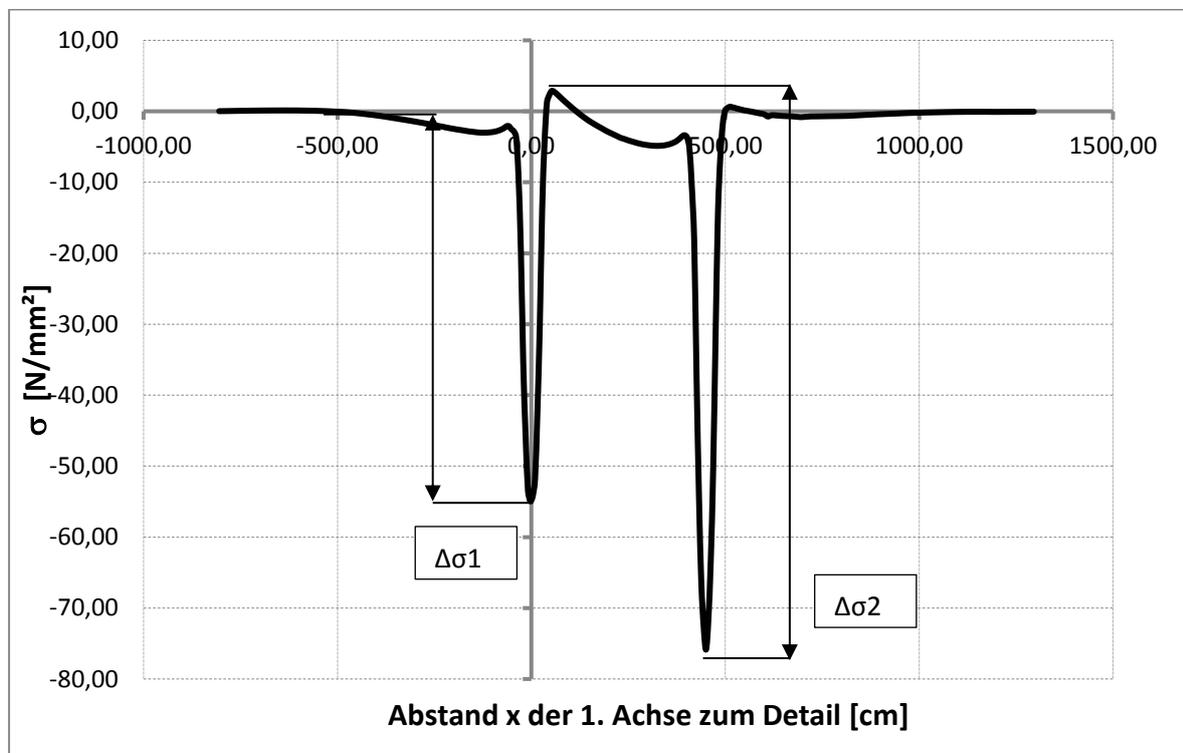
Abbildung 154: Spureinfluss Modell 2 D2 Y-Richtung

B.4 Spannungsverläufe und Lastspiele

Die Ermittlung der Spannungsverläufe erfolgte analog zum Beispiel aus Kapitel 5. Es wurde das Tabellenprogramm Microsoft Excel verwendet um die Längseinflusslinien der einzelnen Achslasten zu skalieren und zu überlagern.

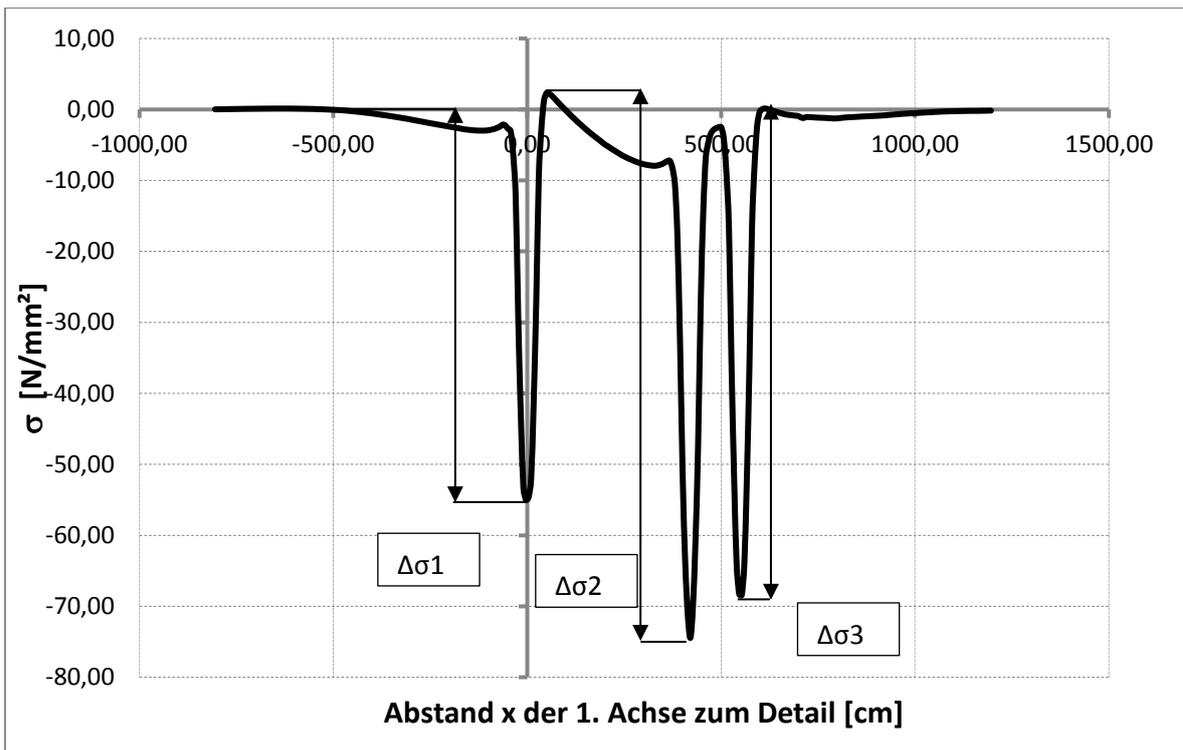
Danach wurden die Lastspiele mittels Rainflow-Methode ermittelt. In Abbildung 155 bis Abbildung 156 sind die Spannungsverläufe infolge Überfahrt der Fahrzeuge aus ELM4 und die dazugehörigen Spannungsspiele des Details D1a abgebildet. Die Tabellen zeigen welche Achse das jeweilige Lastspiel verursacht. n gibt den Schwerverkehrsanteil des jeweiligen Fahrzeugtyps wieder.

B.4.1 Detail D1a

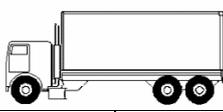


Typ 1			
			
	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma_1$	A	55.59	20
$\Delta\sigma_2$	B	78.72	20

Abbildung 155: M2 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 1, Detail 1a

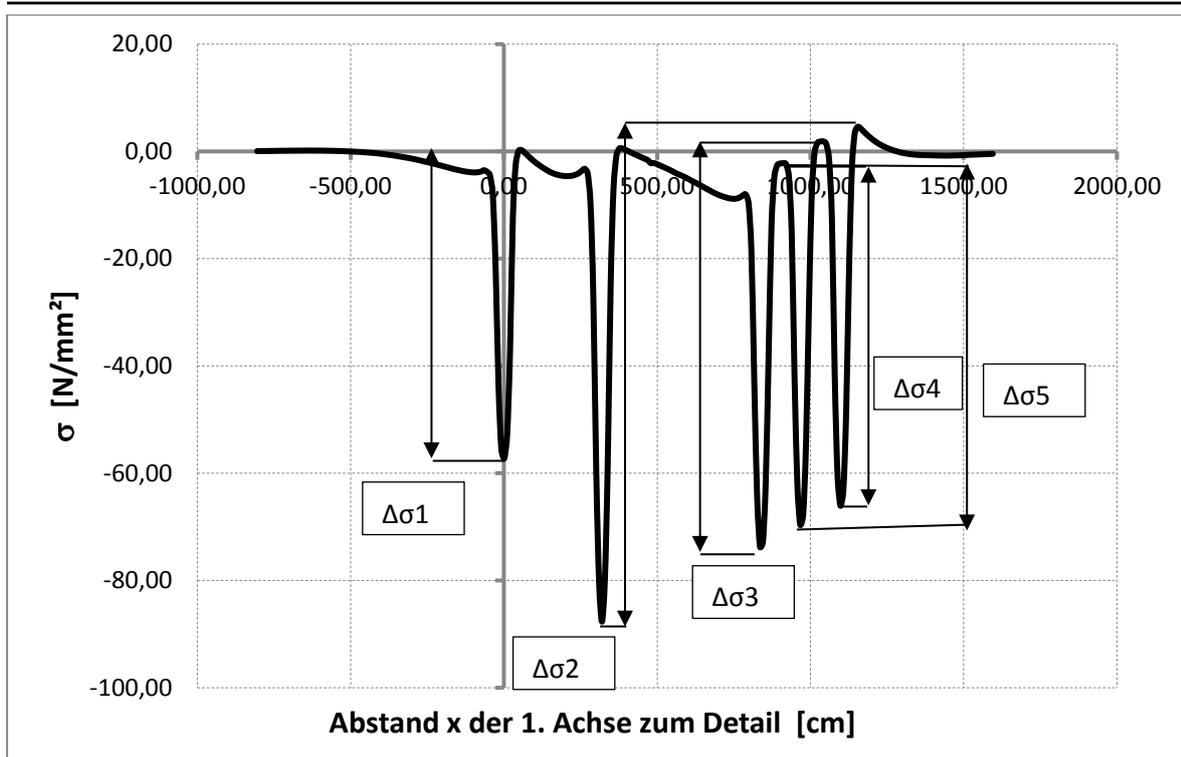


Typ 2

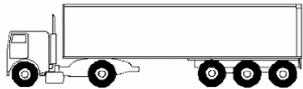


	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma_1$	A	39.16	5
$\Delta\sigma_2$	B	74.67	5
$\Delta\sigma_3$	B	65.90	5

Abbildung 156: M2 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 2, Detail 1a

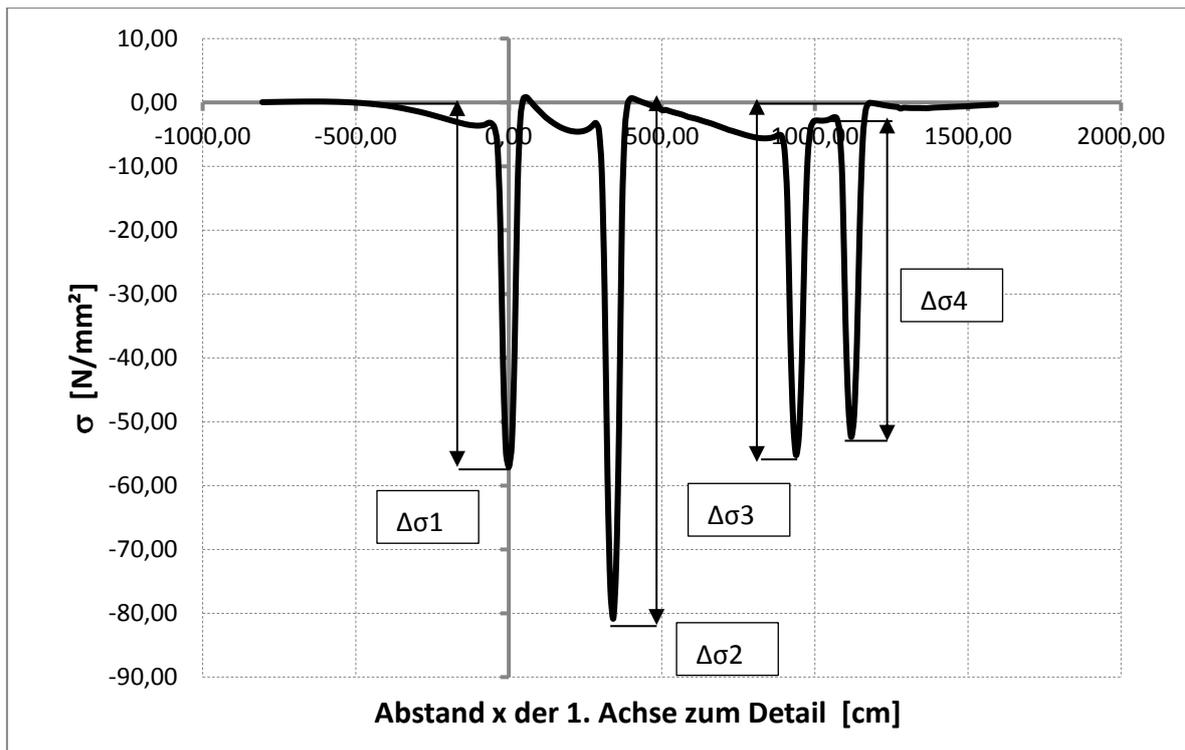


Typ 3

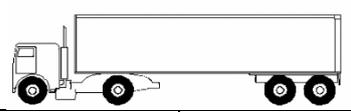


	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma_1$	A	57.53	50
$\Delta\sigma_2$	B	92.27	50
$\Delta\sigma_3$	C	74.32	50
$\Delta\sigma_4$	C	67.45	50
$\Delta\sigma_5$	C	67.94	50

Abbildung 157: M2 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 3, Detail 1a

