



Betriebsfaktoren zur Ermüdungsbeanspruchung von stählernen orthotropen Fahrbahnplatten bei Straßenbrücken

Masterarbeit

verfasst von

Andreas Ogris

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 2016

Eidesstattliche Erklärung

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

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Danksagung

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

Ich danke ebenfalls meinen Studienkollegen und Freunden, die mich während meines Studiums stets mit Rat und Tat begleitet haben.

Kurzfassung

Für den derzeitigen Nachweis der Ermüdungsfestigkeit von stählernen Straßenbrücken gibt es in der EN 1993-2 die Möglichkeit, anstatt eines komplexen Lastmodells aus mehreren Fahrzeugen ein vereinfachtes Lastmodell, bestehend aus einem einzigen "Ersatzfahrzeug", dem Ermüdungslastmodell 3 zu verwenden. Die Anpassung an die tatsächliche komplexe Betriebsbeanspruchung erfolgt mit sogenannten Schadensäquivalenzfaktoren λ (Betriebsfaktoren). Nun gibt der Eurocode für kleinere Spannweiten unter 10 m keine Werte an. Hier kann man sich mit dem DIN-Fachbericht 103 behelfen. Allerdings ist weder klar ersichtlich wie diese Werte zustande kamen, noch ob sie zuverlässige Ergebnisse liefern.

Aus diesem Grund war es Ziel dieser Arbeit, jene Schadensäquivalenzfaktoren λ für eine vereinfachte Ermüdungsberechnung nach EN 1993-2 für stählerne Fahrbahnplatten (orthotrope Platten) anzugeben. Zu diesem Zweck wurden drei repräsentative Stahlbrücken mit verschiedenen Längsrippengeometrien und unterschiedlichen Querträgerabständen ausgewählt, um als Finite-Element-Modell abgebildet zu werden und anschließend mit zutreffenden Verkehrslastmodellen deren Ermüdungsbeanspruchung zu berechnen. Aus dem darauffolgenden Ergebnisvergleich wurden die Schadensäquivalenzfaktoren λ bestimmt und mit den empfohlenen Werten aus dem DIN-Fachbericht 103 verglichen.

Abstract

For the current proof of fatigue strength of steel highway bridges there is the possibility in EN 1993-2 to use a simplified load model consisting of a simplified vehicle, called fatigue load model 3 (ELM3), by adapting in addition so-called damage equivalence factors λ (operating factors), instead of a complex load model with several vehicles. However, the Eurocode 3 does not provide support for spans under 10 m. In these cases the DIN-Fachbericht 103 can be used. Unfortunately, it is not clear how these values were calculated and whether they provide reliable results.

Due to this reason, the aim of this work was to specify the equivalence factors λ for orthotropic steel decks according to ELM 3 in EN 1993-2. For this purpose, three representative steel bridges with different longitudinal rib geometries and different transverse beam distances were selected to be the bases for a finite element model. Their fatigue stress spectra was then calculated using traffic load models. Then the equivalence factors λ were determined and compared with the recommended values from the DIN-Fachbericht 103.

Inhaltsverzeichnis

0	EINLEITUNG.....	1
1	BESTANDSBRÜCKEN-DATENSAMMLUNG VON ORTHOTROPEN PLATTEN	3
1.1	Längsrippen aus I- und Wulstprofilen	4
1.2	Längsrippen aus Trapezprofilen.....	8
1.3	Festlegung der geometrischen Abmessungen	11
2	ERMÜDUNGSNACHWEIS FÜR STRAßENBRÜCKEN NACH EUROCODE	13
2.1	Ermüdungsnachweis mit Ermüdungslastmodell 3	14
2.2	Ermüdungsnachweis mit Ermüdungslastmodell 4	16
3	BETRIEBSFAKTOREN FÜR DAS ERMÜDUNGSLASTMODELL 3	21
3.1	Beiwert λ_1	21
3.2	Verkehrsstärkenbeiwert λ_2	24
3.3	Nutzungsdauerbeiwert λ_3	25
3.4	Fahrstreifenbeiwert λ_4	25
4	BERECHNUNG VON λ_1 FÜR BELIEBIGE VERKEHRSMISCHUNGEN.....	27
4.1	Ermittelte Beiwerte λ_1 für $0 \leq L \leq 10$ m	30
4.1.1	Ergebnisse der λ_1 -Faktoren für Detail D1	31
4.1.2	Ergebnisse der λ_1 -Faktoren für Detail D2	34
4.1.3	Kollektivvergleiche	36
4.2	Vergleich der Beiwerte λ_1 für Detail D2.....	40
4.3	Zusammenfassung der ermittelten Beiwerte λ_1	42
4.4	Zusammenfassung – Schadensäquivalenzbeiwerte λ_1	44
5	LITERATURVERZEICHNIS	45

A	MODELL A: ORTHOTROPE PLATTE MIT OFFENEN LÄNGSRIPPEN	47
A.1	Geometrie des betrachteten Brückendecks.....	47
A.2	Finite-Elemente-Modellierung	50
A.2.1	Material.....	50
A.2.2	Bauteile (Parts).....	50
A.2.3	Netzgenerierung	52
A.2.4	Kopplungen	54
A.2.5	Lagerung	55
A.2.6	Betrachtete Detailpunkte	56
A.2.7	Lastaufstellung.....	58
A.3	Ermittelte Einflusslinien	59
A.3.1	Detail D1 – Spannungseinflusslinien aus Einheitsachslasten	59
A.3.2	Detail D2 – Spannungseinflusslinien aus Einheitsachslasten	62
A.4	Ermittlung der Lastkollektive	64
A.4.1	Detail D1 – Spannungsverläufe und Lastspiele aus ELM 4.....	64
A.4.2	Detail D1 – Spannungsverläufe und Lastspiele aus ELM 4_mod	70
A.4.3	Detail D2 – Spannungsverläufe und Lastspiele aus ELM 4.....	75
A.4.4	Detail D2 – Spannungsverläufe und Lastspiele aus ELM 4_mod	81
A.4.5	Lastkollektiv - Einstufenkollektiv.....	87
A.5	Beiwerte λ_1	103
A.5.1	Detail D1 – ermittelte Beiwerte λ_1	103
A.5.2	Detail D2 – ermittelte Beiwerte λ_1	105
B	MODELL B: ORTHOTROPE PLATTE MIT TRAPEZLÄNGSRIPPEN($e_{QT}=4m$) .107	
B.1	Geometrie des betrachteten Brückendecks.....	107
B.2	Finite-Elemente-Modellierung	110
B.2.1	Material.....	110
B.2.2	Bauteile (Parts).....	110
B.2.3	Netzgenerierung	112
B.2.4	Kopplungen	114
B.2.5	Lagerung	115
B.2.6	Betrachtete Detailpunkte	116
B.2.7	Lastaufstellung.....	118
B.3	Ermittelte Einflusslinien	119
B.3.1	Detail D1 - Spannungseinflusslinien.....	119
B.3.2	Detail D2 – Spannungseinflusslinien aus Einheitsachslasten	120
B.4	Ermittlung der Lastkollektive	122
B.4.1	Detail D1 – Lastspiele aus ELM 4.....	122
B.4.2	Detail D1 – Lastspiele aus ELM 4_mod	124
B.4.3	Detail D2 – Spannungsverläufe und Lastspiele aus ELM 4.....	126
B.4.4	Detail D2 – Spannungsverläufe und Lastspiele aus ELM 4_mod	131
B.4.5	Lastkollektiv - Einstufenkollektiv.....	137

B.5	Beiwerte λ_1	153
B.5.1	Detail D1 – ermittelte Beiwerte λ_1	153
B.5.2	Detail D2 – ermittelte Beiwerte λ_1	155
C	MODELL C: ORTHOTROPE PLATTE MIT TRAPEZLÄNGSRIPPEN($e_{QT}=2m$)	157
C.1	Geometrie des betrachteten Brückendecks	157
C.2	Finite-Elemente-Modellierung	160
C.2.1	Material.....	160
C.2.2	Bauteile (Parts).....	160
C.2.3	Netzgenerierung	162
C.2.4	Kopplungen	164
C.2.5	Lagerung	165
C.2.6	Betrachtete Detailpunkte	166
C.2.7	Lastaufstellung	168
C.3	Ermittelte Einflusslinien	169
C.3.1	Detail D1 - Spannungseinflusslinien.....	169
C.3.2	Detail D2 – Spannungseinflusslinien aus Einheitsachslasten	170
C.4	Ermittlung der Lastkollektive	172
C.4.1	Detail D1 – Lastspiele aus ELM 4.....	172
C.4.2	Detail D1 – Lastspiele aus ELM 4_mod	174
C.4.3	Detail D2 – Spannungsverläufe und Lastspiele aus ELM 4.....	176
C.4.4	Detail D2 – Spannungsverläufe und Lastspiele aus ELM 4_mod	181
C.4.5	Lastkollektiv - Einstufenkollektiv.....	187
C.5	Beiwerte λ_1	203
C.5.1	Detail D1 – ermittelte Beiwerte λ_1	203
C.5.2	Detail D2 – ermittelte Beiwerte λ_1	205
D	ERMÜDUNGSLASTMODELLE	207
D.1	Ermüdungslastmodell 3 (Einzelfahrzeugmodell)	207
D.2	Ermüdungslastmodell 4	208
D.2.1	Ermüdungslastmodell 4 (Gruppe von "Standardlastkraftwagen")	208
D.2.2	Ermüdungslastmodell 4_mod	209
D.2.3	Definition der Reifenarten/Achsabstände	210
D.3	Lastaufstellung unter Berücksichtigung des Fahrbahnbelages	211

0 Einleitung

In den Jahren von 1960 bis 1970 wurden besonders viele Straßenbrückentragwerke als stählerne orthotrope Platte ausgeführt. Hierunter versteht man ein Fahrbahnblech, das durch angeschweißte Längsrippen und Querträger orthogonal ausgesteift ist (orthotrop = orthogonal anisotrop) [5]. Damals wurde allerdings nur der Nachweis der statischen Tragsicherheit für diese Tragwerke geführt. Das Ermüdungsverhalten des Werkstoffes Stahl wurde für die stählerne Fahrbahnplatte nicht betrachtet.

Seit Beginn der Anwendung orthotroper Platten bei Straßenbrücken hat sich das Verkehrsaufkommen, hier insbesondere der Schwerverkehrsanteil, bis heute erheblich vervielfacht [4]. Dies führte zu einer starken Erhöhung der ermüdungsrelevanten Lastspiele, sodass die Erfordernis von zusätzlichen Ermüdungsbetrachtungen dieser Stahlbauteile in der aktuellen Nachweisführung notwendig ist.

Heute gibt es in der EN 1993-2 Vorgaben zur Berechnung der Ermüdungsbeanspruchung von Stahlbrücken, sowie in der EN 1993-1-9 einen eigenen Teil über die Ermüdungsfestigkeit von Stahlbaudetails. Des Weiteren macht die EN 1991-2 Angaben über die zur Berechnung notwendigen Ermüdungslastmodelle. Meist wird bei Straßenbrücken aufgrund des Rechenaufwands die vereinfachte Berechnungsmethode der EN 1993-2 gewählt, bei welcher das Ermüdungslastmodell 3 Anwendung findet. Hier wird die Verkehrsbelastung durch ein "Ersatzfahrzeug", bestehend aus vier Achsen gleicher Achslast und je gleicher Reifentypen, angesetzt (siehe Abbildung 14). Um nun allerdings mit dem aus diesem Modell erhaltenen Wert des maximalen Spannungsspiels einen Nachweis führen zu können, muss dieser durch den sogenannten Schadensäquivalenzfaktor λ , welcher die Spannweite, das Verkehrsaufkommen und die Nutzungsdauer des Brückentragwerks berücksichtigt, angepasst werden. Werte für diesen Faktor finden sich im Eurocode oder in entsprechender Literatur, zum Beispiel im DIN Fachbericht 103 [2], wobei im letzteren auch Werte für kleine Spannweiten unter 10 m angegeben sind. Vorangegangene Untersuchungen zur Ermüdungsbeanspruchung stählerner orthotroper Fahrbahnplatten zeigten jedoch, dass die λ_1 -Faktoren für das Ermüdungslastmodell 3 bei Spannweiten kleiner 10 m im Vergleich mit dem Ermüdungslastmodell 4 nicht zutreffend sind. Aus diesem Grund wird im Folgenden der Ermüdungsnachweis nach heutigem Stand der Norm (Eurocode EN 1991-2, EN 1993-2) beschrieben und dann daraus mit Hilfe von Finite-Element-Berechnungen mit dem Programm Abaqus [8] zutreffende Schadensäquivalenzfaktoren für die maßgebenden Detailpunkte von stählernen orthotropen Platten ermittelt, insbesondere Werte für den Beiwert λ_1 .

1 Bestandsbrücken-Datensammlung von orthotropen Platten

In der Literatur finden sich viele detaillierte Informationen zu orthotropen Platten bei Straßenbrücken, welche zwischen 1950 und 1975 [3] erbaut wurden. Um für die nachfolgenden Berechnungen geeignete geometrische Abmessungen auszuwählen, welche möglichst aussagekräftig die Gesamtheit der ausgeführten Konstruktionen orthotroper Platten abdecken (Insbesondere die Ausbildung der Deckbleche, Längsrippen und des Querträgerabstandes variierte stark), wurde ausgehend von den in [3] tabellierten Brücken ein Parametervergleich durchgeführt und eine Auswahl der zu modellierenden orthotropen Platten getroffen.

Aufgrund der Vielzahl an Konstruktionsmöglichkeiten für orthotrope Platten wurden diese anhand ihrer Längsrippengeometrie kategorisiert. Die Einteilung erfolgt in Längsrippen mit

- I-Profilen (offene Längsrippen)
- Wulstprofilen (offene Längsrippen mit untenliegender Wulst)
- Trapezprofilen (geschlossene Längsrippen).

Sonderformen wie Kelchprofile o.ä. wurden nicht betrachtet.

Nachfolgend sind für jeden Längsrippentyp die Längsrippen-Konstruktionshöhe, Längsrippenschlankheit, Deckblechschlankheit sowie die Längsrippensteifigkeit in Diagrammen grafisch aufbereitet und zusammengefasst. Des Weiteren wurden die für eine Modellierung ausgewählten Brücken in den Diagrammen gekennzeichnet.

1.1 Längsrippen aus I- und Wulstprofilen

Da sich die betrachteten I- und Wulstprofile sehr ähneln, wurden diese zur besseren Übersicht zusammengefasst. Man erkennt dabei, dass Wulstprofile öfter bei der Ausführung orthotroper Platten Verwendung fanden. Die in den Diagrammen (Abbildungen 2 bis 5) dargestellten Abmessungen wurden entsprechend Abbildung 1 angegeben.

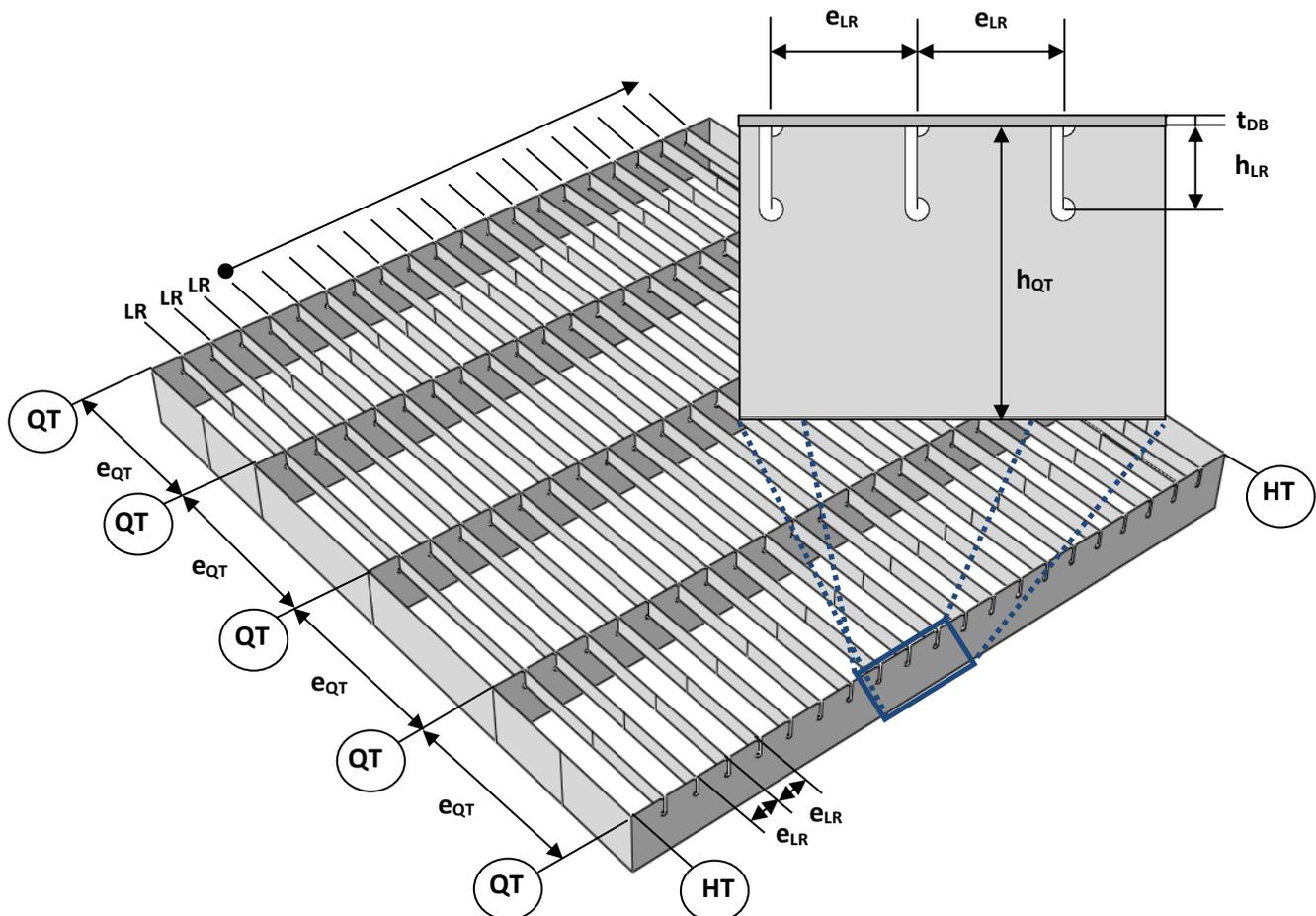


Abbildung 1: orthotrope Platte mit offenen Längsrippen (Deckblech transparent dargestellt) und gewählte Bezeichnungen für die GeometrieKennwerte

Orthotrope Platten deren Längsrippen aus I-Profilen oder Wulstprofilen (sog. Schiffbauprofile) bestehen, wurden meist bei geringen Querträgerabständen um 2 m eingesetzt. Die Längsrippenhöhe der Profile lag zwischen 120 und 250 mm, wobei die Änderungen des Querträgerabstandes der betrachteten Konstruktionen kaum einen vergleichbaren Einfluss auf die gewählte Längsrippenhöhe haben (annähernd identes Verhältnis e_{QT}/h_{LR} ; vgl. Abbildung 3).

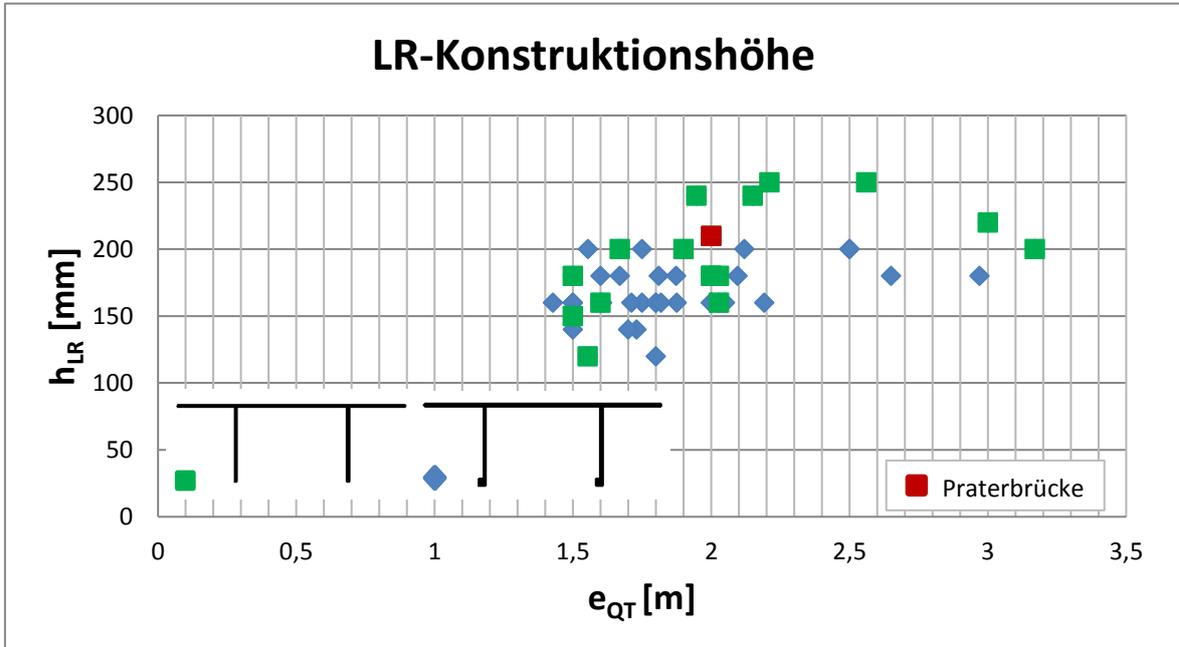


Abbildung 2: orthotrope Platten mit I-Rippen und Wulstrippen – Konstruktionshöhe h_{LR} in Abhängigkeit des Querträgerabstandes e_{QT}

Abbildung 3 zeigt die Längsrippenschlankheit des Fahrbahndecks bezogen auf den Querträgerabstand.

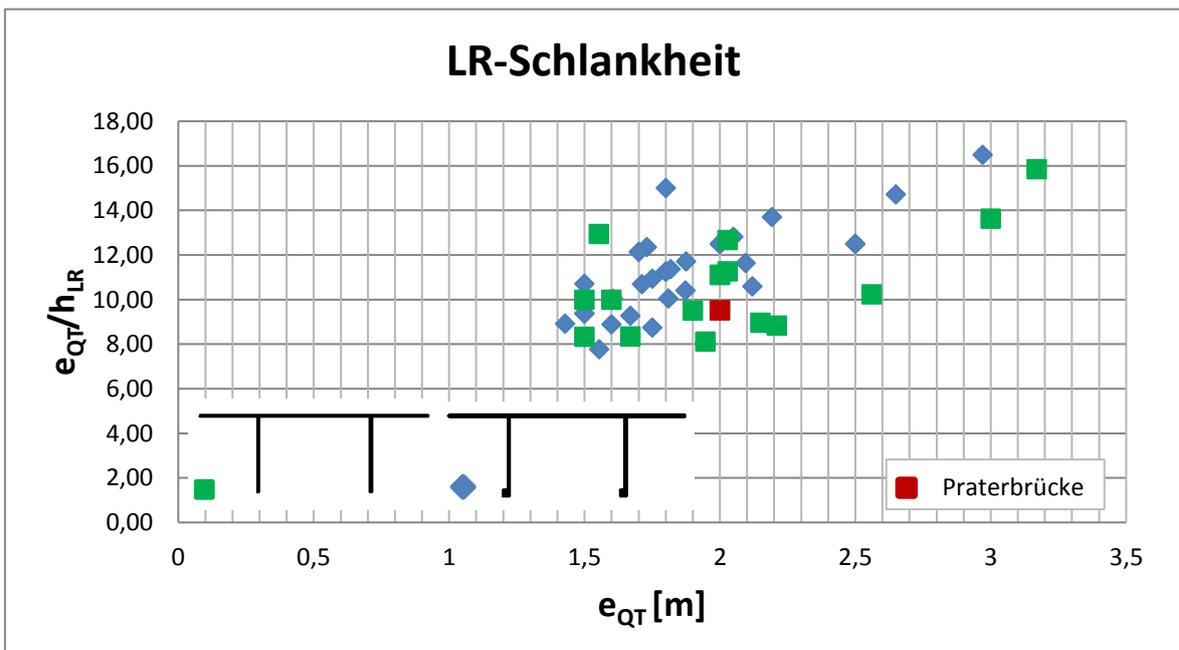


Abbildung 3: orthotrope Platten mit I-Rippen und Wulstrippen – Längsrippenschlankheit e_{QT}/h_{LR} in Abhängigkeit des Querträgerabstandes e_{QT}

Nach derzeitiger Empfehlung der EN 1993-2 soll die Deckblechdicke im Fahrbahnbereich des Schwerverkehrsstreifens $t_{DB} \geq 14 \text{ mm}$ für Belagdicken $\geq 70 \text{ mm}$ bzw. $t_{DB} \geq 16 \text{ mm}$ für Belagdicken $\geq 40 \text{ mm}$ betragen. Für die Deckblechschlankheit im Fahrbereich wird ein Wert von $\frac{e_{LR}}{t_{DB}} \leq 25$ empfohlen. Dies wird auch bei einigen älteren Brücken bereits erfüllt. Für diese Arbeit wurde allerdings bewusst eine Brücke gewählt, bei welcher dieser Wert deutlich überschritten wird, um vor allem ältere Brücken mit abzudecken, deren Deckblechschlankheit den heutigen Vorgaben nicht entspricht (siehe Abbildung 4). Dies ist die Praterbrücke mit einer Deckblechschlankheit von $\frac{e_{LR}}{t_{DB}} = 36$, deren Werte in den Abbildungen 2 bis 5 gekennzeichnet sind.

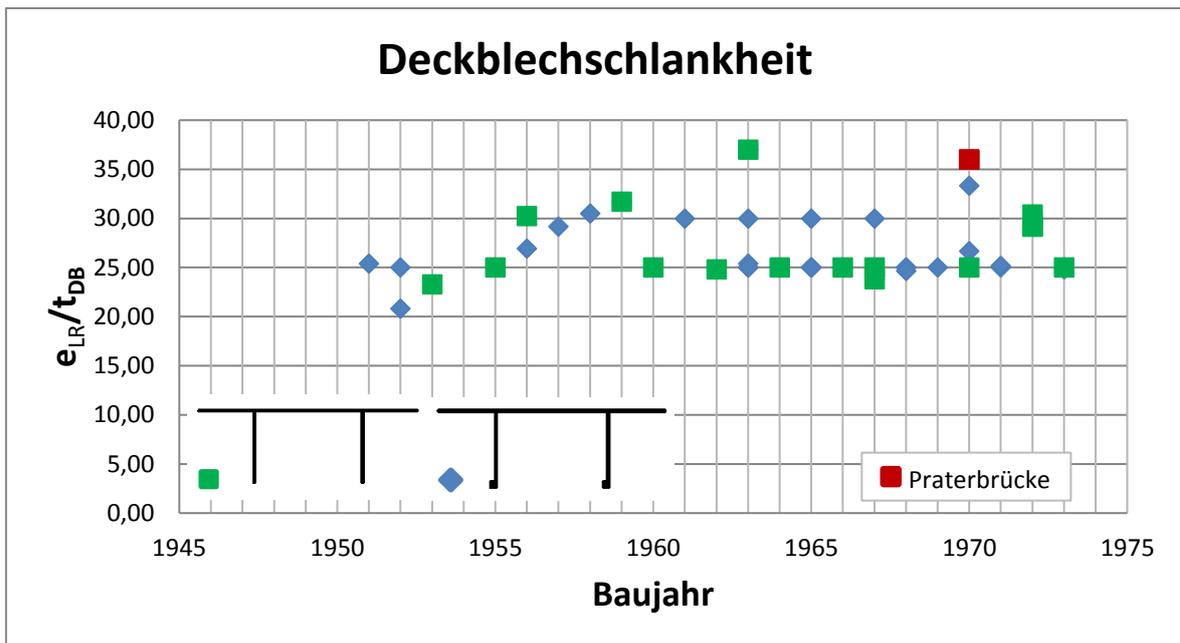


Abbildung 4: orthotrope Platten mit I-Rippen und Wulstrippen – Deckblechschlankheit e_{LR}/t_{DB} in Abhängigkeit des Baujahres

Die Längsrippensteifigkeit $I_{y,LR}$ der betrachteten orthotropen Platten mit offenen Längsrippen wurde nach Abbildung 6 ermittelt und fällt in den Bereich von 500 bis ca. 3500 cm^4 . Interessant ist, dass für gleichbleibende Querträgerabstände verschiedene Steifigkeiten Verwendung fanden (vgl. Abbildung 5). Da sich die orthotropen Plattenbrücken mit Wulstrippen von jenen mit I-Profilrippen in Hinblick auf Querträgerabstand, Deckblechschlankheit und Längsrippensteifigkeit kaum voneinander unterscheiden, wurde hier für die Modellierung nur eine Brücke mit I-Rippen gewählt.