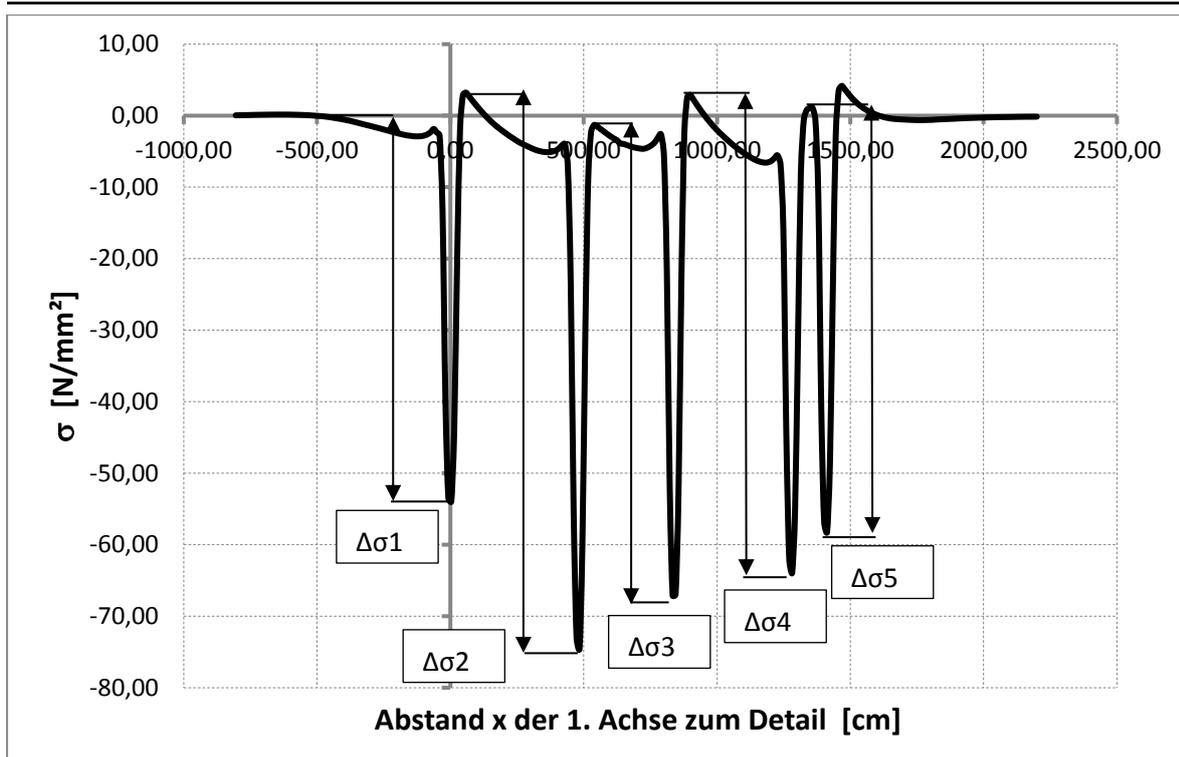


Typ 4

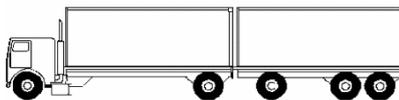


	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma_1$	A	57.72	15
$\Delta\sigma_2$	B	81.66	15
$\Delta\sigma_3$	B	55.39	15
$\Delta\sigma_4$	B	50.06	15

Abbildung 158: M2 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 4, Detail 1a



Typ 5

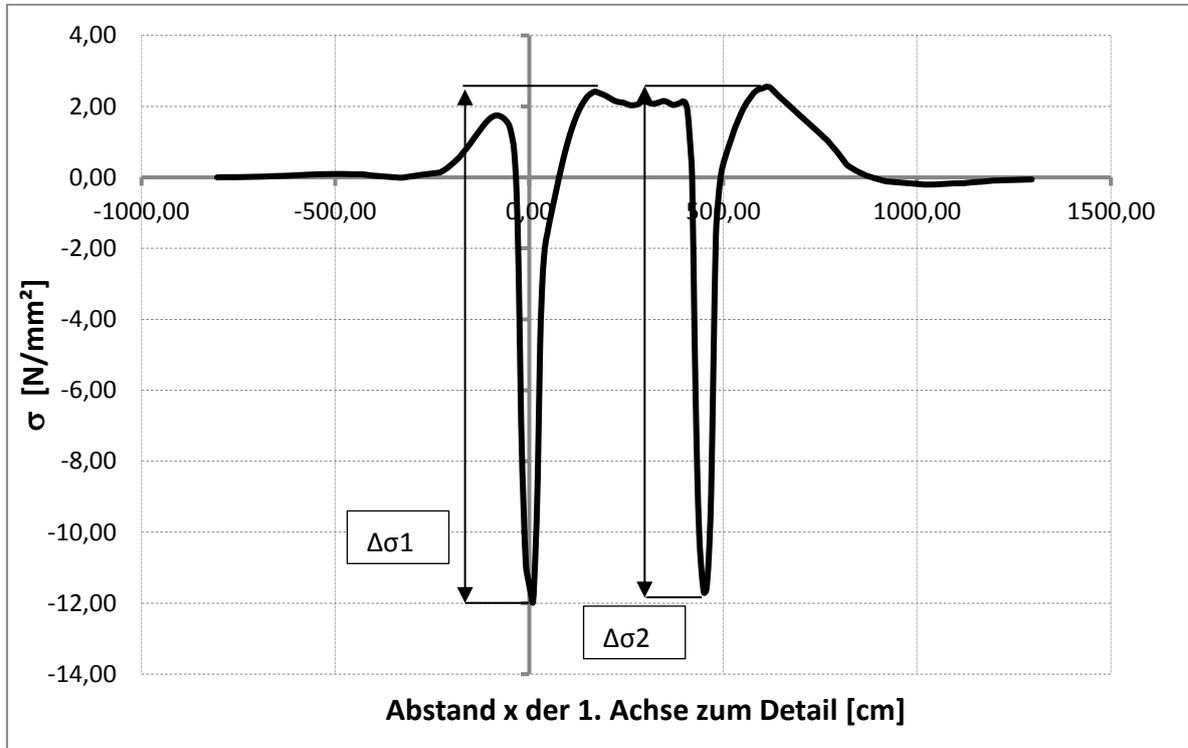


	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma_1$	A	57.22	10
$\Delta\sigma_2$	B	74.58	10
$\Delta\sigma_3$	C	65.79	10
$\Delta\sigma_4$	C	66.87	10
$\Delta\sigma_5$	C	59.38	10

Abbildung 159: M2 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 5, Detail 1a

B.4.2 Detail D1b

In Abbildung 160 bis Abbildung 164 sind die Spannungsverläufe infolge Überfahrt der Fahrzeuge aus ELM 4 und die dazugehörigen Spannungsspiele des Details D1b abgebildet. Die Tabellen zeigen welche Achse das jeweilige Lastspiel verursacht. n gibt den Schwerververkehrsanteil des jeweiligen Fahrzeugtyps wieder.



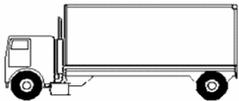
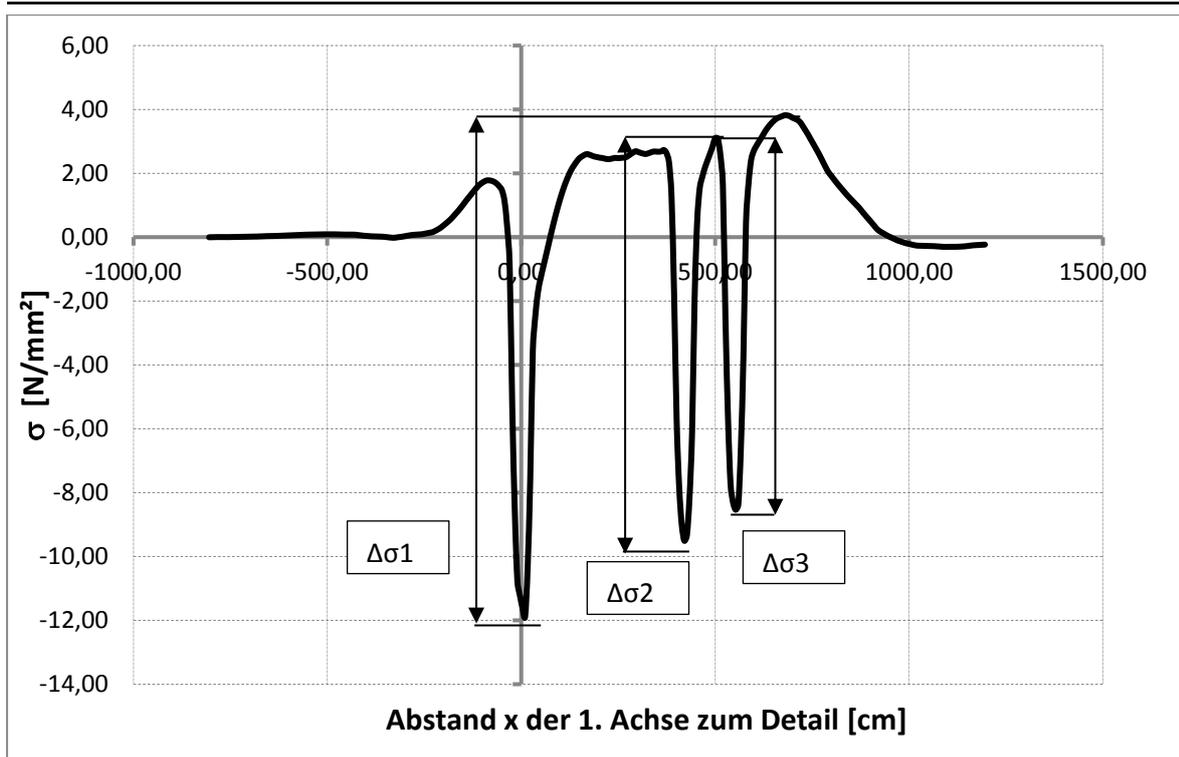
Typ 1			
			
	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma_1$	A	14.51	20
$\Delta\sigma_2$	B	14.13	20

Abbildung 160: M2 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 1, Detail 1b

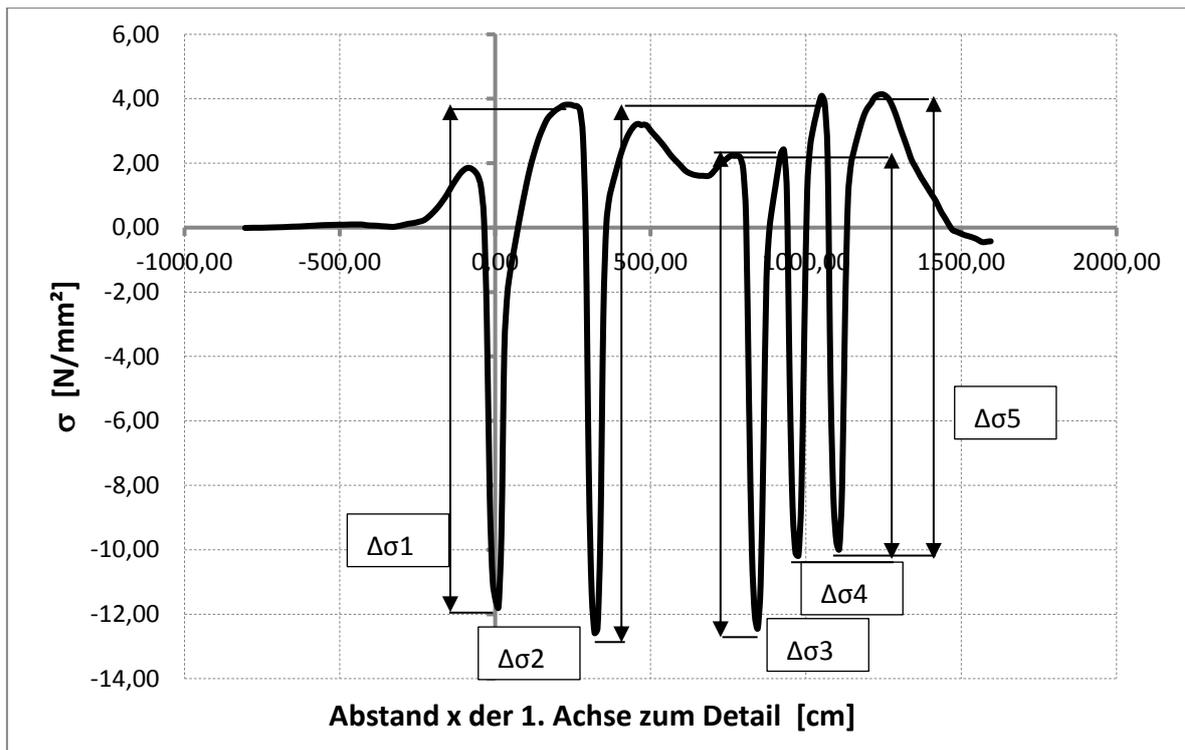


Typ 2

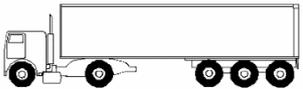


	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma_1$	A	15.70	5
$\Delta\sigma_2$	B	12.24	5
$\Delta\sigma_3$	B	11.63	5

Abbildung 161: M2 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 2, Detail 1b

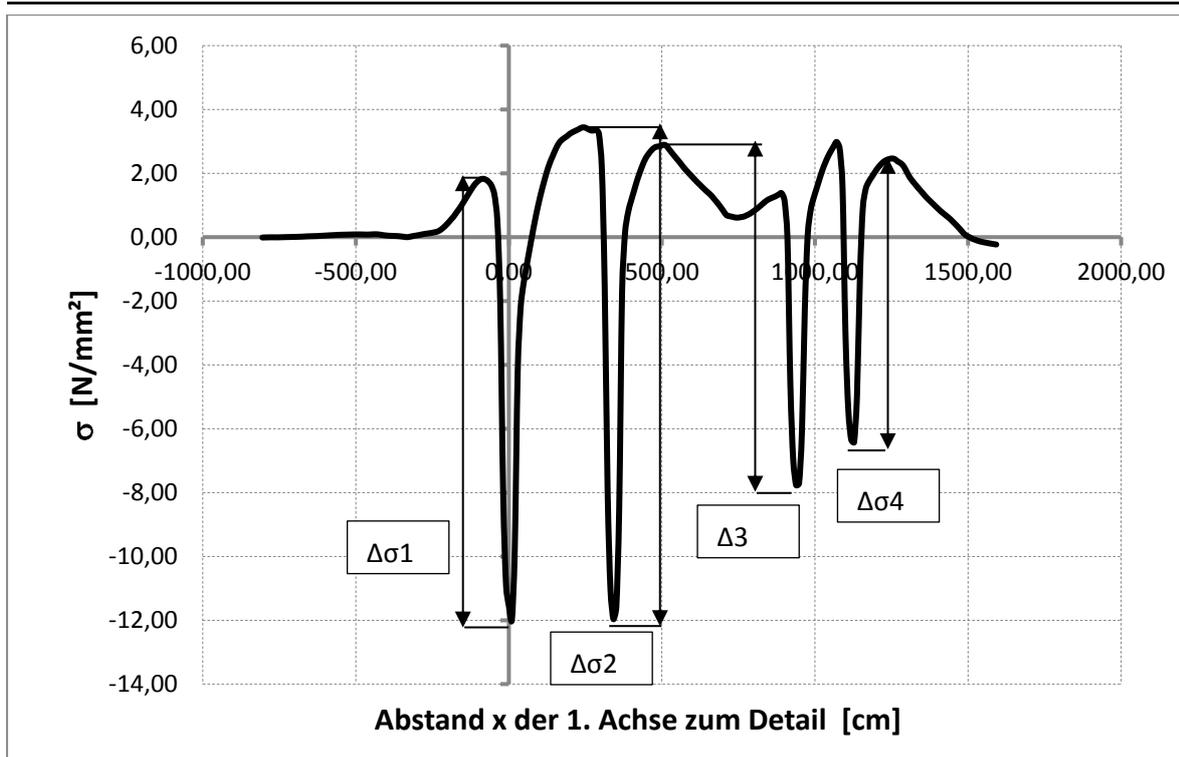


Typ 3

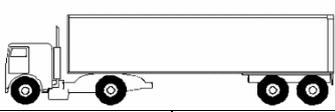


	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma 1$	A	15.60	50
$\Delta\sigma 2$	B	16.73	50
$\Delta\sigma 3$	C	15.66	50
$\Delta\sigma 4$	C	12.59	50
$\Delta\sigma 5$	C	14.06	50

Abbildung 162: M2 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 3, Detail 1b

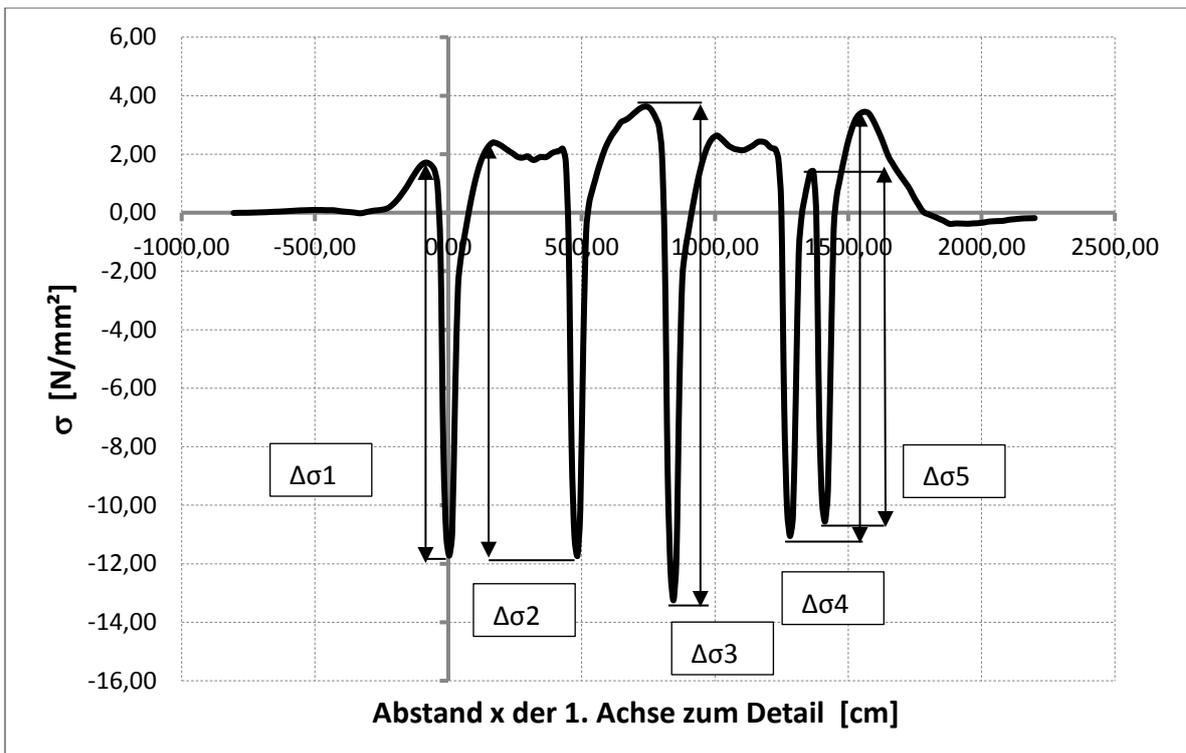


Typ 4

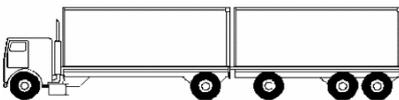


	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma 1$	A	14.95	15
$\Delta\sigma 2$	B	15.43	15
$\Delta\sigma 3$	B	10.66	15
$\Delta\sigma 4$	B	8.88	15

Abbildung 163: M2 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 4, Detail 1b



Typ 5

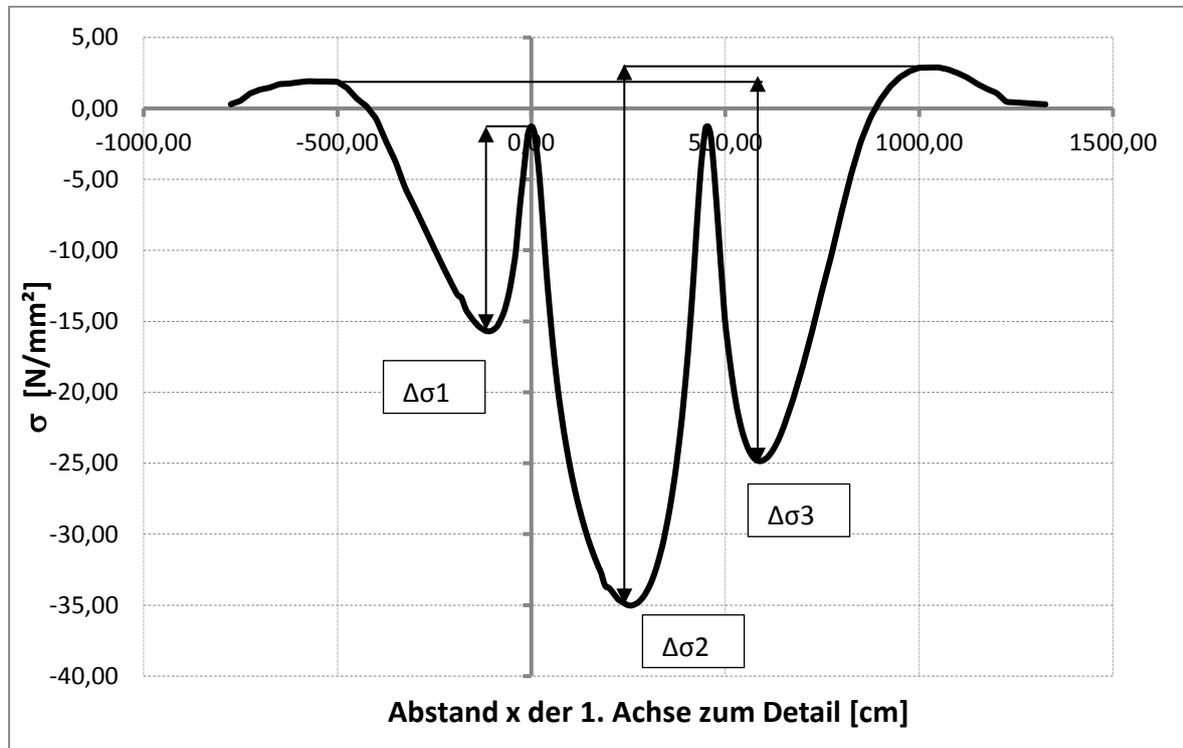


	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma_1$	A	14.13	10
$\Delta\sigma_2$	B	15.17	10
$\Delta\sigma_3$	C	16.88	10
$\Delta\sigma_4$	C	13.70	10
$\Delta\sigma_5$	C	11.97	10

Abbildung 164: M2 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 5, Detail 1b

B.4.3 Detail 2

In Abbildung 165 bis Abbildung 169 sind die Spannungsverläufe infolge Überfahrt der Fahrzeuge aus ELM4 und die dazugehörigen Spannungsspiele des Details D2 abgebildet. An den Tabellen ist zu erkennen welche Achse das jeweilige Lastspiel verursacht. n gibt den Schwerverkehrsanteil des jeweiligen Fahrzeugtyps wieder.



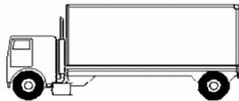
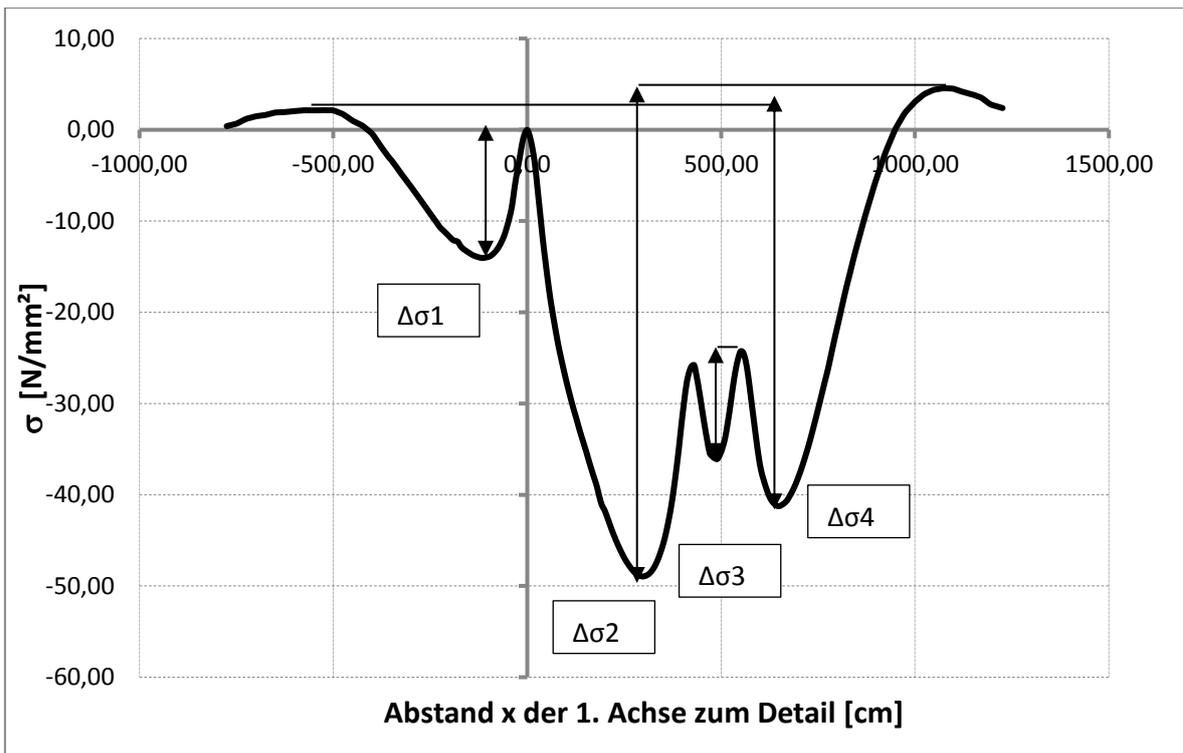
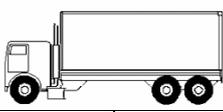
Typ 1			
			
	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma_1$	A	14.39	20
$\Delta\sigma_2$	A	37.91	20
$\Delta\sigma_3$	B	23.57	20

Abbildung 165: M2 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 1, Detail 2

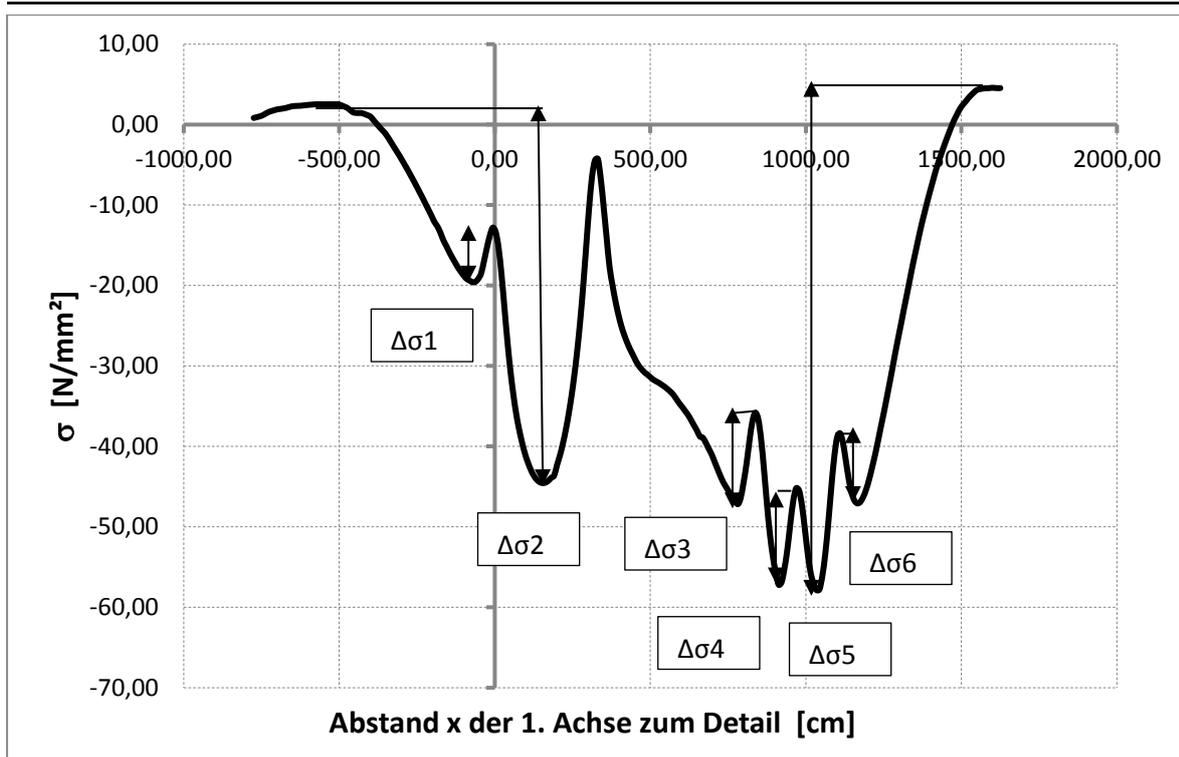


Typ 2

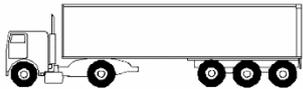


	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma_1$	A	14.02	5
$\Delta\sigma_2$	A	53.51	5
$\Delta\sigma_3$	B	10.26	5
$\Delta\sigma_4$	B	16.96	5

Abbildung 166: M2 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 2, Detail 2