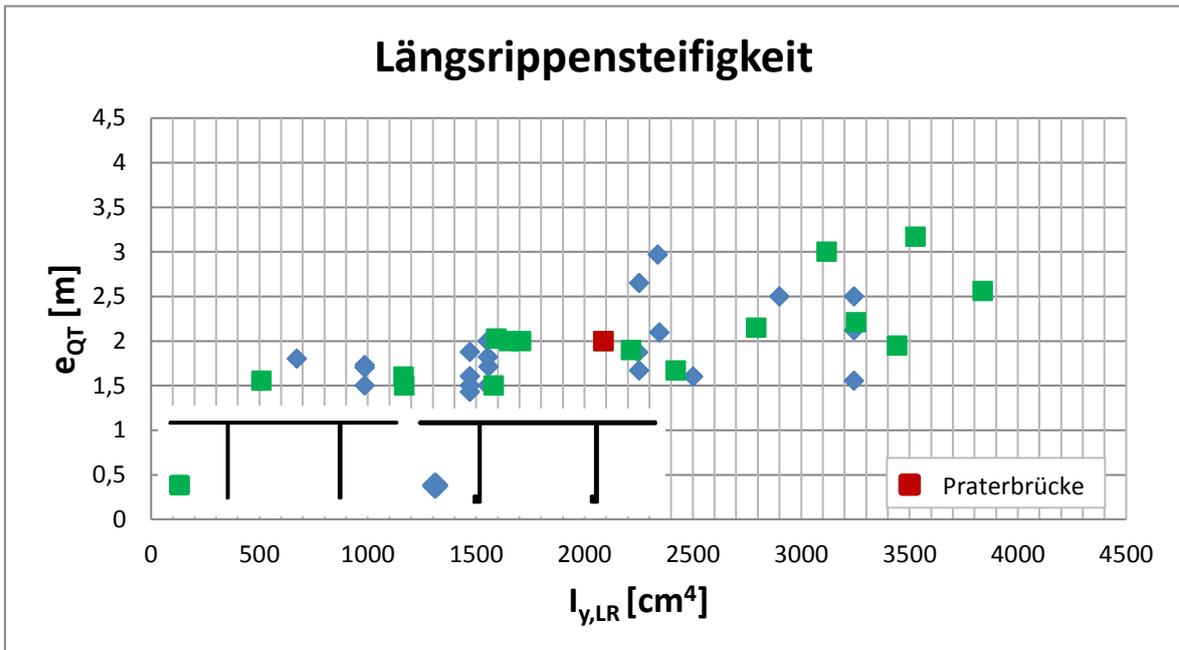


Abbildung 5: orthotrope Platten mit I-Rippen und Wulstrippen – Längsrippensteifigkeit $I_{y,LR}$ in Abhängigkeit des Querträgerabstandes e_{QT}

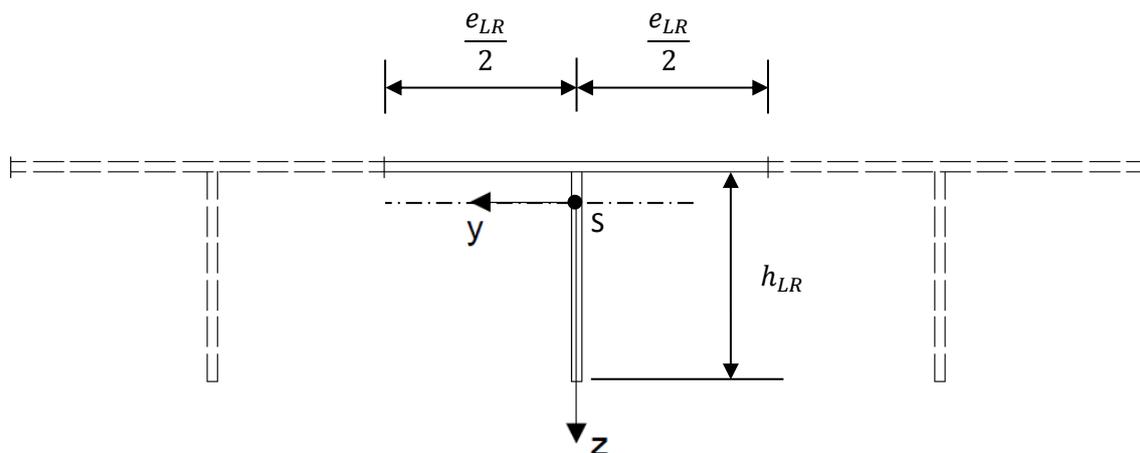


Abbildung 6: Bruttoquerschnitt der Längsrippe zur Berechnung der Längsrippensteifigkeit

1.2 Längsrippen aus Trapezprofilen

Vor 1945 wurde versucht, durch Vergrößerung des Längsrippenabstandes auf bis zu 900 mm die Länge der Schweißnähte zu verringern. Dies erwies sich jedoch aufgrund der hohen Deckblechbiegungen als nicht zielführend. Erst viel später, durch den Einsatz von Hohlprofilen, konnte die Verbindungsnahtanzahl mit dem Deckblech deutlich reduziert werden. [4]

Ab dem Jahr 1962, als von den Hoesch AG-Walzwerken die ersten Hohlsteifen und daraufhin von Krupp mehrere Trapezprofile ins Lieferprogramm aufgenommen wurden, begann der wirtschaftliche Einsatz dieser Hohlprofile. [4]

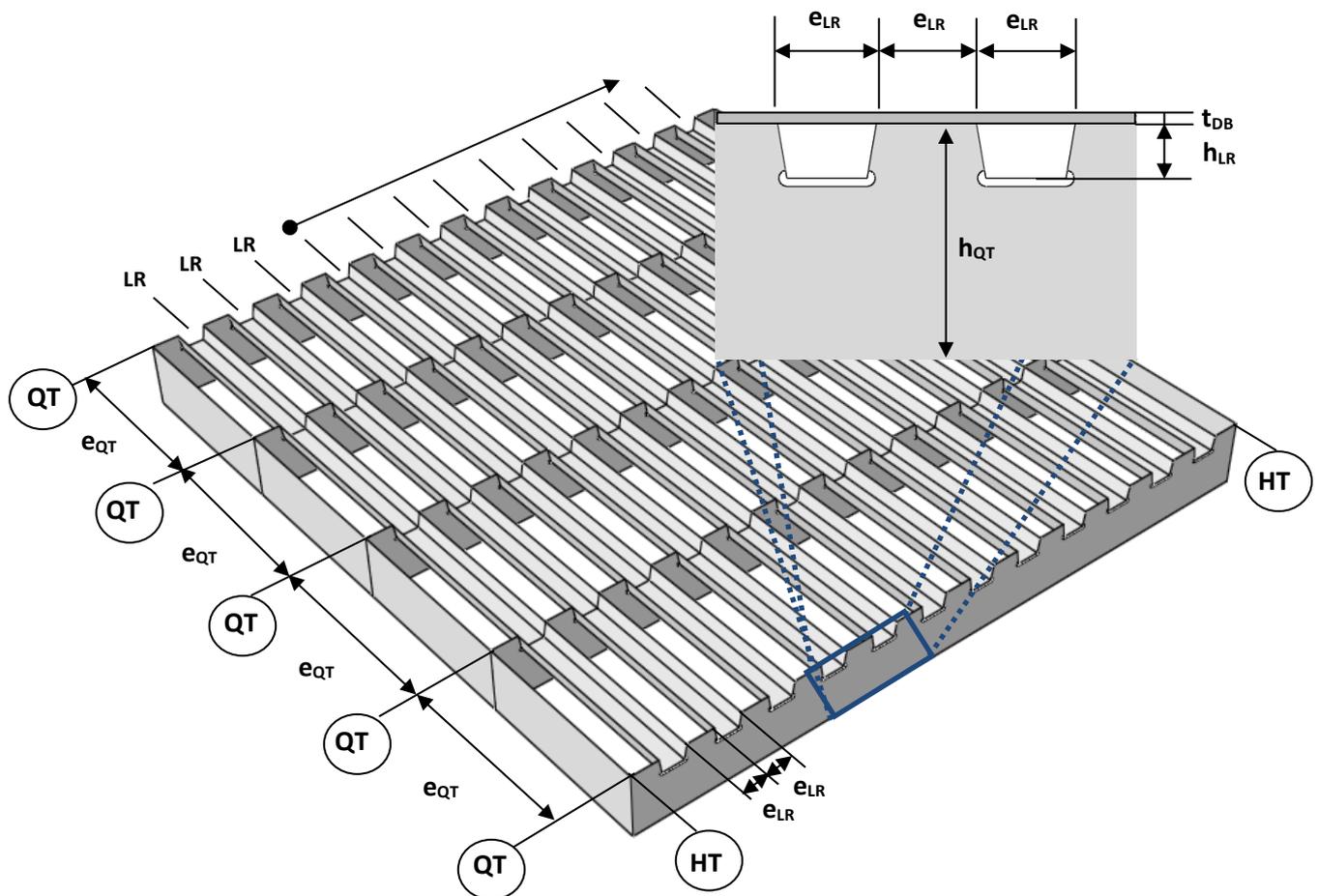


Abbildung 7: orthotrope Platte mit geschlossenen Längsrippen (Deckblech transparent dargestellt) und gewählte Bezeichnungen für die GeometrieKennwerte

Die in den folgenden Diagrammen (Abbildungen 8 bis 11) dargestellten Zusammenhänge beziehen sich auf die Bezeichnungen in Abbildung 7.

Bei den betrachteten orthotropen Platten mit Trapezprofilen ist ein deutlicherer Zusammenhang zwischen Querträgerabstand und Längsrippenhöhe als bei den I- und Wulstprofilrippen, erkennbar. Je größer der Querträgerabstand wird, desto höher wird auch die Längsrippenhöhe (vgl. Abbildung 8). Diese reicht von einer Längsrippenhöhe $h_{LR} = 170 \text{ mm}$ bei einem Querträgerabstand $e_{QT} = 2 \text{ m}$ bis zu einer Längsrippenhöhe über $h_{LR} = 300 \text{ mm}$ und einem Querträgerabstand $e_{QT} = 5 \text{ m}$. Aus diesem Grund wurden aus den orthotropen Platten mit Längsrippen aus Trapezprofilen zwei ausgewählt, welche die verschiedenen Querträgerabstände gut repräsentieren. Dadurch fiel die Auswahl auf die "Stahlhochstraße über den Hauptbahnhof in Ludwigshafen" mit einem Querträgerabstand $e_{QT} = 2 \text{ m}$ und auf die in einem Beispiel aus der Literatur, im DIN-Fachbericht 103, angegebenen orthotropen Platte mit einem Querträgerabstand $e_{QT} = 4 \text{ m}$.

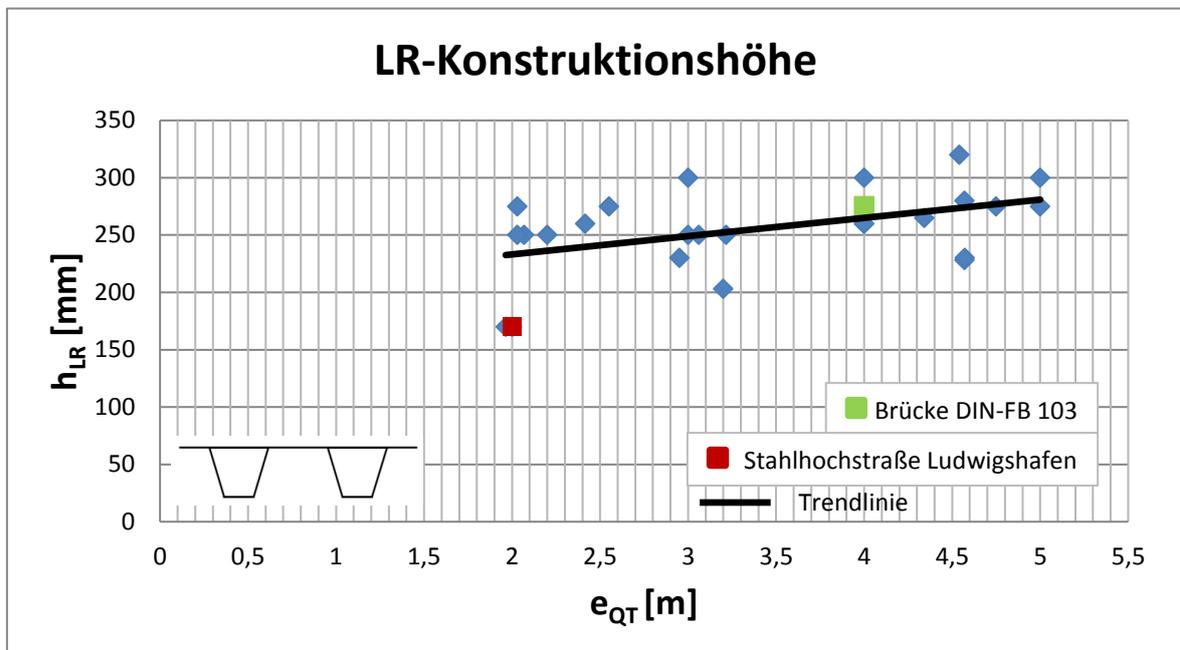


Abbildung 8: orthotrope Platten mit Trapezrippen – Konstruktionshöhe h_{LR} in Abhängigkeit des Querträgerabstandes e_{QT}

Abbildung 9 zeigt die Längsrippenschlankheit bezogen auf den Querträgerabstand.