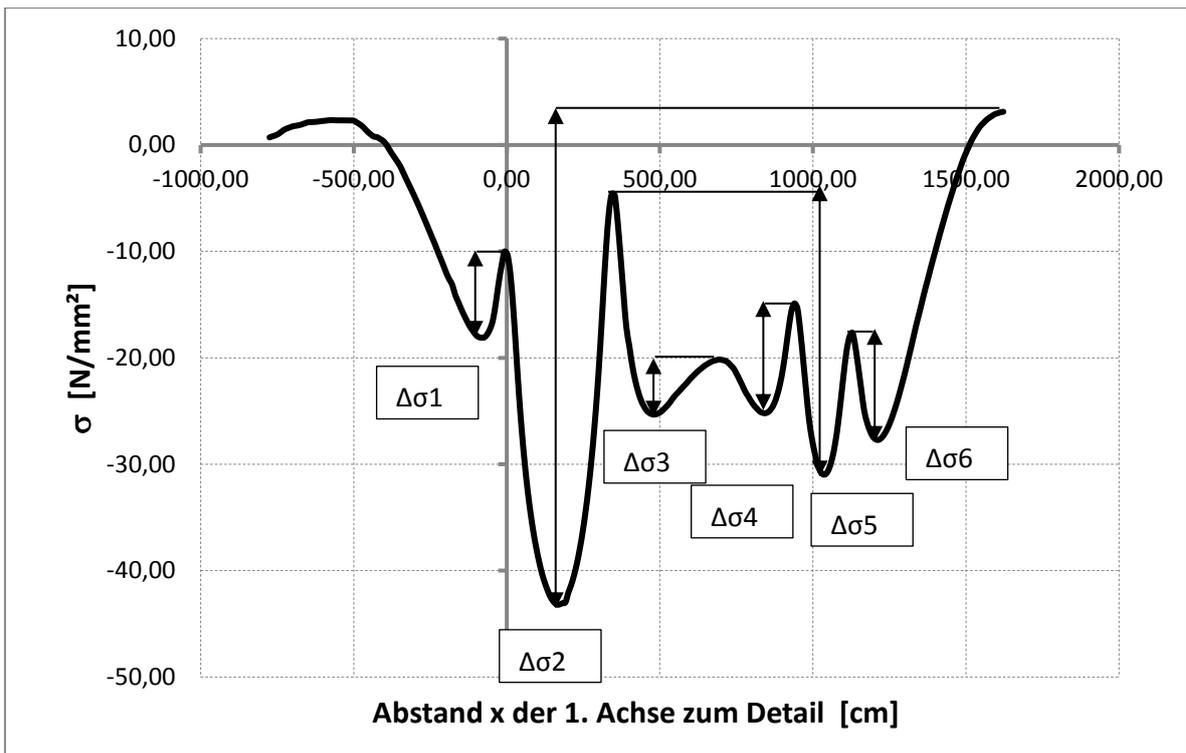


Typ 3

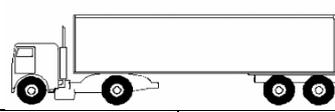


	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma_1$	A	6.78	50
$\Delta\sigma_2$	B	40.28	50
$\Delta\sigma_3$	B	11.40	50
$\Delta\sigma_4$	C	12.01	50
$\Delta\sigma_5$	C	53.30	50
$\Delta\sigma_6$	C	8.73	50

Abbildung 167: M2 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 3, Detail 2

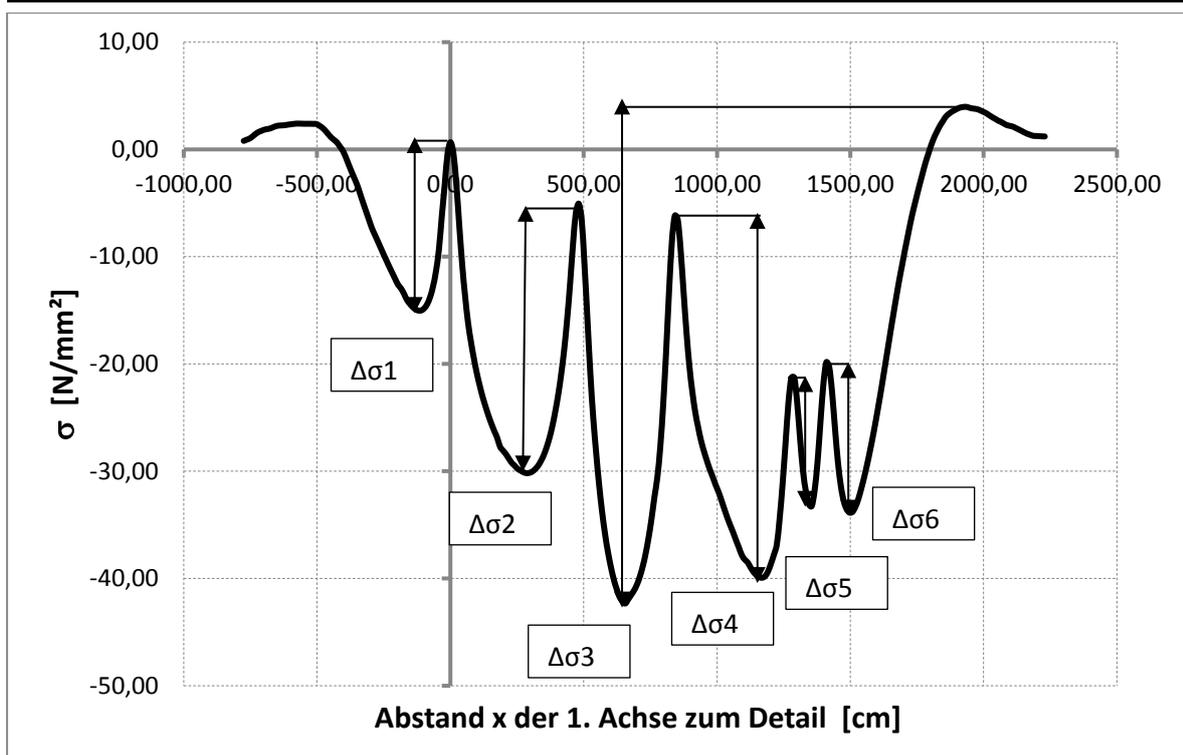


Typ 4

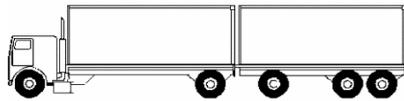


	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma_1$	A	8.08	15
$\Delta\sigma_2$	B	46.32	15
$\Delta\sigma_3$	B	5.02	15
$\Delta\sigma_4$	B	10.44	15
$\Delta\sigma_5$	C	26.39	15
$\Delta\sigma_6$	C	10.05	15

Abbildung 168: M2 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 4, Detail 2



Typ 5



	Achse	$\Delta\sigma$	n
$\Delta\sigma_1$	A	15.76	10
$\Delta\sigma_2$	A	25.13	10
$\Delta\sigma_3$	B	46.30	10
$\Delta\sigma_4$	B	33.76	10
$\Delta\sigma_5$	C	11.98	10
$\Delta\sigma_6$	C	14.02	10

Abbildung 169: M2 – Spannungsverlauf und Lastspiele des Fahrzeugtyps 5, Detail 2

B.5 Lastkollektive

Analog zum Modell 1 wurden für das Modell 2 die Lastkollektive erstellt und das Einstufenkollektiv $\Delta\sigma_e$ ermittelt.

B.5.1 Detail 1a

B.5.1.1 Zentrische Überfahrt

Anhand der Spannungsspiele aus Abschnitt B.4 konnten die Lastkollektive der untersuchten Details erstellt werden. Auf Abbildung 170 werden Kollektivteile, die schädigend wirken dicker dargestellt, als jene, die keine schädigende Wirkung haben ($\Delta\sigma_i < \Delta\sigma_L$). Um die Gesamtwirkung des Kollektives wiederzugeben, wird das Lastkollektiv in ein schadensäquivalentes Einstufenkollektiv bezogen auf $n_{LKW} = 100$, umgerechnet. Dieses ist in der folgenden Abbildung blau strichliert dargestellt. Dieses Kollektiv wurde durch eine rein zentrische Überfahrt aller Achsen hervorgerufen.

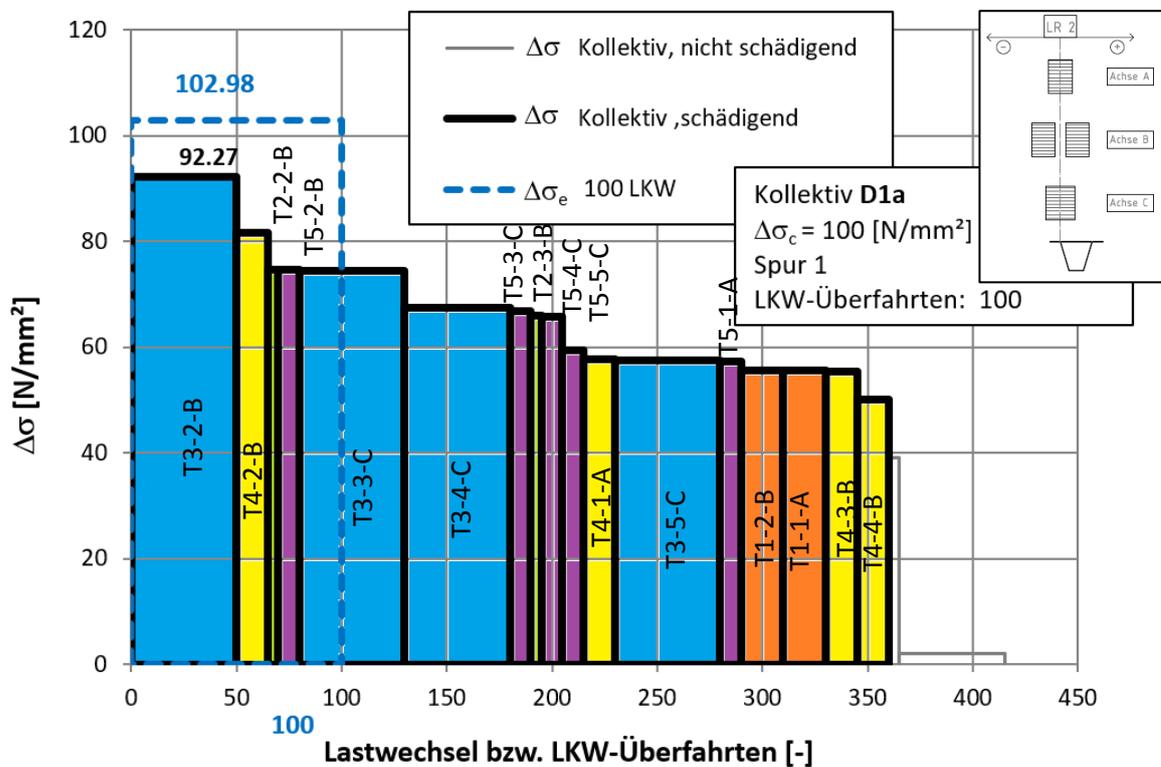


Abbildung 170: M2 - Lastkollektiv der zentrischen Überfahrt an D1a

B.5.1.2 Reale Achsgeometrie

Abbildung 171 zeigt die Einflusslinie der Achsen A und C und den konservativ gewählten Skalierungsfaktor $\eta = 0,76$.

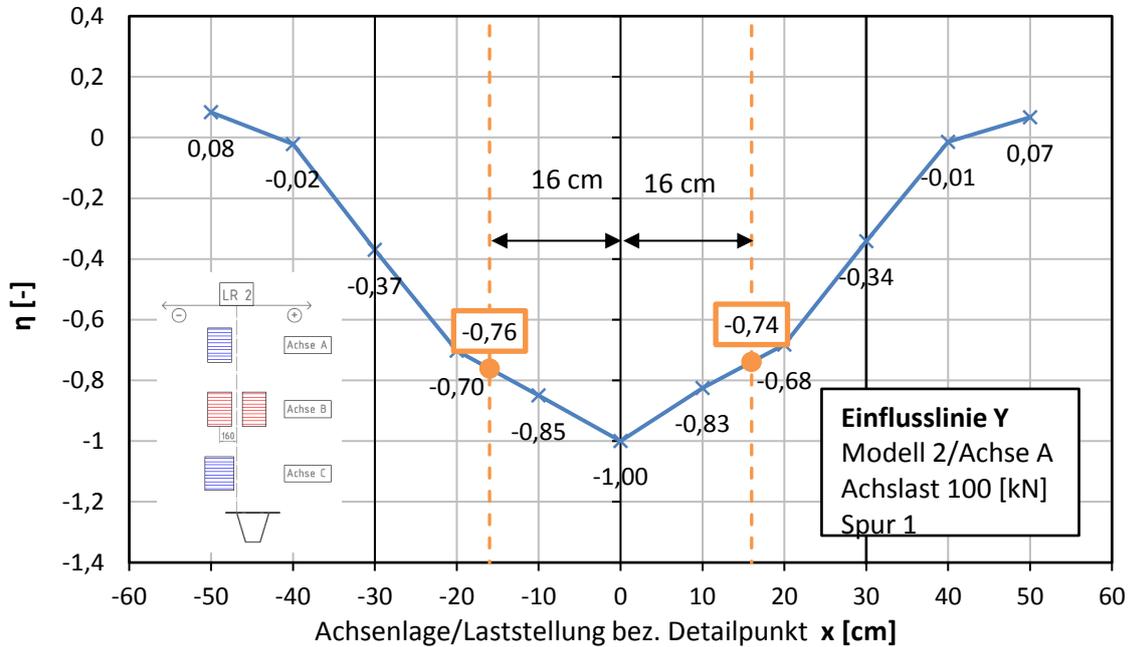


Abbildung 171: M2 - Lasteinflusslinie in Querrichtung Achse A/C Detail 1a

Abbildung 172 zeigt das ermittelte Spannungskollektiv. Daraus wurde das blau gekennzeichnete schadensäquivalente Einstufenkollektiv umgerechnet.

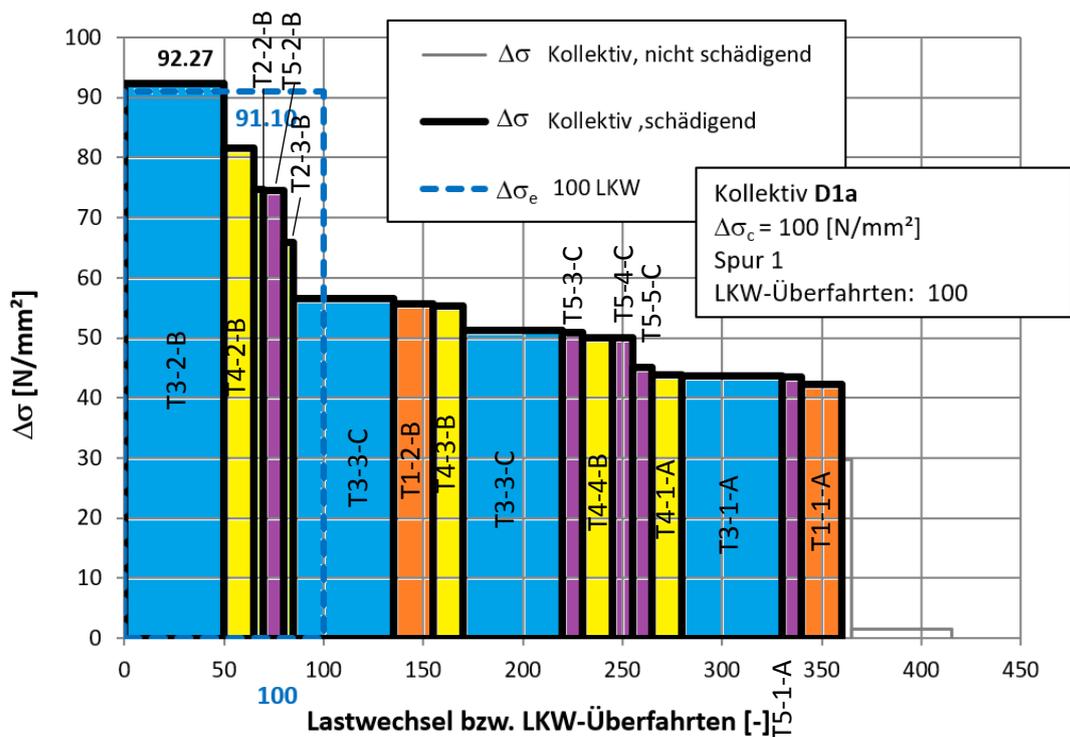


Abbildung 172: M2 - Lastkollektiv unter Berücksichtigung der realen Achsgeometrie an D1a

B.5.1.3 Verteilung nach Blab

Abbildung 173 zeigt die Spurverteilung nach Blab und die Quereinflusslinien der einzel- und zwilingsbereiften Achsen. Tabelle 22 gibt eine Auflistung über die Skalierungsfaktoren η und die zugehörige Lage in Brückenquerrichtung.