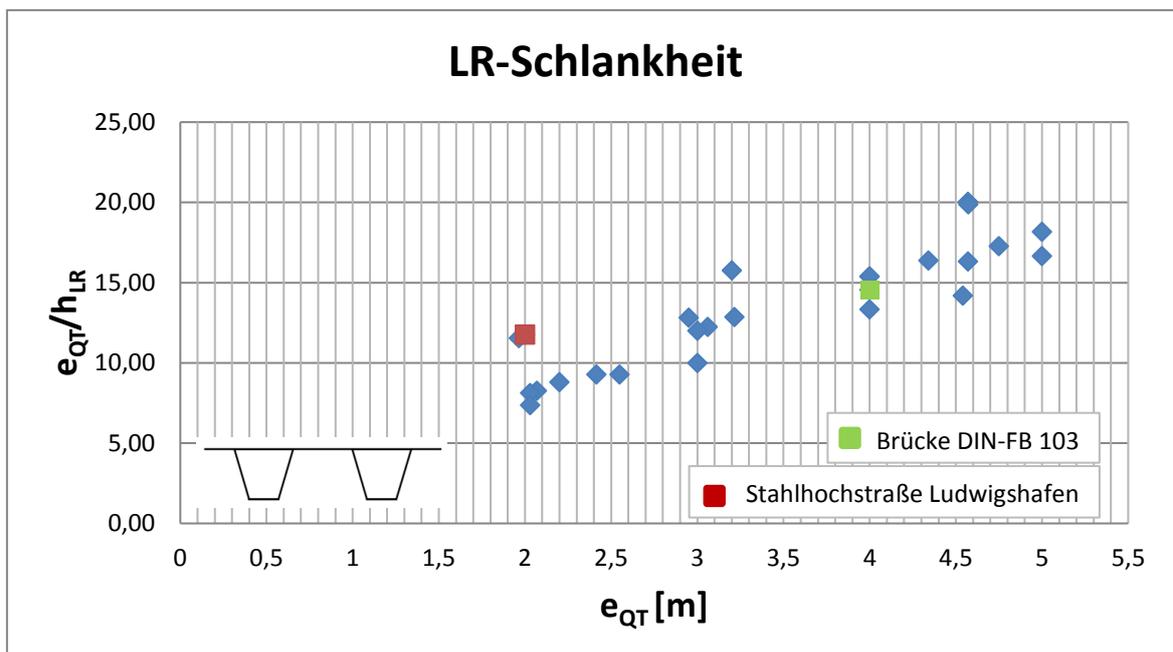


Abbildung 9: orthotrope Platten mit Trapezrippen – Längsrippenschlankheit e_{QT}/h_{LR} in Abhängigkeit des Querträgerabstandes e_{QT}

Die Einhaltung der Deckblechschlankheit mit $\frac{e_{LR}}{t_{DB}} \leq 25$ nach EN 1993-2 wird bei den hier betrachteten orthotropen Platten zum Großteil eingehalten (vgl. Abbildung 10).

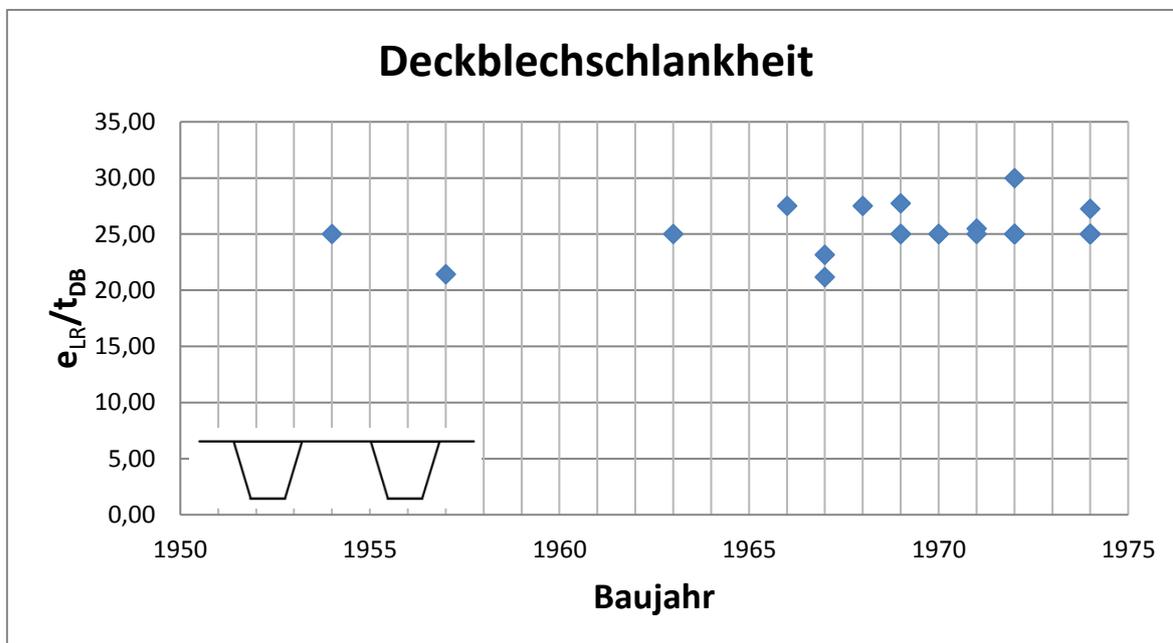


Abbildung 10: orthotrope Platten mit Trapezrippen – Deckblechschlankheit e_{LR}/t_{DB} in Abhängigkeit des Baujahres

Für geschlossene Längsrippen gibt die EN 1993-2 Mindeststeifigkeiten, zur Vermeidung von Rissen im Fahrbahnbelag infolge Durchbiegungsunterschieden benachbarter Längsrippen aus lokalen Verkehrslasten, in Form von zwei Kurven, an. Kurve B für Längsrippen im Bereich des Schwerverkehrsstreifens und einem maximalen Abstand von $L < 1,20 \text{ m}$ zum Hauptträgersteg wurde in nachfolgende Abbildung 11 mit integriert, um zu zeigen ob die betrachteten orthotropen Platten diese Anforderung einhalten.

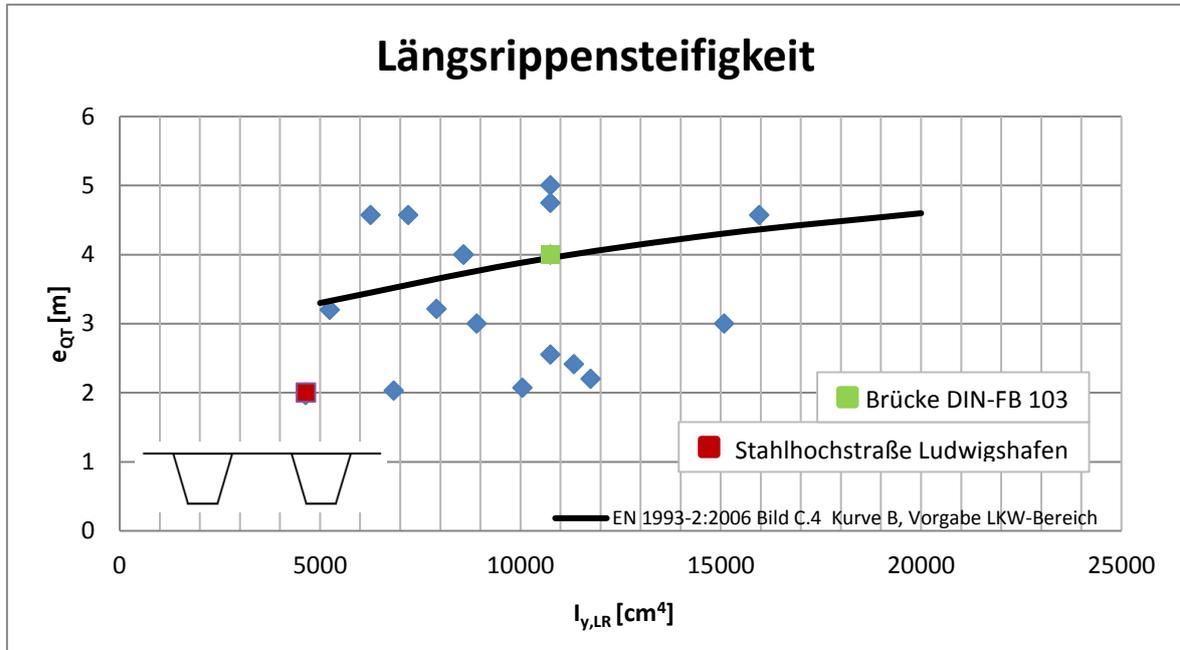


Abbildung 11: orthotrope Platten mit Trapezrippen – Längsrippensteifigkeit $I_{y,LR}$ in Abhängigkeit des Querträgerabstandes e_{QT}

1.3 Festlegung der geometrischen Abmessungen

Aus der Vielzahl an Daten von orthotropen Platten wurden die drei nachfolgend in Tabelle 1 dargestellten Fahrbahndecks für eine Finite-Elemente-Berechnung ausgewählt.

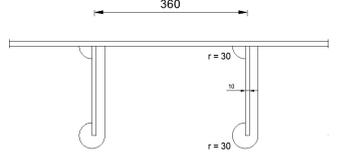
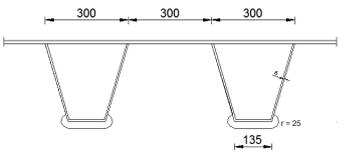
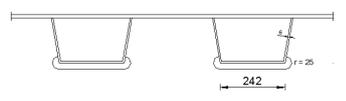
	Baujahr	Fahrbahnquerschnitt	h_{LR} [mm]	e_{QT} [mm]	e_{LR} [mm]	t_{DB} [mm]
Modell A	1970 (siehe [1])		210	2000	360	10
Modell B	- (siehe [2])		275	4000	300	12
Modell C	1969 (siehe [3])		170	2000	300	12

Tabelle 1: Auswahl repräsentativer orthotroper Platten [1][2][3]

2 Ermüdungsnachweis für Straßenbrücken nach Eurocode

Laut EN 1993-2, Abschnitt 9.1.2 (1) sind für alle Bauteile von Straßenbrücken Ermüdungsnachweise zu führen. Diese Arbeit befasst sich vor allem mit Ermüdungsnachweisen der orthotropen Fahrbahnplatte von zwei maßgebenden Detailpunkten (siehe Abbildungen 12 und 13 sowie Anhang A.2.6, B.2.6, C.2.6).

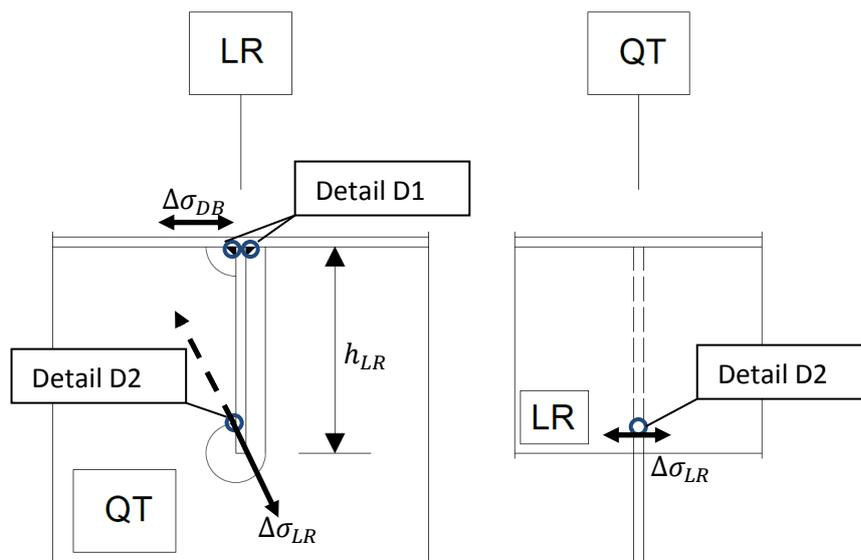


Abbildung 12: Maßgebende Detailpunkte bei orthotropen Platten mit offenen Längsrippen und maßgebender Ermüdungsbeanspruchung

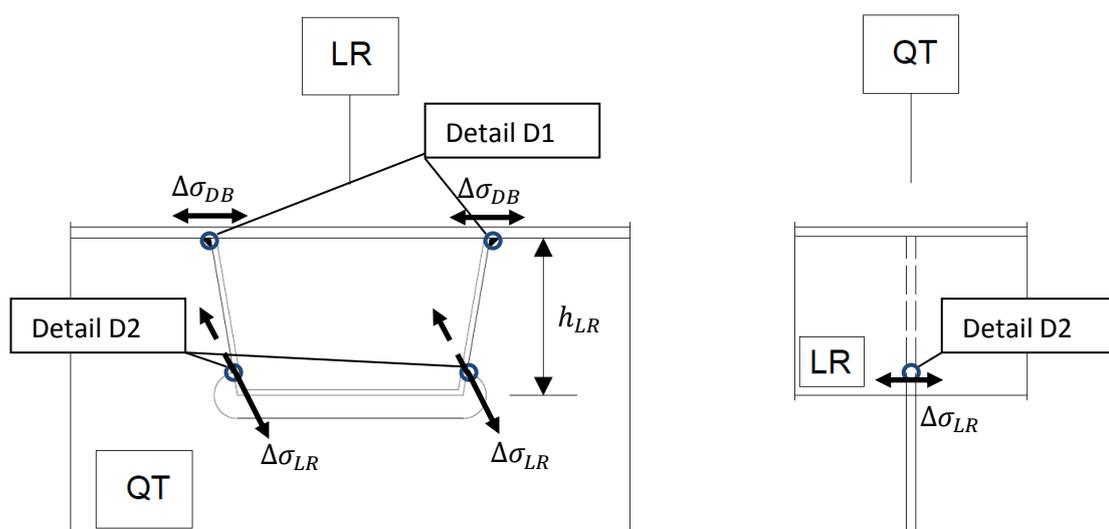


Abbildung 13: Maßgebende Detailpunkte bei orthotropen Platten mit geschlossenen Längsrippen und maßgebender Ermüdungsbeanspruchung

2.1 Ermüdungsnachweis mit Ermüdungslastmodell 3

Die EN 1993-2, Abschnitt 9.2.2 (1) gibt die Möglichkeit, den Ermüdungsnachweis von Straßenbrücken mit dem Ermüdungslastmodell 3 nach EN 1991-2-2 Abschnitt 4.6.4 zu führen. Dieses Lastmodell 3 besteht wie in Abbildung 14 dargestellt aus vier identen Achsen mit je zwei identischen Rädern.