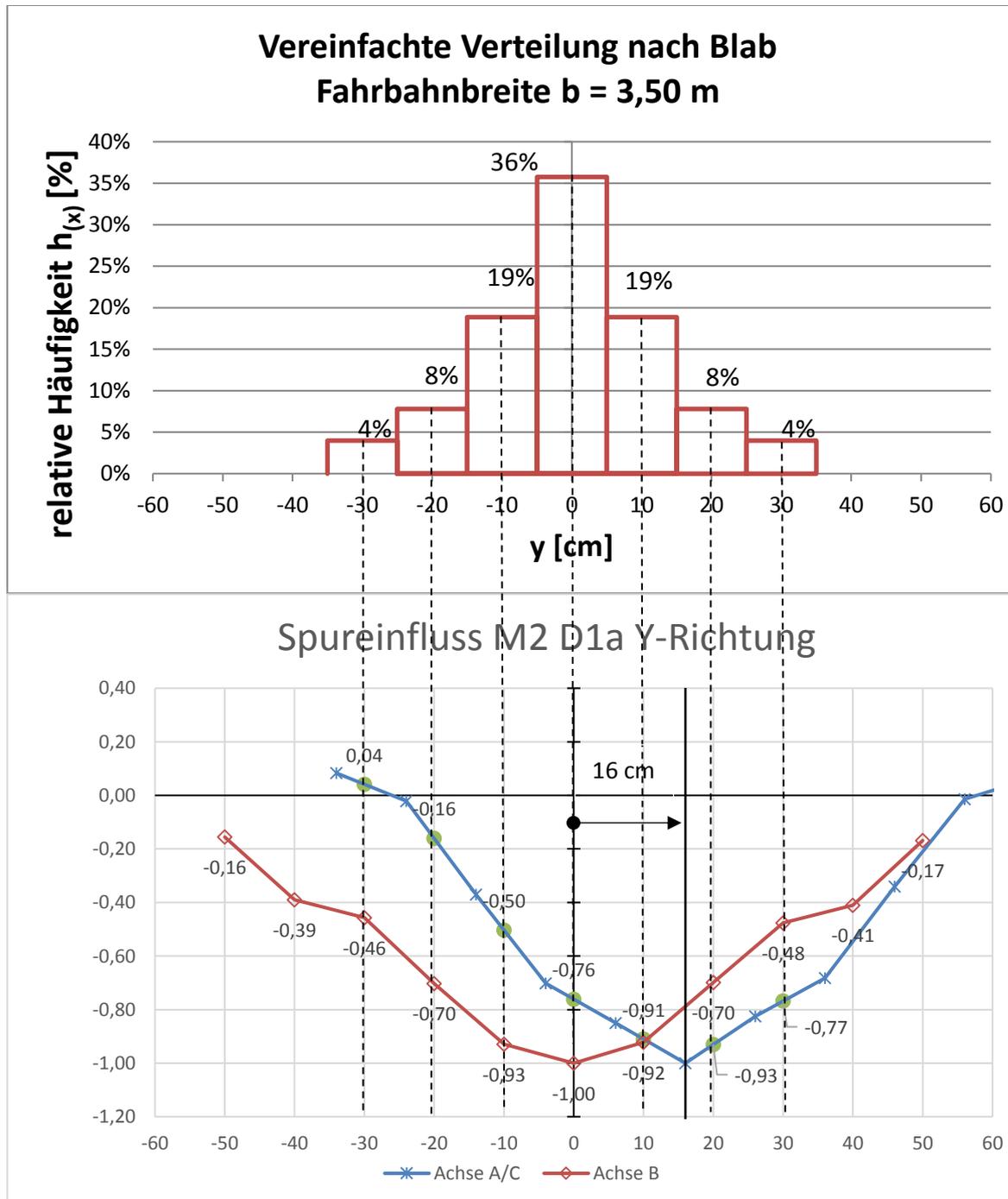


Abbildung 173: Spurverteilung nach Blab ($b = 3,5$) und Quereinflusslinien bei verschobener Achsen A/C

Anmerkung: Negatives Vorzeichen von $\eta \rightarrow$ Druckspannungen
 Positives Vorzeichen von $\eta \rightarrow$ Zugspannungen

Tabelle 22 gibt eine Auflistung über die Skalierungsfaktoren η bezogen auf die zugehörige Lage in Brückenquerrichtung.

Achse	- 30 cm	- 20 cm	- 10 cm	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm
B	-0,46	-0,70	-0,93	-1,00	-0,92	-0,70	0,48
A/C	0,04	-0,16	-0,50	-0,76	-0,91	-0,93	-0,77

Tabelle 22: Übersicht der Skalierungsfaktoren je Fahrspur

Abbildung 174 zeigt das resultierende Lastkollektiv und Einstufenkollektiv $\Delta\sigma_e$. Die Berechnung erfolgte analog zu Modell 1

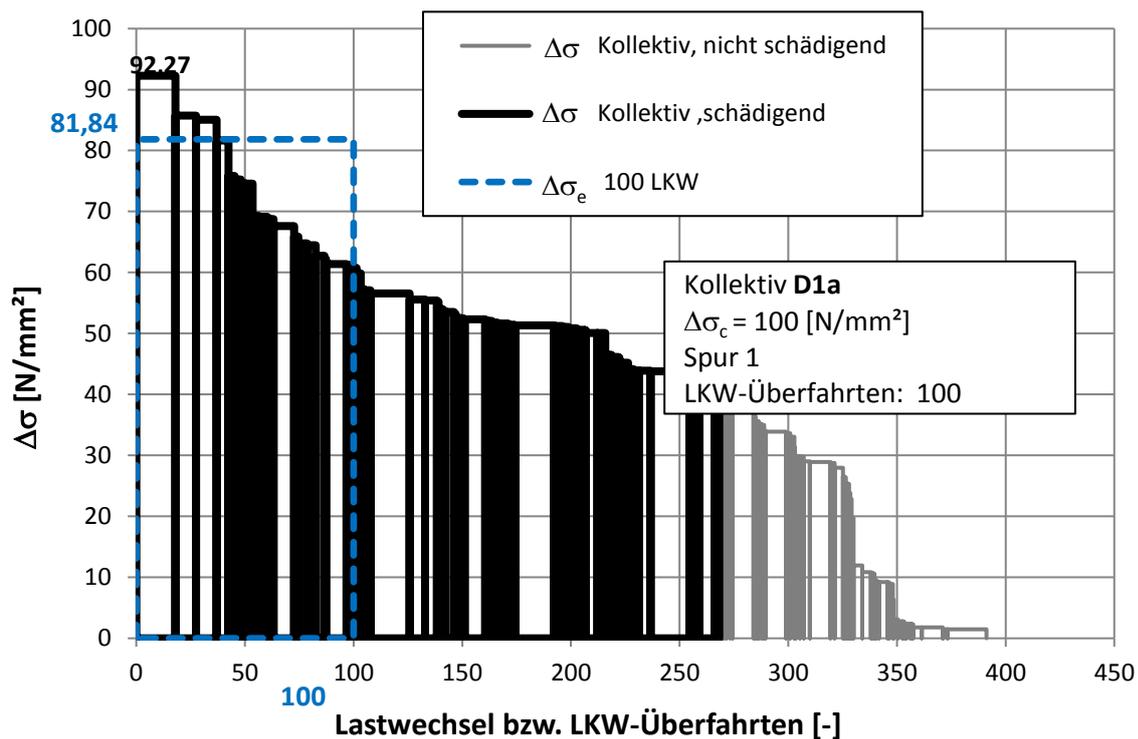


Abbildung 174: M2 - Modifiziertes Lastkollektiv und schadensäquivalentes EK des Details 1a mit Spurverteilung nach Blab ($b=3,5m$)

B.5.1.4 Verteilung nach Eurocode 1991-2

Die Berechnungen für das Lastkollektiv laut EN 1991-2 erfolgt analog zu der Berechnung mit der Spurverteilung nach Blab. Abbildung 175 zeigt die Verteilung nach EN 1991-2 und die dazugehörigen Werte der Quereinflusslinie des Details 1a.

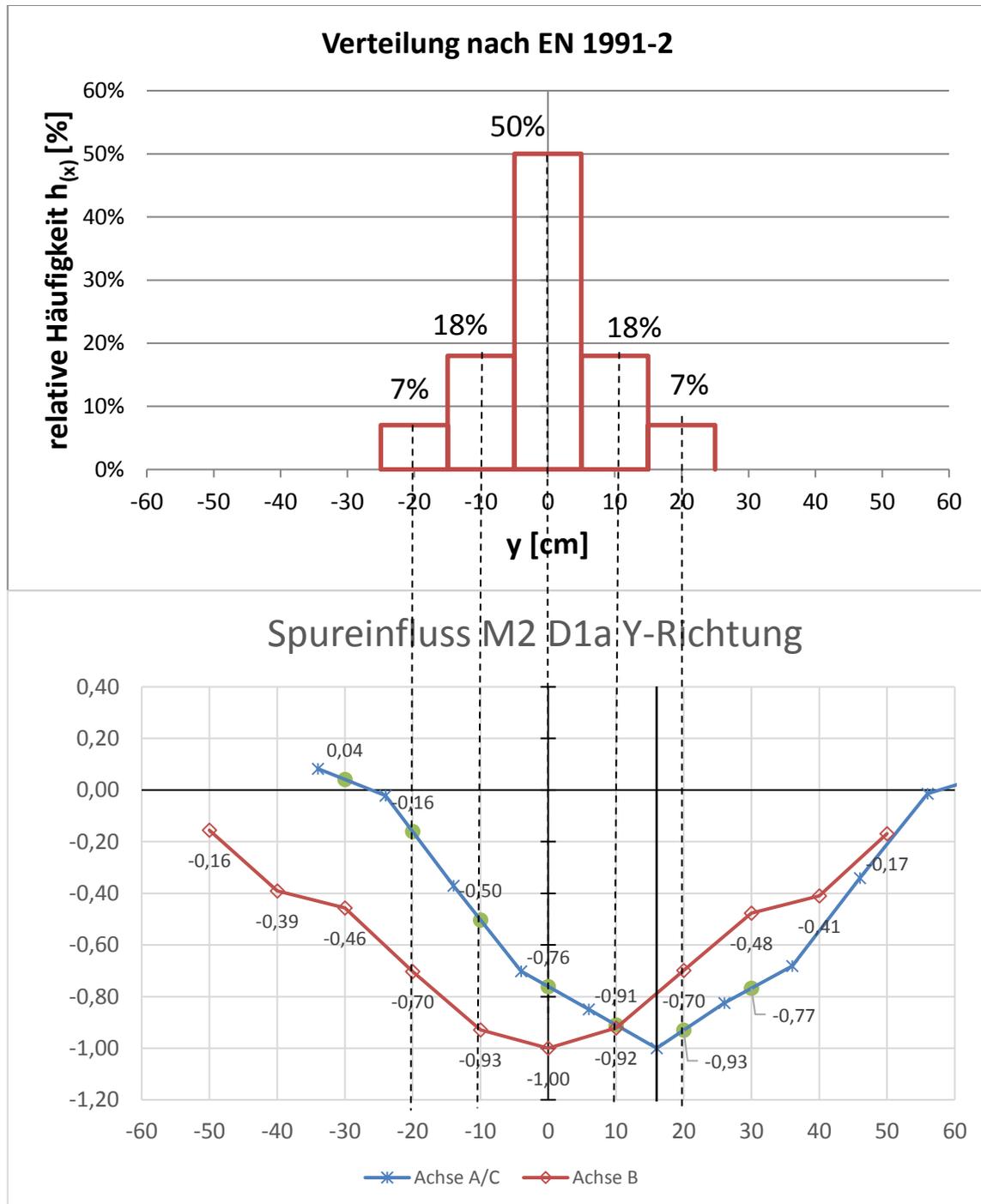


Abbildung 175: Spurverteilung nach EN und Quereinflusslinien bei verschobener Achsen A/C

Anmerkung: Negatives Vorzeichen von η → Druckspannungen
 Positives Vorzeichen von η → Zugspannungen

Achse	- 20 cm	- 10 cm	0 cm	10 cm	20 cm
B	-0,70	-0,93	-1,00	-0,92	-0,70
A/C	-0,16	-0,50	-0,76	-0,91	-0,93

Tabelle 23: Übersicht der Skalierungsfaktoren je Fahrspur

Abbildung 176 stellt das modifizierte Lastkollektiv aufgrund der Spurverteilung nach EN 1991-2 dar.

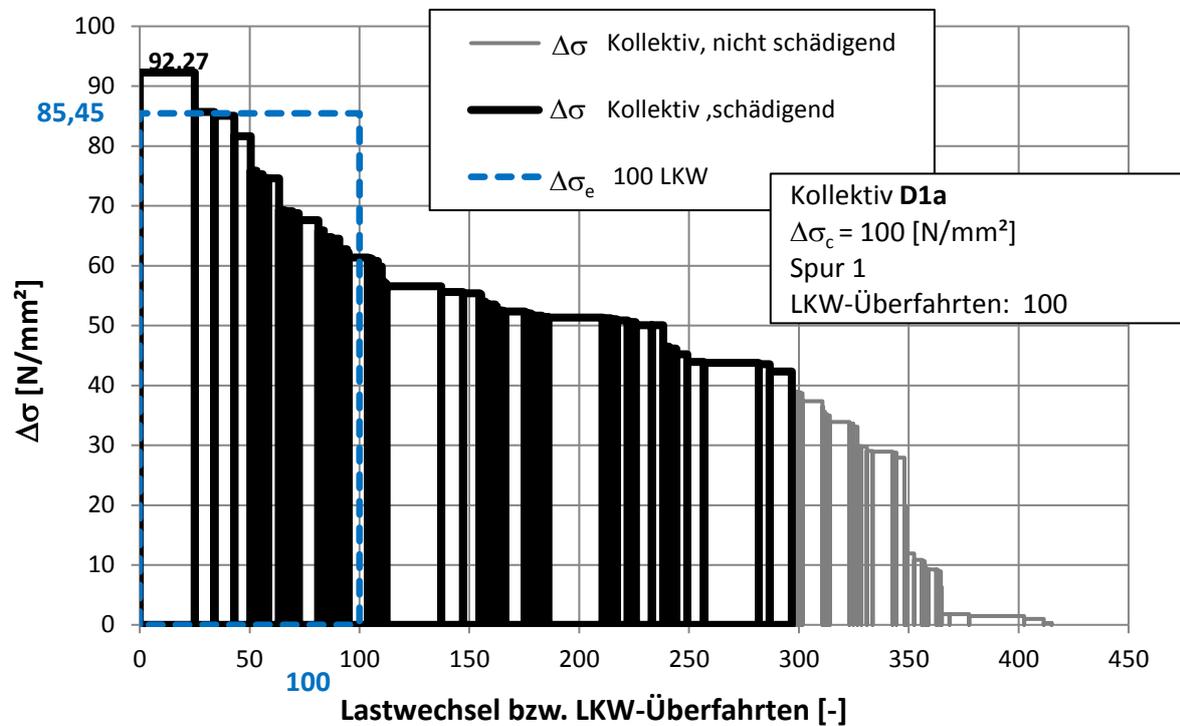


Abbildung 176: M2 - Modifiziertes Lastkollektiv und schadensäquivalentes EK des Details 1a mit Spurverteilung nach EN 1991-2

B.5.2 Detail 1b

B.5.2.1 Zentrische Überfahrt

Das Lastkollektiv der Zentrischen Überfahrt des Details D1b wurde analog zu Detail D1a ermittelt. Dabei ist festzustellen, dass dieses Lastkollektiv keine schädigenden Wirkungen aufweist, wie in Abbildung 177 ersichtlich

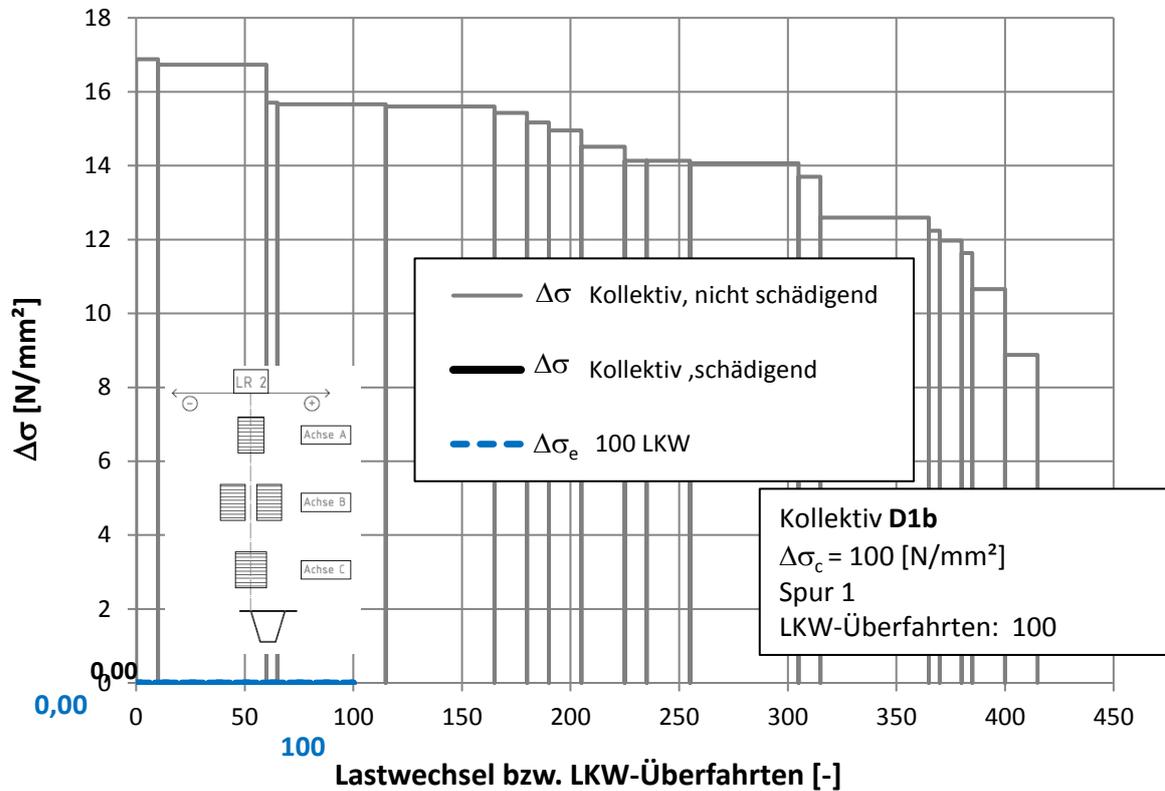
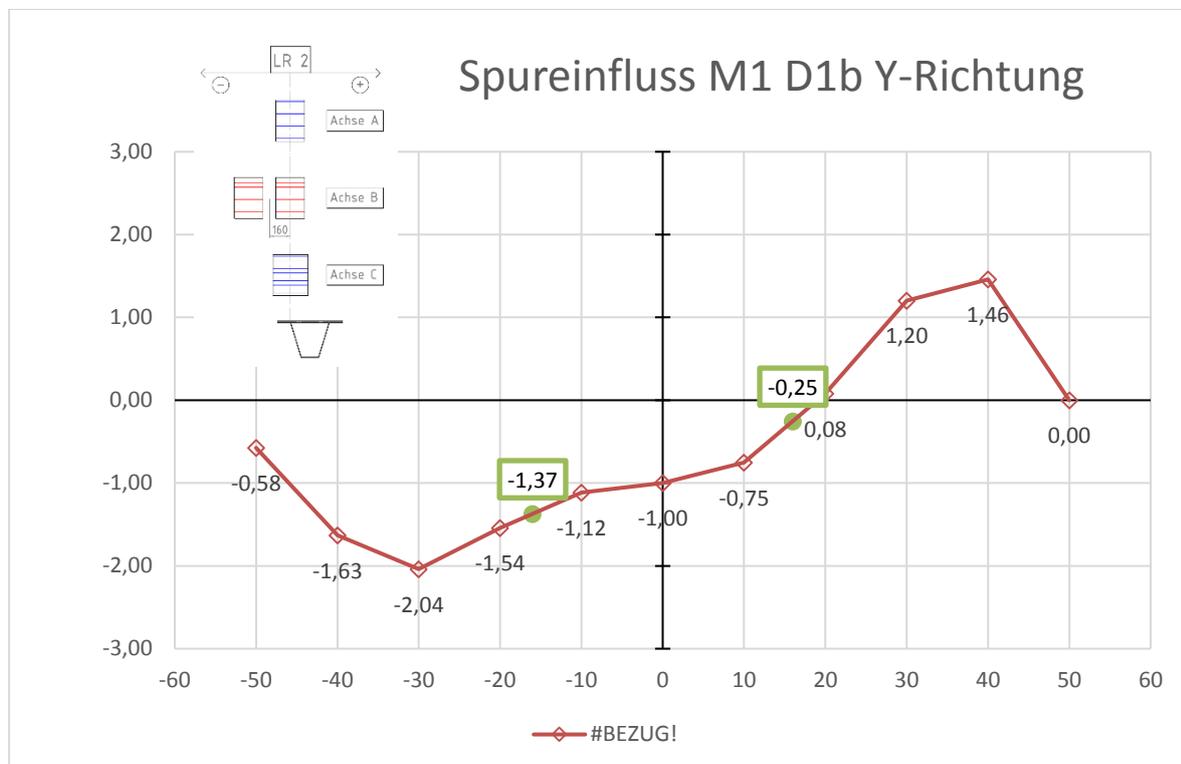


Abbildung 177: M2 - Lastkollektiv der zentrischen Überfahrt an D1b

B.5.2.2 Reale Achsgeometrie

Die Berücksichtigung der realen Achsgeometrie erfolgte ebenfalls analog zum Detail 1a in Abschnitt A.5.1.2. Auf Abbildung 178 sieht man die Quereinflusslinie der Achse B. Die Achsverschiebung der Achse B um 16 cm ist mit dickeren Linien markiert. Für die Modifizierung des Last-kollektives der zentrischen Überfahrt wurde der konservative Wert -1,37 verwendet.



Anmerkung: Negatives Vorzeichen von η → Druckspannungen
Positives Vorzeichen von η → Zugspannungen

Abbildung 178: M2 Lasteinflusslinie in Querrichtung Achse B im Detail 1b

Abbildung 179 zeigt das, aufgrund der realen Achsgeometrie, modifizierte Lastkollektiv. Es ist ersichtlich, dass auch durch Erhöhung der $\Delta\sigma$, die durch Achse B verursacht wurden, noch keine schädigende Wirkung eintritt.

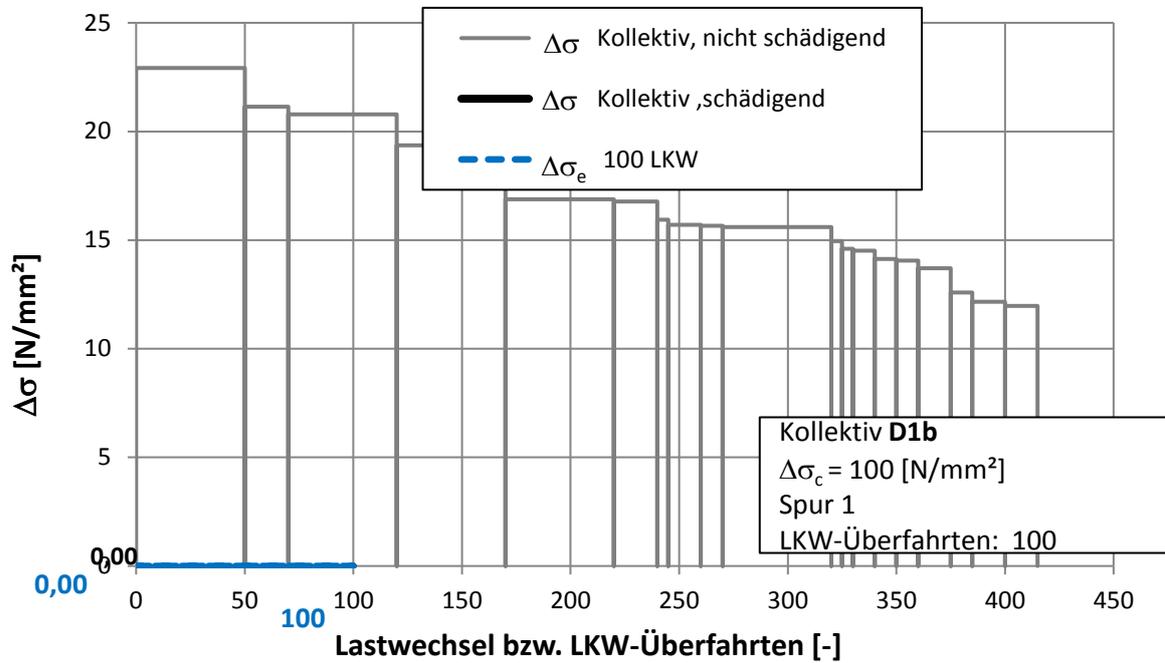


Abbildung 179: M2 - Lastkollektiv unter Berücksichtigung der realen Achsgeometrie an D1b

B.5.2.1 Häufigkeitsverteilung in Brückenquerrichtung nach Blab

Abbildung 180a zeigt die vereinfachte Spurverteilung nach Blab bei einer Fahrbahnbreite von 4 m und Abbildung 180b zeigt die dazugehörigen Werte des Spureinflusses der einzel- und zwillingsbereiften Achsen. Achse B wurde hierbei um 16 cm verschoben um die reale Achsgeometrie konservativ zu berücksichtigen. In Tabelle 15 sind die Skalierungsfaktoren η noch einmal aufgelistet.

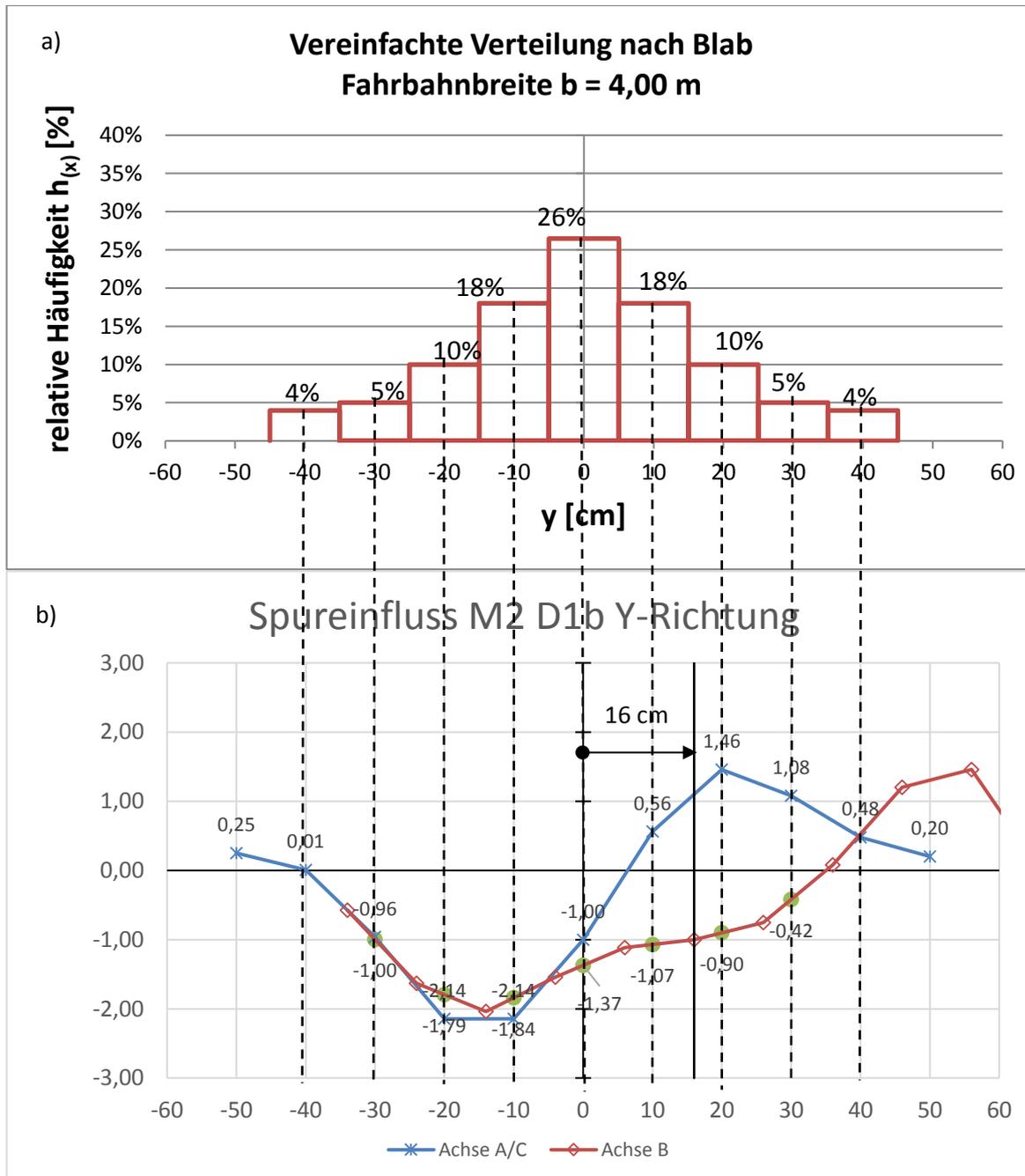


Abbildung 180: M2 - Spurverteilung nach Blab ($b=4m$) und Quereinflusslinien bei verschobener Achse B

Anmerkung: Negatives Vorzeichen von $\eta \rightarrow$ Druckspannungen
 Positives Vorzeichen von $\eta \rightarrow$ Zugspannungen

In Tabelle 24 sind die Skalierungsfaktoren η noch einmal aufgelistet.