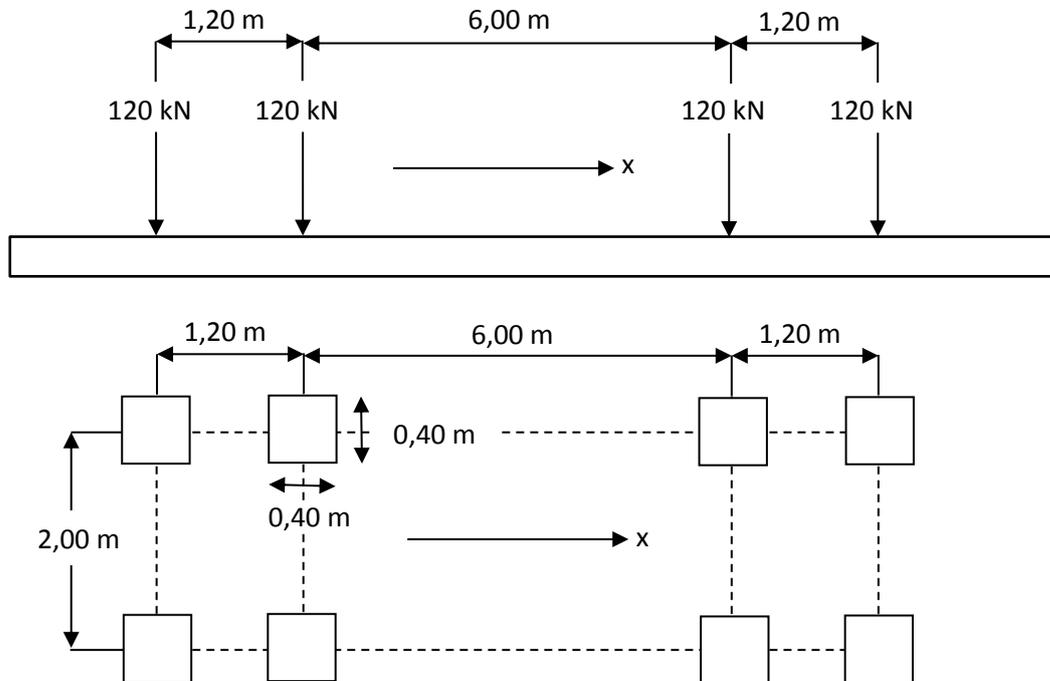


Abbildung 14: Ermüdungslastmodell 3 [9]

Die Achslasten betragen jeweils 120 kN und die Radaufstandsfläche beträgt jeweils $0,4 \times 0,4 \text{ m}^2$. Die Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_p$ aus der Überfahrt dieses Ermüdungslastmodells 3 am Brückentragwerk wird nach EN 1993-2, Abschnitt 9.4.1 (3) mit

$$\Delta\sigma_p = \Delta\sigma_{ELM3} = |\Delta\sigma_{max} - \Delta\sigma_{min}| \quad \{1\}$$

berechnet (siehe Abbildung 15).

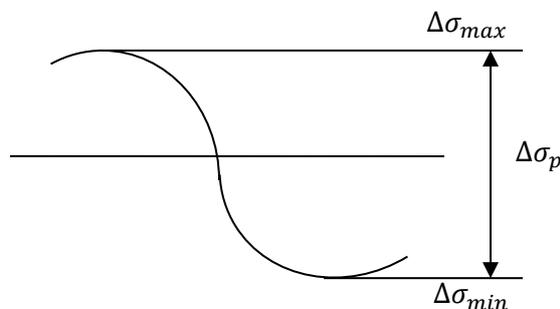


Abbildung 15: Ermittlung der Spannungsschwingbreite aus der Überfahrt von ELM 3

Die Schädigungswirkung des realen Schwerverkehrs wird nun nach EN 1993-2, Abschnitt 9.4.1 (4) durch die schädigungsäquivalente Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{e,2}$ bezogen auf $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel, ausgedrückt

$$\Delta\sigma_{e,2} = \lambda * \phi_2 * \Delta\sigma_{ELM3} \quad \{2\}$$

mit:

λ resultierender Schädigungsäquivalenzfaktor, wobei $\lambda = \lambda_1 * \lambda_2 * \lambda_3 * \lambda_4$
 (Anm.: Die Einzelfaktoren λ_1 bis λ_4 sind in EN 1993-2, Abschnitt 9.5.2 tabelliert bzw. angegeben, worauf nachfolgend noch näher eingegangen wird.)

$\phi_2 = 1$ Schädigungsäquivalenter Schwingbeiwert für Straßenbrücken
 (Anm.: dynamische Wirkung im Lastmodell miteingerechnet)

Der Ermüdungsnachweis ist nun nach EN 1993-2, Abschnitt 9.5.1 (1) wie folgt festgelegt (vgl. Abbildung 16)

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

mit:

γ_{Ff} γ -Faktor (1,0 wird empfohlen) für die schadensäquivalente Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_E$

γ_{Mf} γ -Faktor für die Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c$ (hier vorerst mit 1,0 gewählt, wird projektspezifisch festgelegt {meist $\gamma_{Mf} = 1,15$ })

$\Delta\sigma_{e,2}$ 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

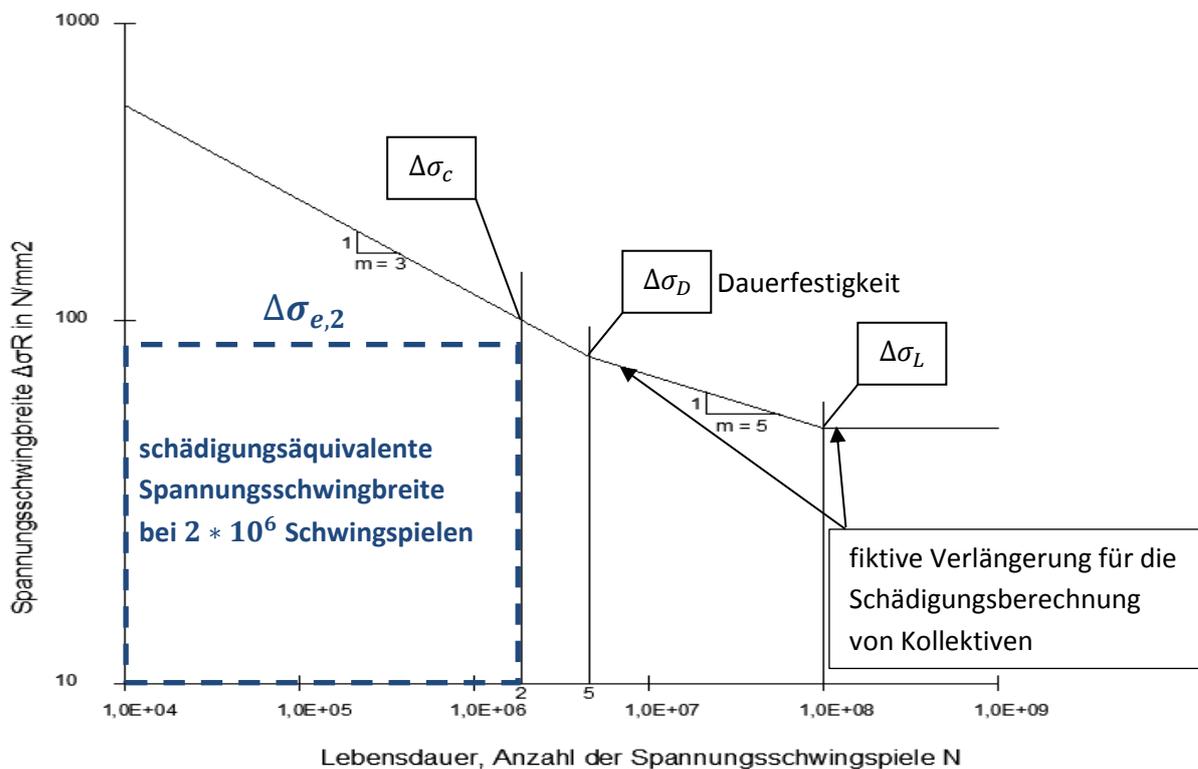


Abbildung 16: Ermüdungsfestigkeitskurven nach EN 1993-1-9, Bild 7.1

2.2 Ermüdungsnachweis mit Ermüdungslastmodell 4

Ein genauerer Ermüdungsnachweis ist nach EN 1991-2-2, Abschnitt 4.6.5 mit dem Ermüdungslastmodell 4, das Tabelle 2 zeigt möglich. Dieses Modell besteht aus fünf Fahrzeugtypen, welche die Beanspruchungen auf typischen europäischen Straßen, abdecken. Die fünf Fahrzeugtypen können der EN 1991-2-2, Abschnitt 4.6.5, Tabelle 4.7 oder Tabelle 2 entnommen werden. Des Weiteren können diese aber auch für ein Einzelprojekt individuell festgelegt werden. Dabei sollte dieses Lastmodell 4 die gleiche Ermüdungsschädigung erzeugen, wie der tatsächlich auftretende Verkehr.

In Tabelle 2 sind die für die Simulationsberechnung verwendeten Schwerfahrzeugtypen aus den Ermüdungslastmodellen 4, sowie dem modifizierten Ermüdungslastmodell 4_mod abgeleitet für den aktuellen Autobahnverkehr in Österreich nach [6], mit den jeweiligen Achslasten dargestellt.

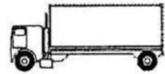
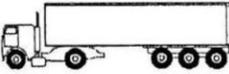
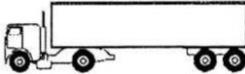
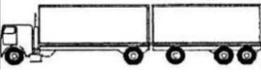
Typ	Schwerfahrzeug	Achsa abstand [m]	Reifen art	Verkehrs anteil [%]	ELM-4_mod		ELM-4	
					Achslast A_i	G_{ges}	Achslast A_i	G_{ges}
T1		4.50	A B	20	49,7 92,3	142	70 130	200
T2		4.20 1.30	A B B	5	61,6 105,7 105,7	273	70 120 120	310
T3		3.20 5.20 1.30 1.30	A B C C C	50	51,4 110,2 66,1 66,1 66,1	360	70 150 90 90 90	490
T4		3.40 6.00 1.80	A B B B	15	52,1 104,1 66,9 66,9	290	70 140 90 90	390
T5		4.80 3.60 4.40 1.30	A B C C C	10	49,9 92,7 64,2 57,1 57,1	321	70 130 90 80 80	450

Tabelle 2: Übersicht Ermüdungslastmodelle 4 und 4_mod (siehe Anhang D.2)

Zur Führung des Ermüdungsnachweises werden nun zunächst die aus der Überfahrt der einzelnen Fahrzeugtypen erzeugten Schwingenspiele mit ihren Spannungsschwingbreiten mithilfe der Reservoir-Zählmethode oder der zu gleichwertigen Ergebnissen führenden Rainflow-Zählmethode (siehe Abbildung 17) ausgezählt und anschließend zu Kollektiven zusammengefasst (absteigende Anordnung der $\Delta\sigma_i$)

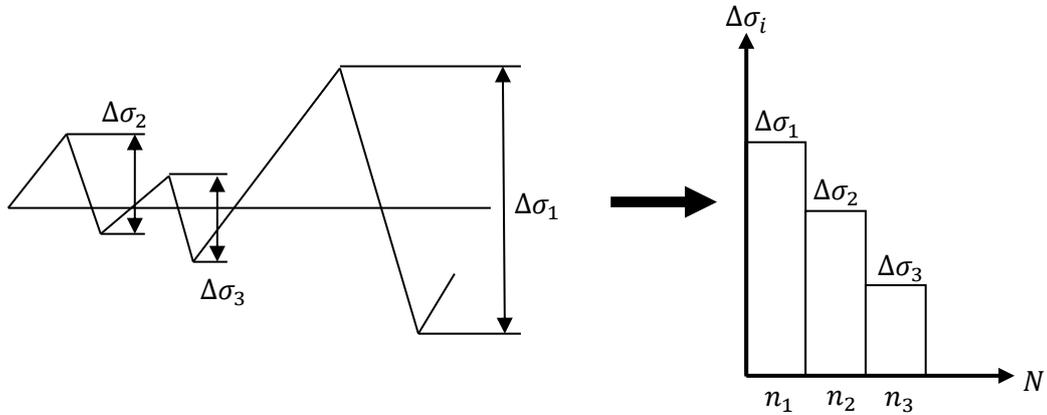


Abbildung 17: Reservoir-Zählmethode lt. EN 1993-1-9, Bild A.1 zur Ermittlung der einzelnen Spannungsspiele welche in Kollektiven zusammengefasst werden

Mithilfe der Verkehrsmischung und den Einzelkollektiven aller fünf Fahrzeugtypen erhält man das Gesamtkollektiv nach Abbildung 18.