Achse	-40 cm	- 30 cm	- 20 cm	- 10 cm	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm
B	-0,04	-1,00	-1,79	-1,84	-1,37	-1,07	-0,90	-0,42	0,48
A/C	0,01	-0,96	-2,14	-2,14	-1,00	0,66	1,46	1,08	0,20

Tabelle 24: Übersicht der Skalierungsfaktoren je Fahrspur

Die Rechenschritte für das Lastkollektiv auf Abbildung 181 erfolge analog zu Modell 1. Auch hier wurden insgesamt vier unterschiedliche, zufallsgenerierte Abfolgen analysiert und ausgewertet. Die jeweiligen Einstufenkollektive $\Delta\sigma_e$ der vier Abfolgen zeigen allerdings vernachlässigbar geringe Abweichungen voneinander.

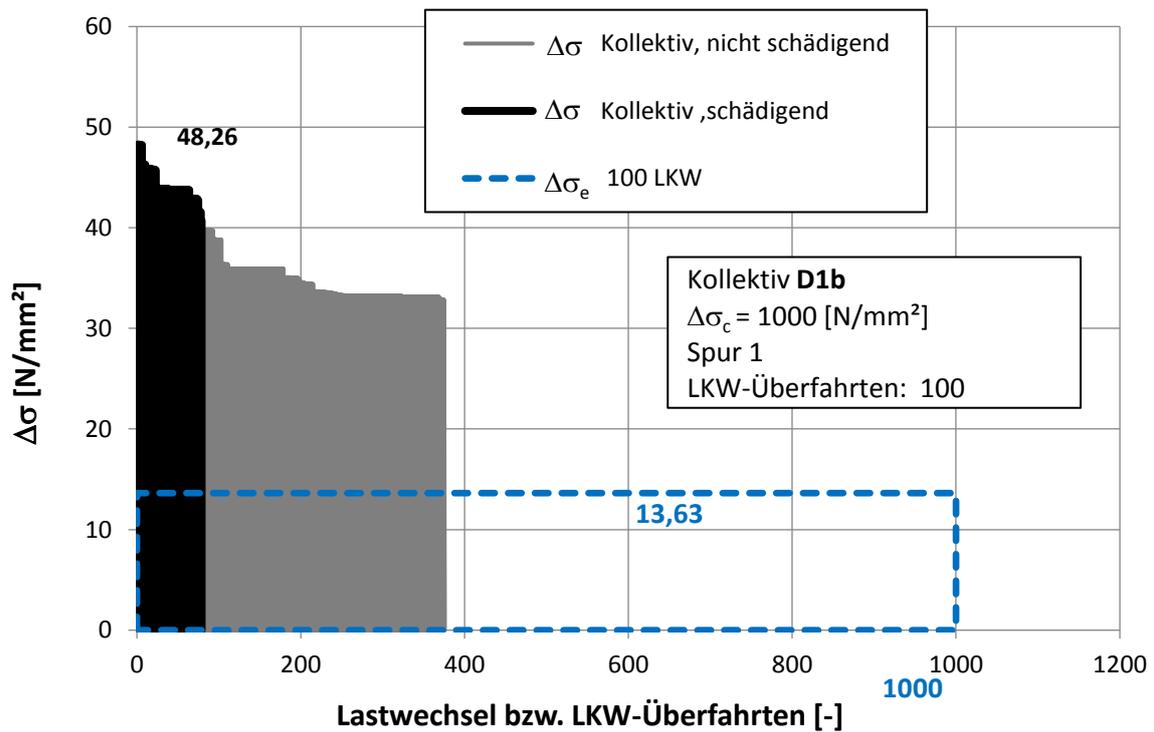


Abbildung 181: M2 - Lastkollektiv und schadensäquivalentes EK des Details 1b mit Spurverteilung nach Blab ($b=4m$)

B.5.3 Detail 2

B.5.3.1 Zentrische Überfahrt

Die Definition der zentrischen Überfahrt ist in Kapitel A.5.1 gegeben. Für das Lastkollektiv, das auf Abbildung 182 zu sehen ist, wurden die Spannungsspiele aus die Detailpunkt 2 analysiert.

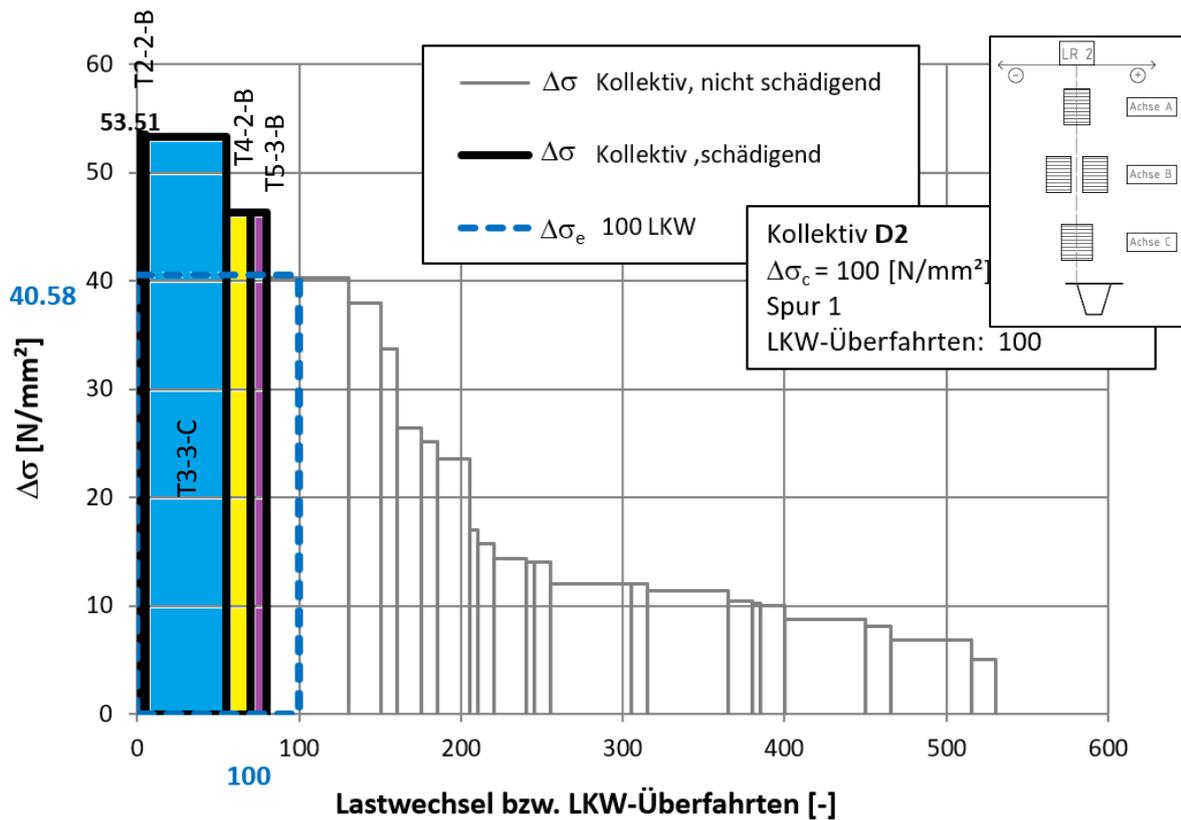


Abbildung 182: M2 - Lastkollektiv der zentrischen Überfahrt an D2

B.5.3.2 Reale Achsgeometrie

Um die reale Achsgeometrie zu berücksichtigen wurde die Einflusslinie in Brückenquerrichtung der einzelbereiften und der zwillingsbereiften Achsen ermittelt. Da die Achse B zu den beiden Achsen um 16 cm verschoben ist und Achse C die maximalen Spannungsspiele verursacht, wurden die Kollektivteile der Achse B mit Hilfe der Quereinflusslinie modifiziert. Abbildung 183 zeigt die Einflusslinie der Achse B und den konservativ gewählten Skalierungsfaktor $\eta = 0,99$.

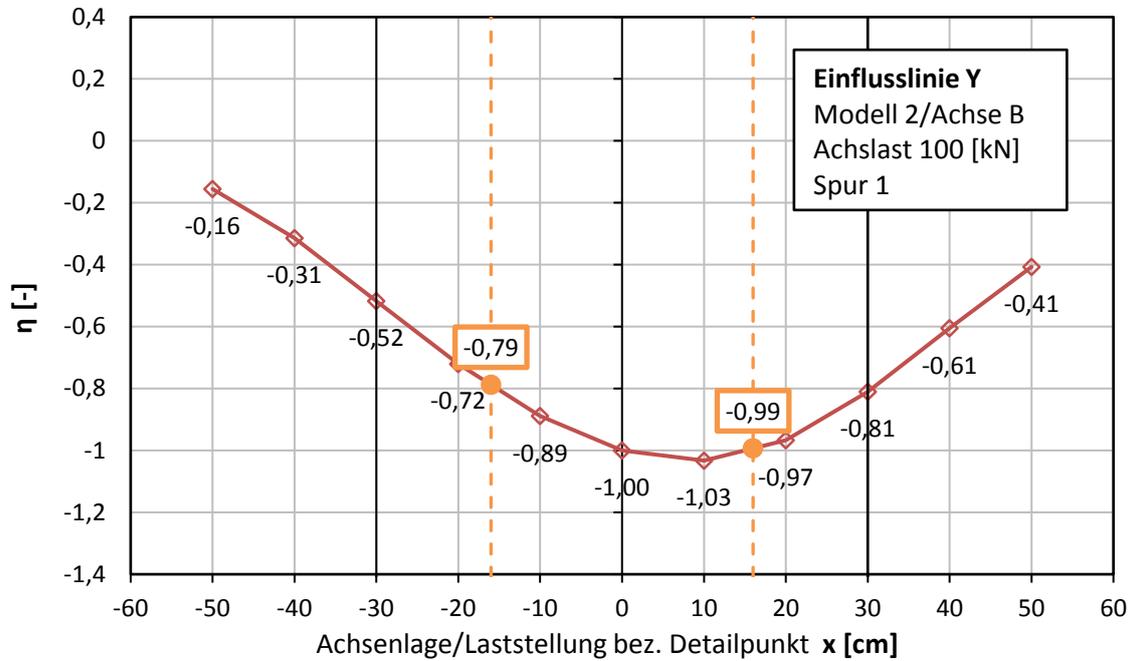


Abbildung 183: M2 – Lasteinflusslinie in Querrichtung Achse B Detail 2

Abbildung 184 zeigt das, aufgrund der realen Achsgeometrie, modifizierte Lastkollektiv. Es ist ersichtlich, dass aufgrund der Reduktion der $\Delta\sigma$, die durch Achse B verursacht wurden, ein geringfügig vermindertes schadenäquivalentes Einstufenkollektiv entsteht.

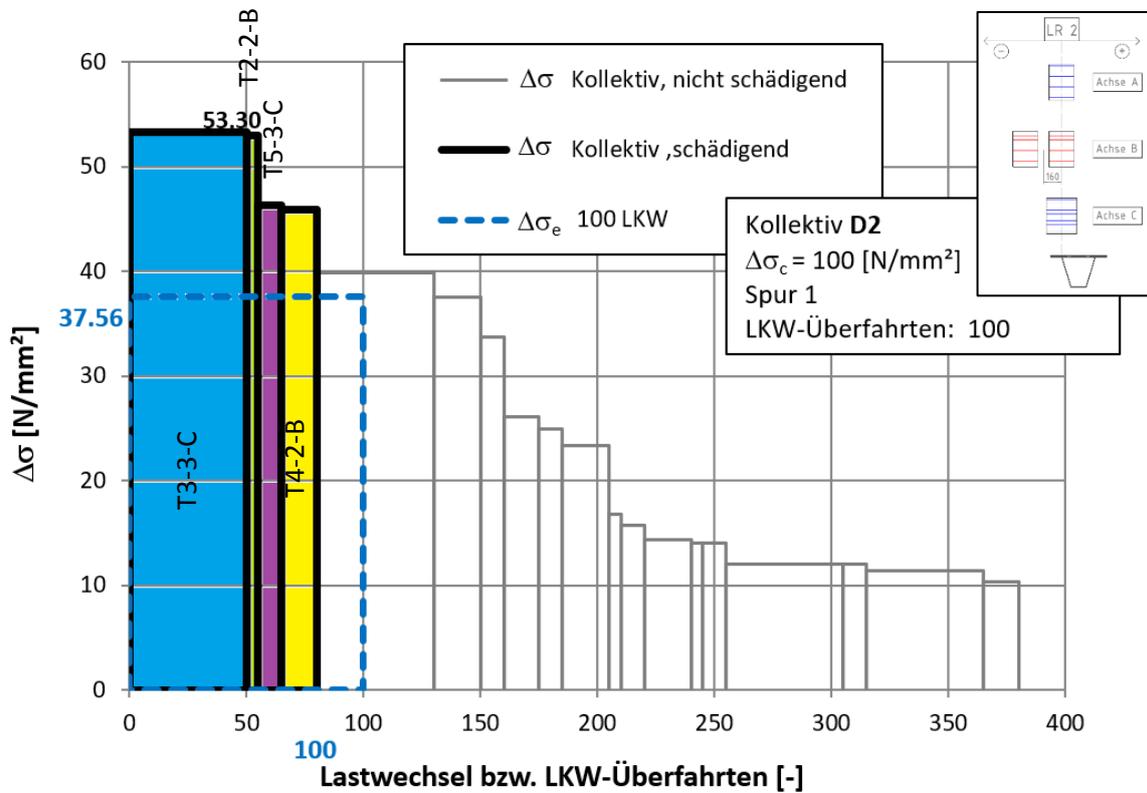


Abbildung 184: M2 – Lastkollektiv unter Berücksichtigung der realen Achsgeometrie an D2

B.5.3.3 Häufigkeitsverteilung in Brückenquerrichtung nach Blab

Abbildung 185a zeigt die vereinfachte Spurverteilung nach Blab bei einer Fahrbahnbreite von 3,5 m und Abbildung 185b die dazugehörigen η -Werte des Spureinflusses der einzel- und zwillingsbereiften Achsen. Achse B wurde hierbei um 16 cm verschoben um die reale Achsgeometrie zu berücksichtigen.

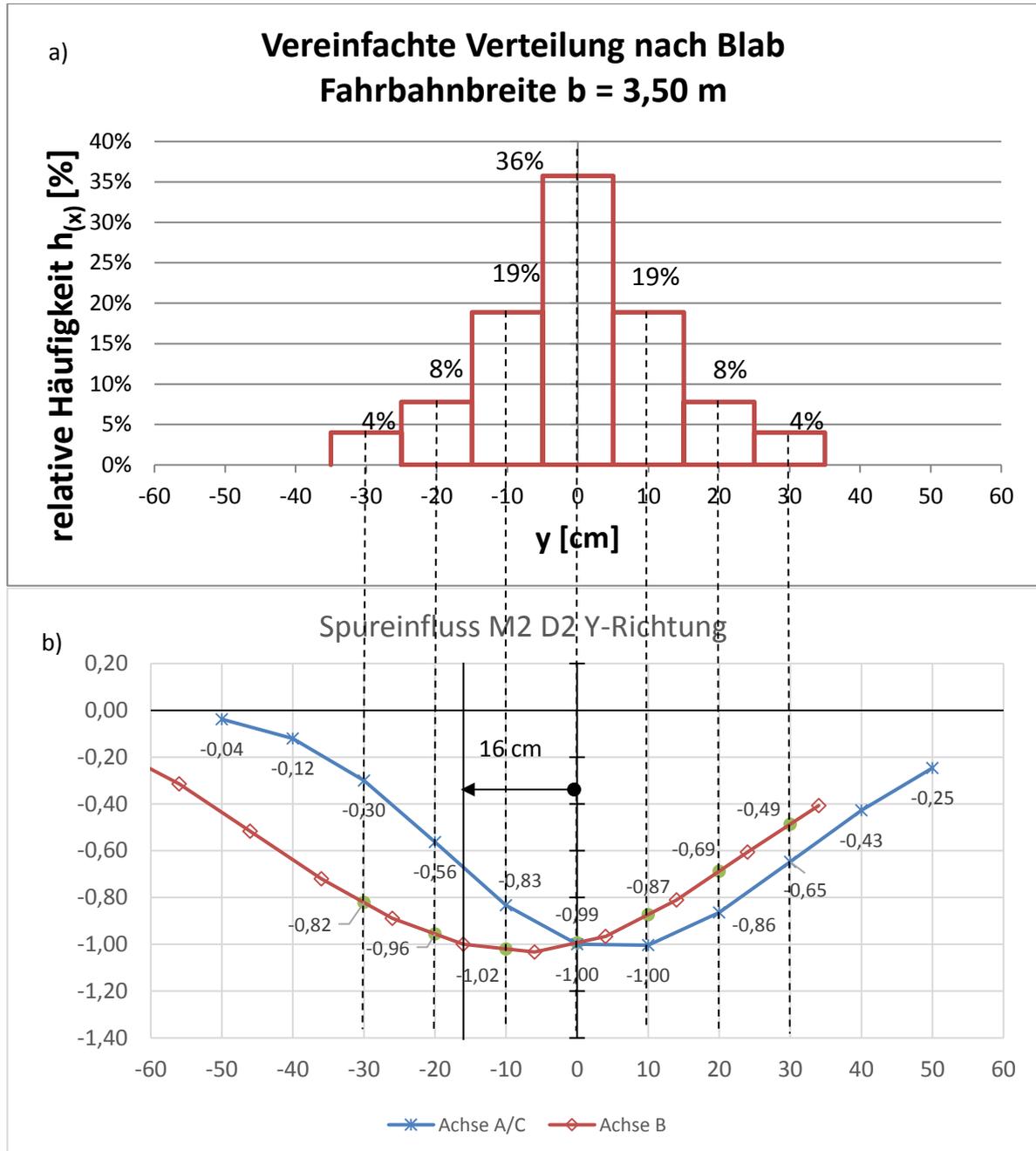


Abbildung 185: M2 - Spurverteilung nach Blab ($b=3,5\text{ cm}$) dazugehörige und die Quereinflusslinien der verschobenen Achse B

Anmerkung: Negatives Vorzeichen von $\eta \rightarrow$ Druckspannungen
Positives Vorzeichen von $\eta \rightarrow$ Zugspannungen

Tabelle 25 gibt eine Auflistung über die Skalierungsfaktoren η und die zugehörige Lage in Brückenquerrichtung.

Achse	- 30 cm	- 20 cm	- 10 cm	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm
B	- 0,82	- 0,96	- 1,02	- 0,99	- 0,87	- 0,69	- 0,49
A/C	- 0,30	- 0,56	- 0,83	- 1,00	- 1,00	- 0,86	- 0,65

Tabelle 25: Übersicht der Skalierungsfaktoren je Fahrspur

Abbildung 186 zeigt das resultierende Lastkollektiv und Einstufenkollektiv $\Delta\sigma_e$. Berechnung erfolgte analog zu Modell 1

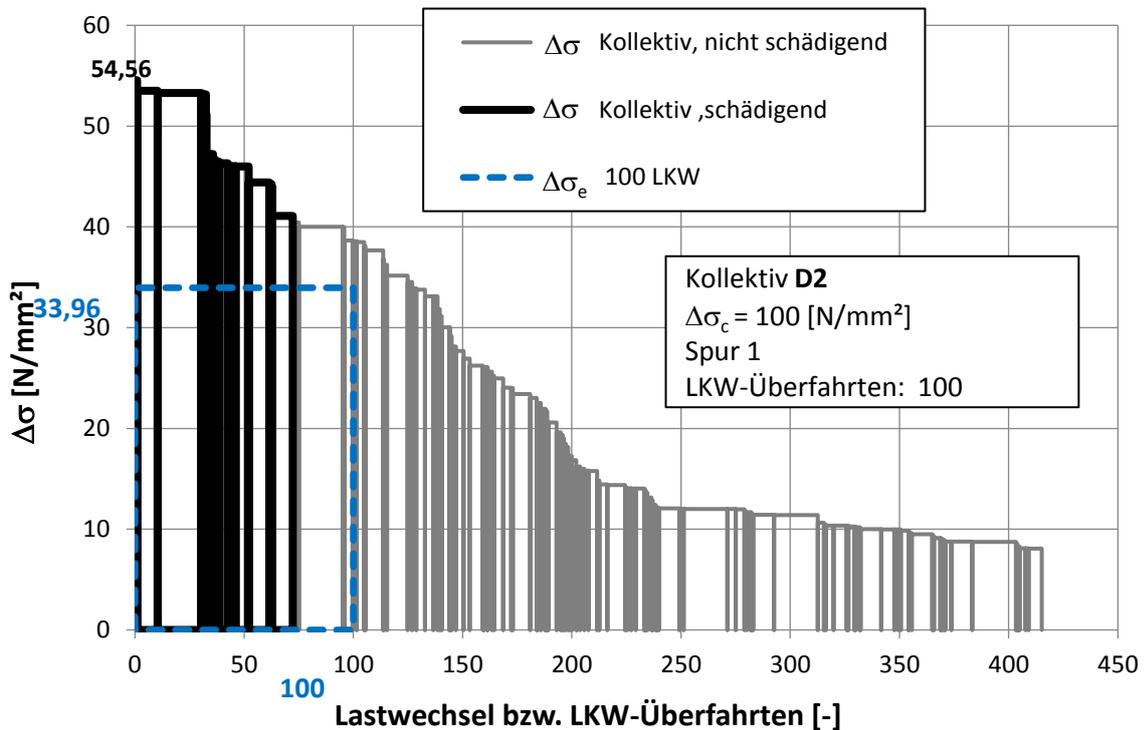


Abbildung 186: M2 - Modifiziertes Lastkollektiv und schadensäquivalentes EK des Details 2 mit Spurverteilung nach Blab ($b=3,5 \text{ m}$)

B.5.3.4 Verteilung nach Eurocode 1991-2

Die Berechnungen für das Lastkollektiv laut EN 1991-2 erfolgte analog zu der Berechnung mit der Spurverteilung nach Blab. Abbildung 187 zeigt die Verteilung nach EN und die dazugehörigen Werte der Quereinflusslinien des Details 2.

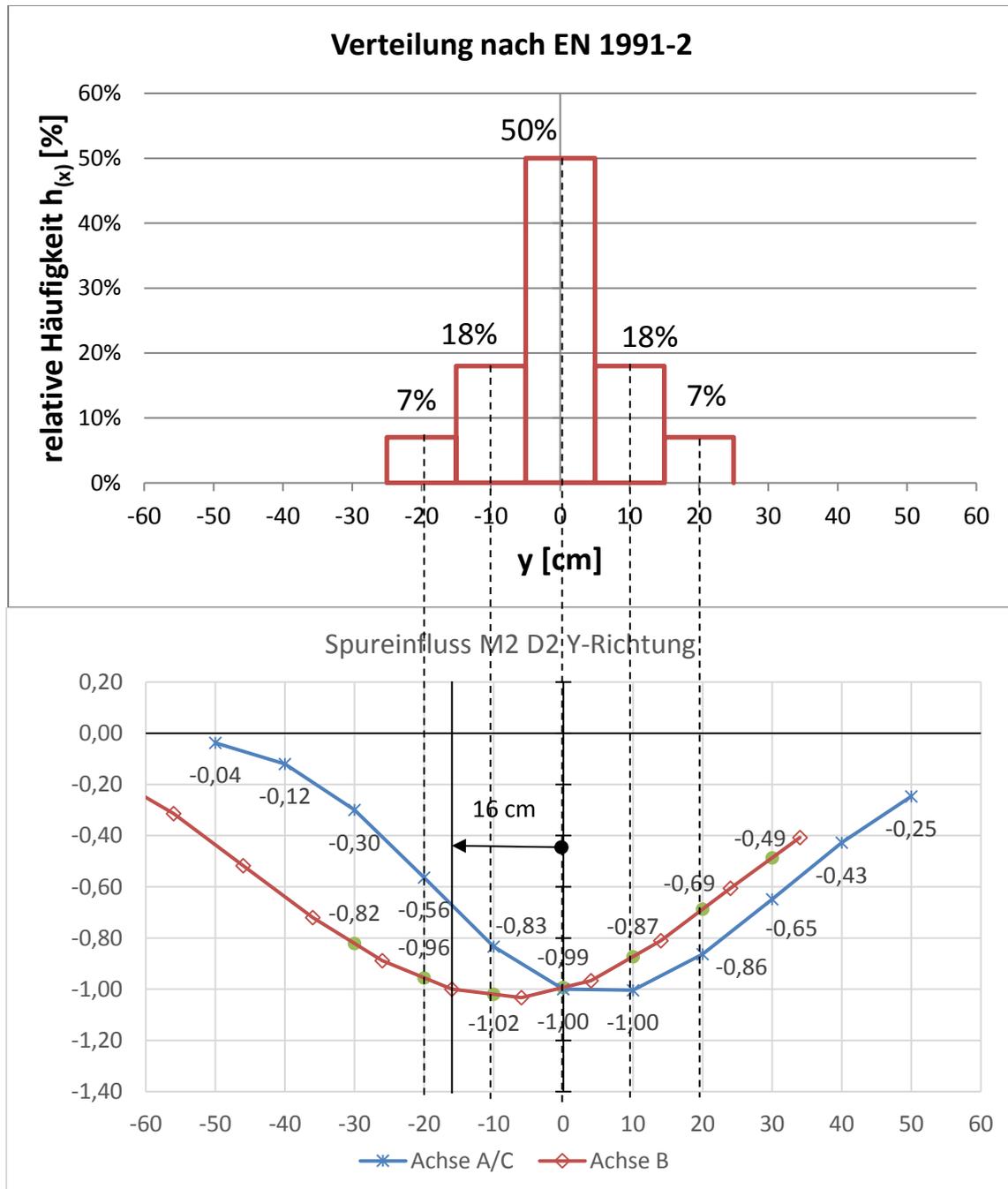


Abbildung 187: Spurverteilung nach EN 1991-2 und die dazugehörige Quereinflusslinien der verschobener Achse B

Anmerkung: Negatives Vorzeichen von $\eta \rightarrow$ Druckspannungen
 Positives Vorzeichen von $\eta \rightarrow$ Zugspannungen

In Tabelle 26 sind die Skalierungsfaktoren η noch einmal aufgelistet.

Achse	- 20 cm	- 10 cm	0 cm	10 cm	20 cm
B	- 0,96	- 1,02	- 0,99	- 0,87	- 0,69
A/C	- 0,56	- 0,83	- 1,00	- 1,00	- 0,86

Tabelle 26: Übersicht der Skalierungsfaktoren je Fahrspur

Abbildung 188 zeigt das resultierende Lastkollektiv und Einstufenkollektiv $\Delta\sigma_e$. Berechnung erfolgte analog zu Modell 1

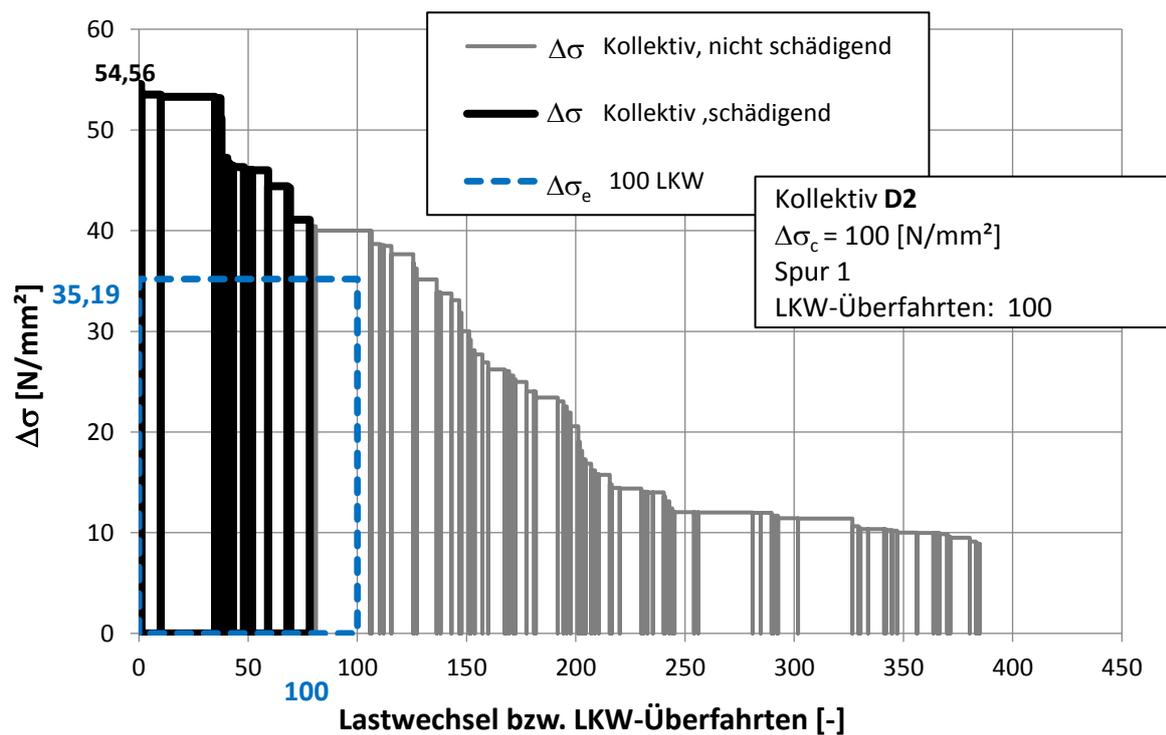


Abbildung 188: M2 - Modifiziertes Lastkollektiv und schadensäquivalentes EK des Details 2 mit Spurverteilung nach EN 1991-2