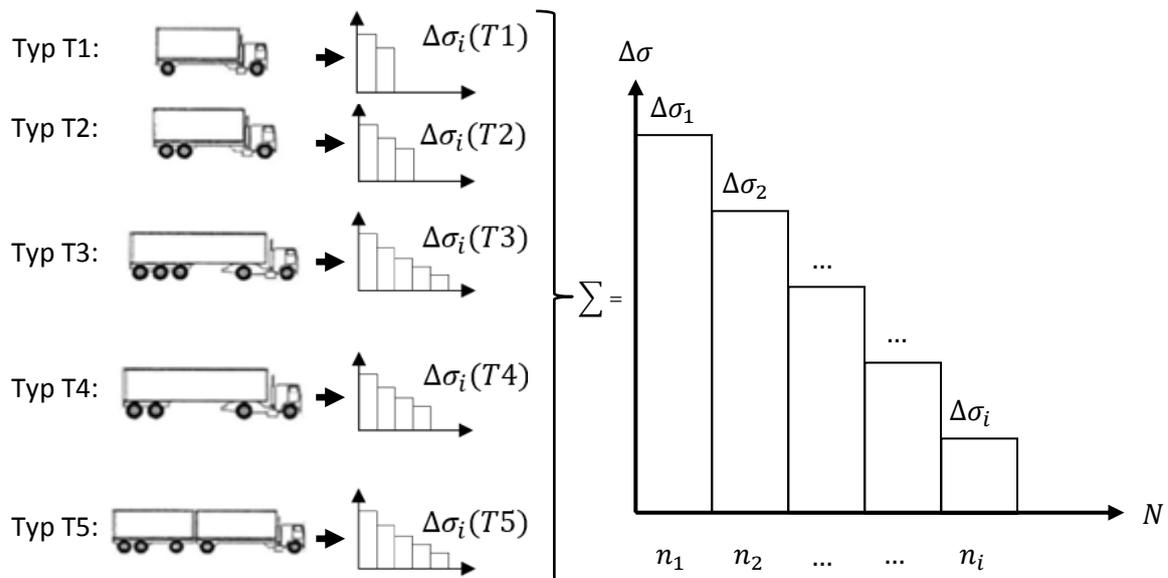
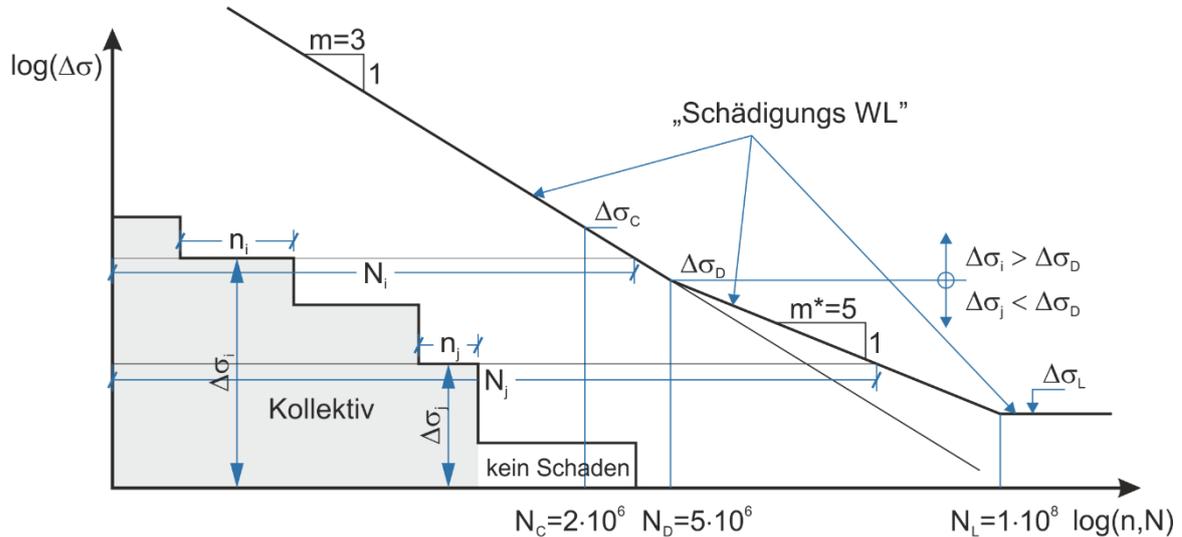


Abbildung 18: Gesamtkollektiv für Lastmodell ELM4 (Spektrum der Spannungsschwingbreiten)

Aus dem so entstehenden Gesamtkollektiv (siehe Abbildung 18; in der EN 1993-1-9 auch Spektrum genannt) kann nun durch Umrechnung die schadensäquivalente Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{e,simu}$ als Einstufenkollektiv bezogen auf n_{LKW} bestimmt werden (siehe Abbildung 19).

a) Spannungskollektiv



b) Schadensäquivalentes Einstufenkollektiv (EK)

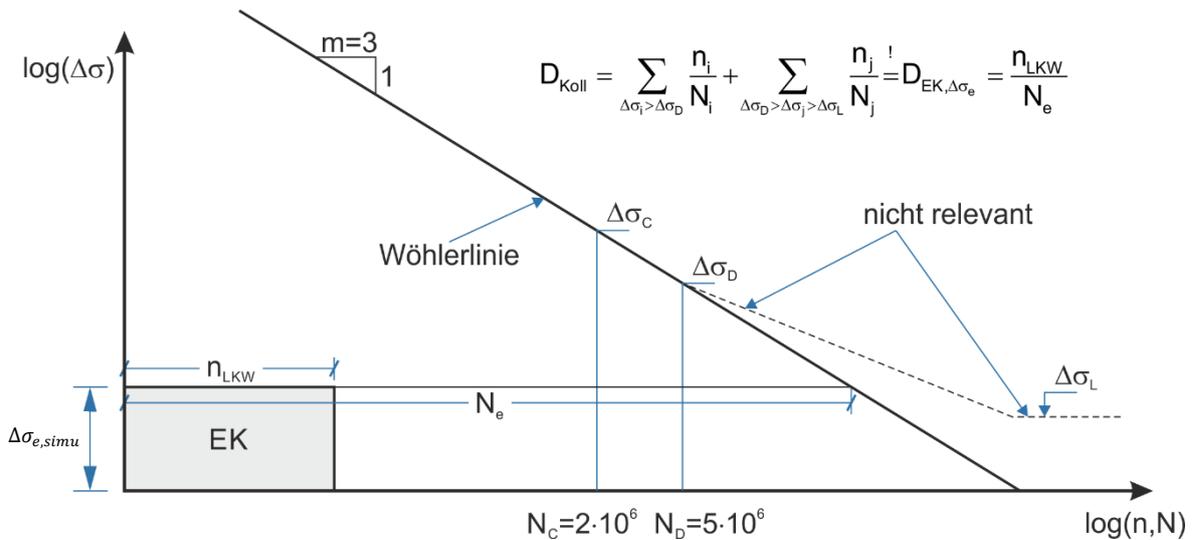


Abbildung 19: Vorgehensweise zur Ermittlung schadensäquivalenter Einstufenkollektive $\Delta\sigma_e$ nach EN 1993-1-9

Zur Herleitung des schadungsäquivalenten Einstufenkollektivs wurden zusätzlich zu den Formeln aus Abbildung 19 folgende Formeln aus der EN 1993-1-9 7.1 (3) verwendet:

$$\text{für } \Delta\sigma_i > \Delta\sigma_D \quad \Delta\sigma_i^3 N_i = \Delta\sigma_D^3 5 \cdot 10^6 \quad \{4\}$$

$$\text{für } \Delta\sigma_D > \Delta\sigma_j > \Delta\sigma_L \quad \Delta\sigma_j^5 N_j = \Delta\sigma_D^5 5 \cdot 10^6 \quad \{5\}$$

$n_{i,j}$ Anzahl der einwirkenden Spannungsschwingspiele

$N_{i,j}$ Lebensdauer als Anzahl der Schwingspiele, bezogen auf die Bemessungs-Wöhlerlinie (WL)

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

$$\Delta\sigma_{e,simu} = \sqrt[3]{\left(\sum_{\Delta\sigma_i > \Delta\sigma_D} \Delta\sigma_i^3 * n_i + \frac{1}{\Delta\sigma_D^2} \sum_{\Delta\sigma_D > \Delta\sigma_j > \Delta\sigma_L} \Delta\sigma_j^5 * n_j\right) * \frac{1}{n_{LKW}}} \quad \{6\}$$

$\Delta\sigma_{e,simu}$ Schadensäquivalentes Einstufenkollektiv aus Simulationsberechnung bezogen auf n_{LKW}
 n_{LKW} Anzahl der bezogenen Lastwechsel

Mit einem hier für die weitere Berechnung angenommenen Bezug auf $n_{LKW} = 100$ Lastwechsel (Anm.: Gesamtkollektivberechnung mit Ermüdungslastmodellen ELM 4 bzw. ELM 4_mod für insgesamt 100 Fahrzeuge) ergibt sich Formel {6} zu

$$\Delta\sigma_{e,simu} = \sqrt[3]{\left(\sum_{\Delta\sigma_i > \Delta\sigma_D} \Delta\sigma_i^3 * n_i + \frac{1}{\Delta\sigma_D^2} \sum_{\Delta\sigma_D > \Delta\sigma_j > \Delta\sigma_L} \Delta\sigma_j^5 * n_j\right) * \frac{1}{100}} \quad \{7\}$$

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

Danach erfolgt die Umrechnung der schädigungsäquivalenten Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{e,simu}$ von 100 auf $2 * 10^6$ Lastwechsel für einen Bezugszeitraum von 100 Jahren.

$$\Delta\sigma_{e,2,simu} = \Delta\sigma_{e,simu} * \left(\frac{N_{ges}}{2 * 10^6}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \{8\}$$

$$N_{ges} = 100 * f_{Anzahl} \quad \{9\}$$

$$f_{Anzahl} = \frac{N_{Obs} * 100}{100} = N_{Obs} \quad \{10\}$$

$\Delta\sigma_{e,2,simu}$ Schadensäquivalentes Einstufenkollektiv aus der Simulationsberechnung bezogen auf $2 * 10^6$ Lastwechsel
 N_{ges} Gesamtanzahl der Fahrzeuge im Bezugszeitraum
 N_{Obs} Anzahl erwarteter Lastkraftwagen je Jahr für einen LKW-Fahrstreifen

Der Ermüdungsnachweis kann nun analog zu Formel {3} mit

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

geführt werden.

3 Betriebsfaktoren für das Ermüdungslastmodell 3

Nach EN 1993-2, Abschnitt 9.5.2 besteht der Schadensäquivalenzfaktor λ für Straßenbrücken von 10 m bis zu 80 m Spannweite aus folgenden Einzelfaktoren:

$$\lambda = \lambda_1 * \lambda_2 * \lambda_3 * \lambda_4 \quad \{11\}$$

Für die folgenden Berechnungen dieser Betriebsfaktoren wird von einer 100-jährigen Nutzungsdauer ausgegangen ($\lambda_3 = 1,0$). Des Weiteren kann der Spureinfluss von benachbarten Fahrstreifen für die untersuchten Details von orthotropen Platten vernachlässigt werden, da Lasten am Nebenfahrstreifen keinen nennenswerten Einfluss auf die Spannungen der Detailpunkte im betrachteten Fahrstreifen haben ($\lambda_4 = 1,0$).

3.1 Beiwert λ_1

Der Beiwert λ_1 berücksichtigt den Typ der Einflusslinie (Stütz-, Feldmoment) und die Spannweite. Dieser Faktor stellt den eigentlichen Schadensäquivalenzfaktor dar. Die EN 1993-2 gibt in Abschnitt 9.5.2, Bild 9.5 die Beiwerte λ_1 in Abhängigkeit der Spannweite L für Stütz- und Feldbereich an. Diese gelten für Biegemomente bei Hauptträgern von Straßenbrücken (siehe Abbildung 20).

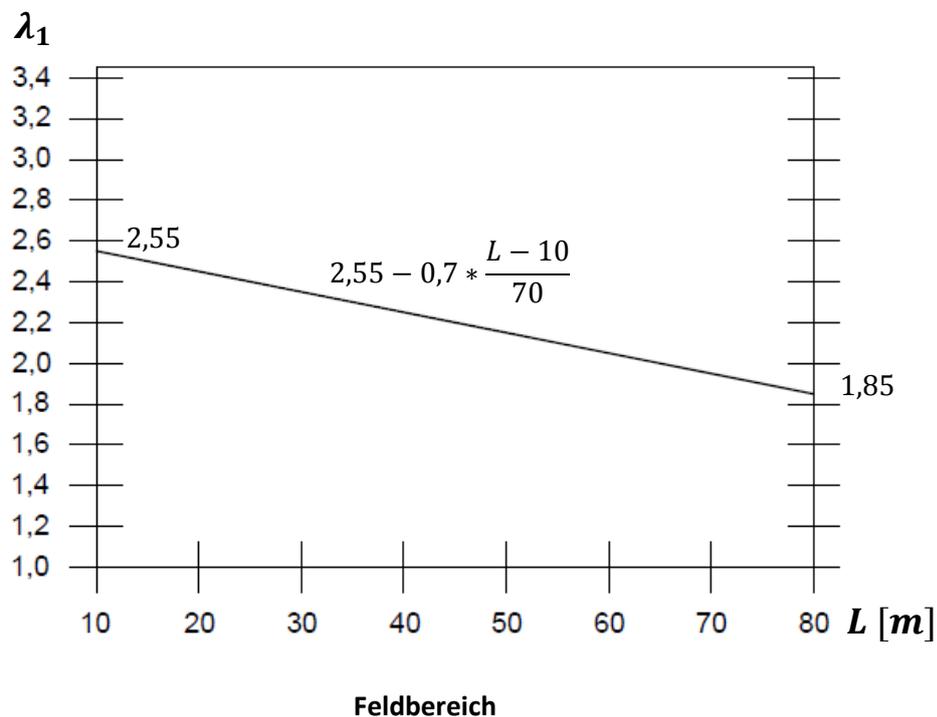


Abbildung 20: Beiwerte λ_1 nach EN 1993-2, Bild 9.5

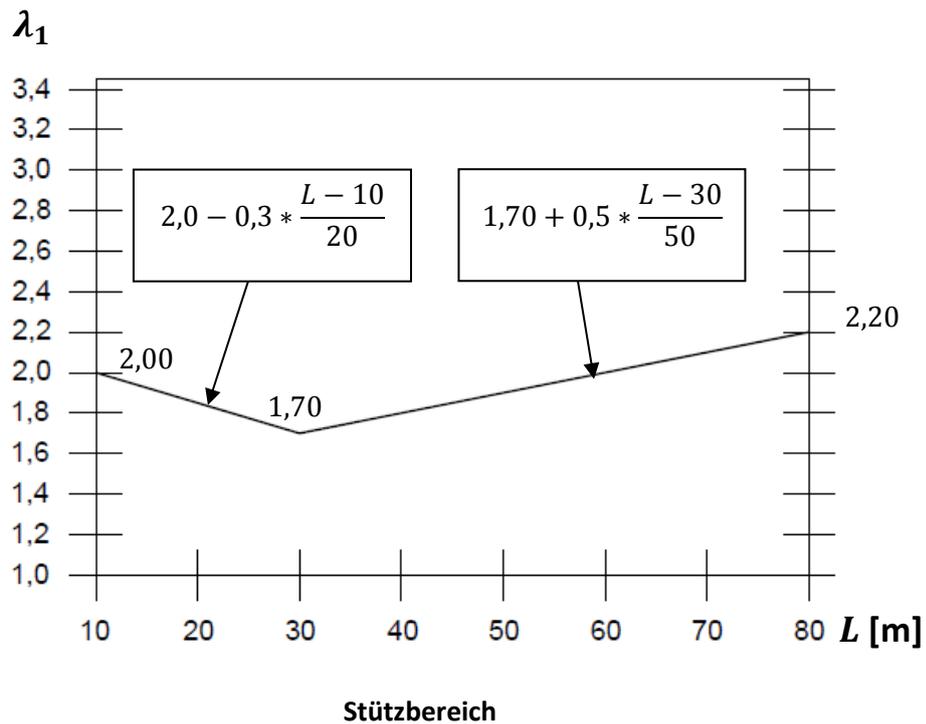


Abbildung 21: Beiwerte λ_1 nach EN 1993-2, Bild 9.5

Allerdings sind hier nur λ_1 -Werte für Spannweiten zwischen $10 \leq L \leq 80$ m angegeben. Um nun Werte für λ_1 unter 10 m Spannweite zu erhalten, kann man sich mit dem Hintergrunddokument zum Eurocode, dem DIN Fachbericht 103 [2], behelfen. Hier sind auch Werte für unter 10 m Spannweite ablesbar, wie in den Abbildungen 22 und 23 dargestellt.

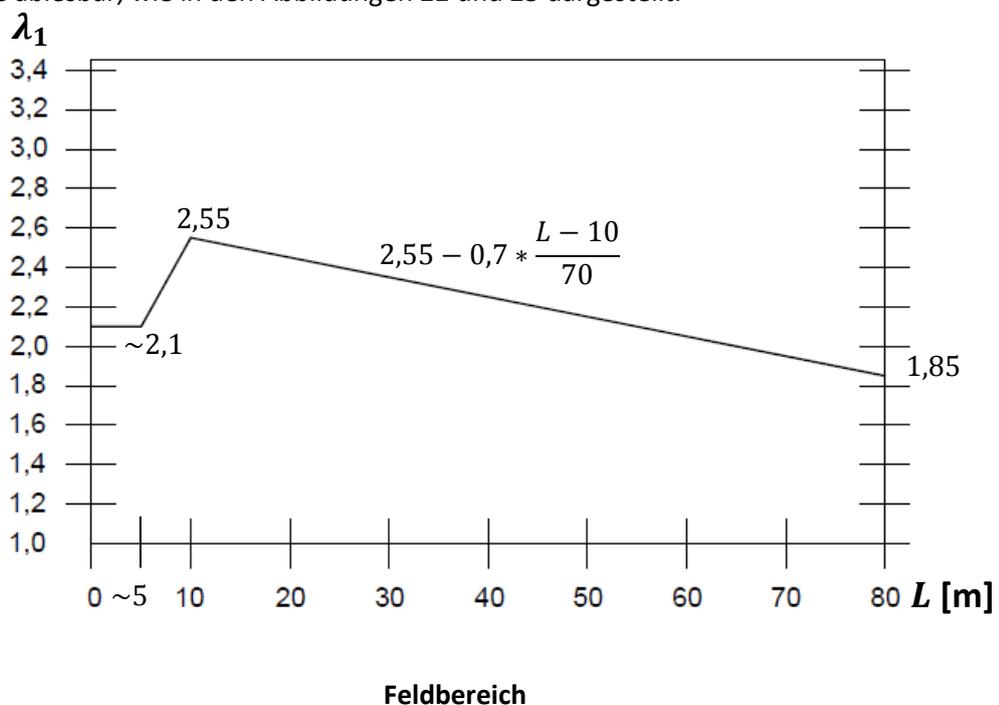


Abbildung 22: Beiwerte λ_1 nach [2] (Anm.: für die empfohlenen Verläufe sind die entsprechenden Gleichungen zusätzlich eingetragen)

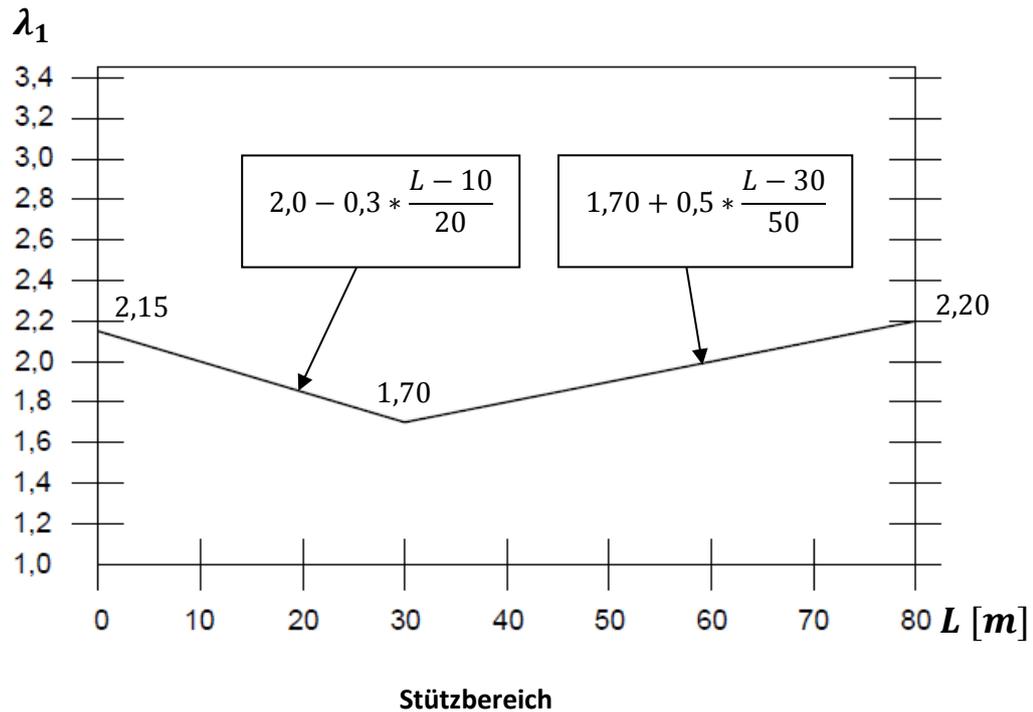


Abbildung 23: Beiwerte λ_1 nach [2] (Anm.: für die empfohlenen Verläufe sind die entsprechenden Gleichungen zusätzlich eingetragen)

Allerdings zeigten Untersuchungen, dass diese λ_1 -Faktoren keine zutreffenden Ergebnisse für die Anwendung auf die untersuchten Details von orthotropen Platten liefern. Die Restlebensdauer bezüglich Detailpunkt D2 (siehe Abschnitt 4.1.2) wurde an einem orthotropen Fahrbahndeck, einerseits mit Ermüdungslastmodell 4 und andererseits mit Ermüdungslastmodell 3 unter Verwendung der λ_1 Faktoren lt. DIN-Fachbericht 103, ermittelt. Dabei konnte festgestellt werden, dass mit Ermüdungslastmodell 3 eine höhere rechnerische Restlebensdauer erhalten wird als mit Ermüdungslastmodell 4, was nicht im Sinne einer konservativen Nachweisführung unter Verwendung eines vereinfachten Lastmodells ist.

Aus diesem Grund wurden in dieser Arbeit umfangreiche Berechnungen durchgeführt, um zutreffende Angaben für den Faktor λ_1 zu machen.

3.2 Verkehrsstärkenbeiwert λ_2

Der Verkehrsstärkenbeiwert berücksichtigt vom Verkehrslastmodell für die Ermittlung von λ_1 abweichende Belastungsverhältnisse. Er wird in der Regel durch die Fahrzeuggesamtgewichte und die Gesamtanzahl an Fahrzeugen ermittelt.

$$\lambda_2 = \frac{Q_{m1}}{Q_0} * \left(\frac{N_{Obs}}{N_0} \right)^{\frac{1}{5}} \quad \{12\}$$

mit

Q_{m1}	mittleres schadensäquivalentes Gesamtgewicht in kN der Schwerfahrzeuge auf dem Schwerverkehrsstreifen
$Q_0 = 480kN$	Bezugswert lt. EN 1993-2 (Gesamtgewicht für ELM3)
$N_0 = 0,5 * 10^6$	Bezugswert lt. EN 1993-2
N_{Obs}	erwartete Anzahl an Schwerfahrzeugen je Jahr im Schwerverkehrsstreifen
Q_i	Fahrzeuggesamtgewicht in kN
\bar{n}_i	Anteil des einzelnen Fahrzeuges am Gesamtverkehr $\bar{n}_i = \frac{n_i}{n_{ges}}$

Zur weiteren Berechnung wurde für λ_2 bei einer ausgehenden Nutzungsdauer von 100 Jahren und einer erwarteten Fahrzeuganzahl $N_{Obs} = 1 * 10^6$ je Jahr mit Formel {12} für ELM 4 und ELM 4_mod aus Tabelle 2 folgende Werte ermittelt.

- **Berechnung λ_2 für Lastmodell 4:**

Gesamtgewichte und Achslasten der Fahrzeugtypen lt. Tabelle 2 Die Verkehrsmischung lt. EN 1991-2 entspricht Strecken mit großen Entfernungen.

$$Q_{m1} = \left(\sum Q_i^5 * \bar{n}_i \right)^{\frac{1}{5}} = (200^5 * 0,2 + 310^5 * 0,05 + 490^5 * 0,5 + 390^5 * 0,15 + 450^5 * 0,10)^{\frac{1}{5}}$$

$$Q_{m1} = 445,40 \text{ kN}$$

$$\lambda_{2,ELM4} = \frac{Q_{m1}}{Q_0} * \left(\frac{N_{Obs}}{N_0} \right)^{\frac{1}{5}} = \frac{445,40kN}{480kN} * \left(\frac{1 * 10^6}{0,5 * 10^6} \right)^{\frac{1}{5}} = 1,066$$

- **Berechnung λ_2 für Lastmodell 4_mod:**

Gesamtgewichte und Achslasten der Fahrzeugtypen sind angepasst an "Weigh in Motion" Messungen auf einer österreichischen Autobahnstraßenbrücke in der jüngsten Vergangenheit [6]. (vgl. Tabelle 2)

$$Q_{m1} = \left(\sum Q_i^5 * \bar{n}_i \right)^{\frac{1}{5}} = (142^5 * 0,2 + 273^5 * 0,05 + 360^5 * 0,5 + 290^5 * 0,15 + 321^5 * 0,10)^{\frac{1}{5}}$$

$$Q_{m1} = 327,35 \text{ kN}$$

$$\lambda_{2,ELM4_mod} = \frac{Q_{m1}}{Q_0} * \left(\frac{N_{Obs}}{N_0} \right)^{\frac{1}{5}} = \frac{327,35kN}{480kN} * \left(\frac{1*10^6}{0,5*10^6} \right)^{\frac{1}{5}} = 0,783$$

3.3 Nutzungsdauerbeiwert λ_3

Der Nutzungsdauerbeiwert ergibt sich nach EN 1993-2 für eine betrachtete Nutzungsdauer von 100 Jahren zu

$$\lambda_3 = \left(\frac{t_{Ld}}{100}\right)^{\frac{1}{5}} = \left(\frac{100}{100}\right)^{\frac{1}{5}} = \mathbf{1,00} \quad \{13\}$$

t_{Ld} Bemessungswert der Nutzungsdauer der Brücke in Jahren

3.4 Fahrstreifenbeiwert λ_4

Der Fahrstreifenbeiwert errechnet sich nach EN 1993-2 durch

$$\lambda_4 = \left[1 + \frac{N_2}{N_1} \left(\frac{\eta_2 Q_{m2}}{\eta_1 Q_{m1}} \right)^5 + \frac{N_3}{N_1} \left(\frac{\eta_3 Q_{m3}}{\eta_1 Q_{m1}} \right)^5 + \frac{N_k}{N_1} \left(\frac{\eta_k Q_{mk}}{\eta_1 Q_{m1}} \right)^5 \right]^{\frac{1}{5}} \quad \{14\}$$

k Anzahl der Schwerverkehrsstreifen

N_j Anzahl der Schwerlastfahrzeuge je Jahr für den Fahrstreifen j

Q_{mj} durchschnittliches schadensäquivalentes Gesamtgewicht der Schwerlastfahrzeuge im Fahrstreifen j

η_j Wert der Einflusslinie in der Mitte des Fahrstreifens j für die Schnittgröße, die die Spannungsschwingbreite erzeugt.

Hier ergibt sich der Beiwert zu $\lambda_4 = \mathbf{1,00}$, da der Spureinfluss aus Nebenfahrstreifen vernachlässigt werden kann.

4 Berechnung von λ_1 für beliebige Verkehrsmischungen

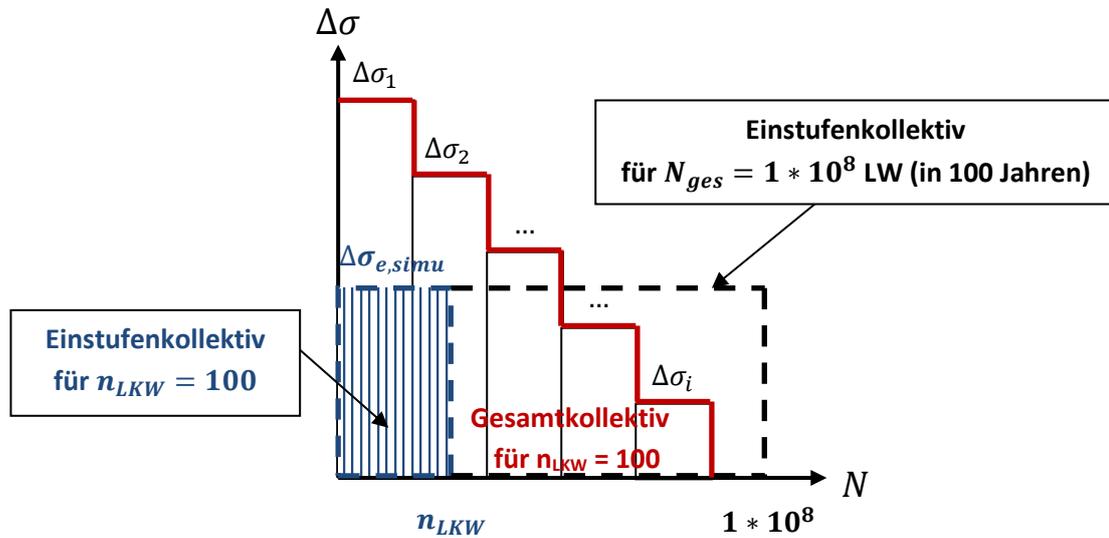


Abbildung 24: Einstufenkollektiv-Streckung der Lastspiele auf $1 \cdot 10^8$ bei 100 Jahren

Bei einer angenommenen Nutzungsdauer von 100 Jahren und einer erwarteten Fahrzeuganzahl $N_{Obs} = 1 \cdot 10^6$ /Jahr ergibt sich die Gesamtanzahl der Fahrzeuge für 100 Jahre mit Formel {9} zu

$$N_{ges} = 1 \cdot 10^6 \cdot 100 = 1 \cdot 10^8$$

Somit muss für einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren für die Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{e,simu}$ die Anzahl der Lastwechsel von $n_{LKW} = 100$ auf $1 \cdot 10^8$ erhöht werden (siehe Abbildung 24). Die Höhe der Schwingbreite ändert sich dabei nicht. Mit diesen Angaben lässt sich nun λ_1 , wie in Tabelle 3 dargestellt, bestimmen.

Ermüdungsnachweis für eine beliebige Schwerverkehrsmischung (zB ELM4/4_mod)	Vereinfachter Ermüdungsnachweis nach EN 1993-2 (ELM 3)
Aus Formel {3}: $\Delta\sigma_{e,2,simu} \leq \Delta\sigma_c$ mit: $\Delta\sigma_{e,2,simu} = \Delta\sigma_{e,simu} * \left(\frac{1 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^6}\right)^{\frac{1}{3}}$ aus Formel {8}	Aus Formel {3}: $\Delta\sigma_{ELM3} * \lambda \leq \Delta\sigma_c$ mit: $\lambda = \lambda_1 * \lambda_2 * \lambda_3 * \lambda_4 = \lambda_1 * \lambda_2 * 1 * 1$ aus Formel {11}
Zusammenführen beider Nachweise	
$\Delta\sigma_{e,2,simu} \cong \Delta\sigma_{ELM3} * \lambda_1 * \lambda_2$ $\lambda_1 = \frac{\Delta\sigma_{e,2,simu}}{\Delta\sigma_{ELM3}} * \frac{1}{\lambda_2} \quad \{15\}$	

Tabelle 3: Herleitung von λ_1

$\Delta\sigma_{e,simu}$	äquivalente Spannungsschwingbreite aus der Schwerverkehrsimulation für die Verkehrsmischung mit $n_{LKW} = 100$ bzw. $1 \cdot 10^8$ LKW-Überfahrten (Spannungsschwingspielen)
$\Delta\sigma_{e,2,simu}$	Spannungsschwingbreite aus der Schwerverkehrsimulation bei $N = 2 \cdot 10^6$ Spannungsschwingspielen
$\Delta\sigma_{ELM3}$	Spannungsschwingbreite aus dem Ermüdungslastmodell 3
λ	Schadensäquivalenzfaktor

Aus Formel {15} und den Simulationsergebnissen der einzelnen FEM-Modelle aus Anhang A,B,C wurden nun die Beiwerte λ_1 ermittelt.

Den im Anhang ermittelten Lastkollektiven liegt eine Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 100 \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$ zu Grunde. Um nun eine höhere oder niedrigere Ermüdungsfestigkeit auch mit abzubilden, wurden ausgehend vom betrachteten Lastkollektiv die einzelnen Kollektivteile entsprechend erhöht oder verringert. Es wurde somit die Beanspruchung erhöht und die Festigkeit auf gleichem Niveau belassen, dies führt zum selben Ergebnis wie die Variation der Festigkeit bei gleicher Belastung. Des Weiteren wurde auch das Kollektiv aus dem Ermüdungslastmodell 3 analog erhöht bzw. verringert. Dies deshalb, da bei Voraussetzung desselben Ausnutzungsgrades im Ermüdungsnachweis geänderte Ermüdungsfestigkeitskurven auch das Beanspruchungsniveau infolge ELM 3 ändern. Aus den daraus erhöhten bzw. verringerten Lastkollektiven wurde wieder das schädigungsäquivalente Einstufenkollektiv ermittelt und mit diesem λ_1 . Abbildung 25 zeigt schematisch das aus der Simulation gewonnene Lastkollektiv aus dem Ermüdungslastmodell (ELM) unter der Ermüdungsfestigkeitskurve (Wöhlerlinie) sowie angedeutet die erhöhten bzw. verringerten Lastkollektive (+20 %, +50 %).

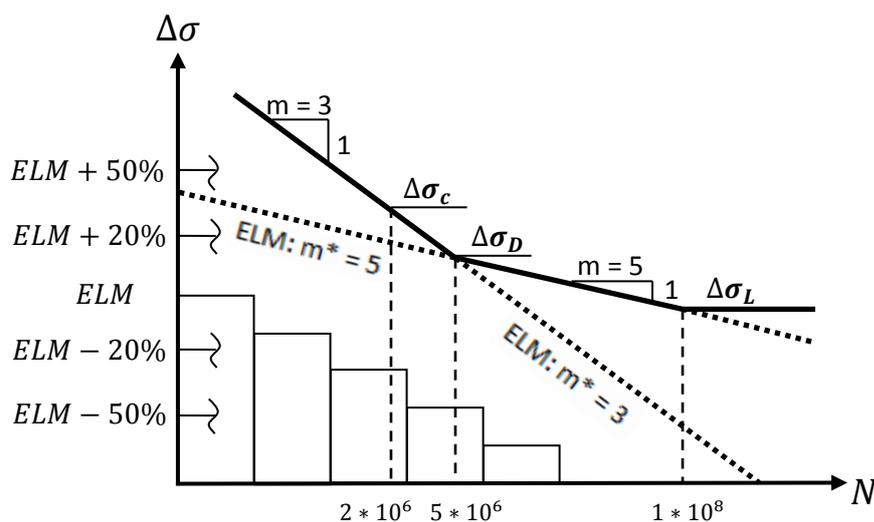


Abbildung 25: Erläuterung zur Variation der Berechnung von λ_1

Des Weiteren wurde einmal für das Ausgangskollektiv eine vollschädigende Wirkung aller Kollektivteile (Wöhlerlinienneigung $m^*=3$) und einmal eine nur teilschädigende Wirkung aller Kollektivteile (Wöhlerlinienneigung $m^*=5$) angenommen. Wobei das daraus ermittelte Einstufenkollektiv, bei vollschädigender Wirkung aller Kollektivteile, einen oberen Grenzwert der

Schädigung der jeweiligen Lastkollektive darstellt. Somit ist auch der daraus abgeleitete λ_1 -Wert ein oberer Grenzwert.

Um das durch die Erhöhung der Lastkollektive veränderte Verhältnis zur Ermüdungsfestigkeit darzustellen, dient der Lastfaktor f_{Last} .

$$f_{Last} = \Delta\sigma_{ELM3}/\Delta\sigma_c \quad \{16\}$$

Im folgenden Abschnitt 4.1 sind die ermittelten Beiwerte λ_1 dargestellt. Die Gesamtheit der ermittelten λ_1 Werte je Detailpunkt ist in Tabelle 4 im Überblick zusammengefasst.

FEM-Modell	ELM -50 %	ELM -20 %	ELM	ELM +20 %	ELM +50 %	$m^* = 3$	$m^* = 5$
A	$\lambda_{1,A,ELM-50}$ (f_{Last})	$\lambda_{1,A,ELM-20}$ (f_{Last})	$\lambda_{1,A,ELM}$ (f_{Last})	$\lambda_{1,A,ELM+20}$ (f_{Last})	$\lambda_{1,A,ELM+50}$ (f_{Last})	$\lambda_{1,A,m=3}$ (f_{Last})	$\lambda_{1,A,m=5}$ (f_{Last})
B	$\lambda_{1,B,ELM-50}$ (f_{Last})	$\lambda_{1,B,ELM-20}$ (f_{Last})	$\lambda_{1,B,ELM}$ (f_{Last})	$\lambda_{1,B,ELM+20}$ (f_{Last})	$\lambda_{1,B,ELM+50}$ (f_{Last})	$\lambda_{1,B,m=3}$ (f_{Last})	$\lambda_{1,B,m=5}$ (f_{Last})
C	$\lambda_{1,C,ELM-50}$ (f_{Last})	$\lambda_{1,C,ELM-20}$ (f_{Last})	$\lambda_{1,C,ELM}$ (f_{Last})	$\lambda_{1,C,ELM+20}$ (f_{Last})	$\lambda_{1,C,ELM+50}$ (f_{Last})	$\lambda_{1,C,m=3}$ (f_{Last})	$\lambda_{1,C,m=5}$ (f_{Last})

Tabelle 4: Prinzip der ermittelten λ_1 Faktoren

Die λ_1 Werte wurden somit für die drei untersuchten FEM-Modelle (A,B,C) und für fünf Lastniveaus (ELM, ELM+50/20%) sowie für zwei Grenzwertbetrachtungen ($m^* = 3$, $m^* = 5$) berechnet.

4.1 Ermittelte Beiwerte λ_1 für $0 \leq L \leq 10 \text{ m}$

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Berechnungen von λ_1 aus den Simulationsberechnungen dargestellt. Die in den Diagrammen (Abbildungen 27 bis 34) hinterlegten Werte sowie der dazugehörige Lastfaktor f_{Last} können den jeweiligen Anhängen in den Abschnitten A.5, B.5 und C.5 entnommen werden.

Aus den Angaben des DIN-Fachberichts 103 [2] ergibt sich im Stützbereich (entsprechend Detail D2) für eine Spannweite von $e_{QT} = 2 \text{ m}$ ein Beiwert $\lambda_1 = 2,12$ und für eine Spannweite von $e_{QT} = 4 \text{ m}$ ein $\lambda_1 = 2,09$ (siehe Abbildung 26). Da diese Werte nicht für den Bereich des Deckblechs gedacht sind, werden sie nur mit jenen des Detailpunktes D2 verglichen.

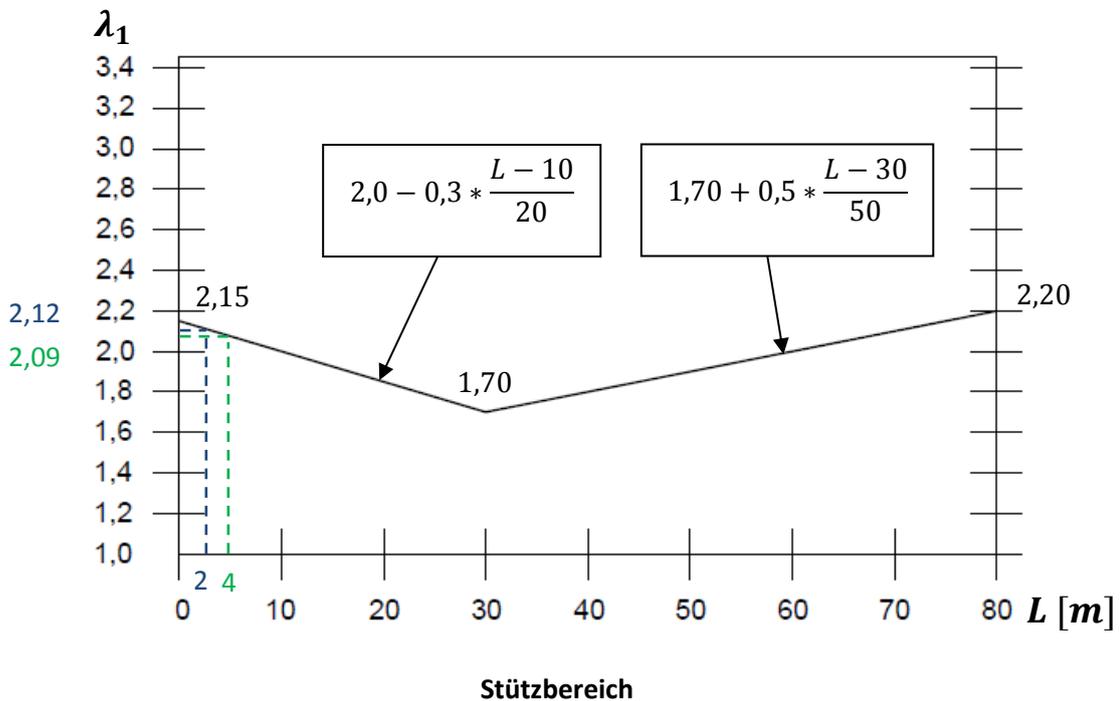


Abbildung 26: Beiwerte λ_1 nach [2] (Anm.: für die empfohlenen Verläufe sind die entsprechenden Gleichungen zusätzlich eingetragen)

4.1.1 Ergebnisse der λ_1 -Faktoren für Detail D1

Es erfolgten die Berechnungen mit verschiedenen Ermüdungslastmodellen, welchen unterschiedliche Schwerverkehrsmischungen zugrunde liegen (vgl. Tabelle 2). Für die offenen Längsrippen mit dem Querträgerabstand $e_{QT} = 2\text{ m}$ ergibt sich im direkten Vergleich der Lastmodelle ELM 4 und ELM 4_mod kein nennenswerter Unterschied. Die Ähnlichkeit der Werte resultiert aus der ähnlichen Völligkeit der jeweiligen Lastkollektive. Die Werte für λ_1 liegen im Bereich von 3,39 bis 5,38 (vgl. Abbildungen 27 und 28). Diese Werte können nicht mit den λ_1 -Werten nach der Norm oder dem DIN-Fachbericht 103 verglichen werden, da diese nicht für den Bereich des Deckblechs gedacht sind.

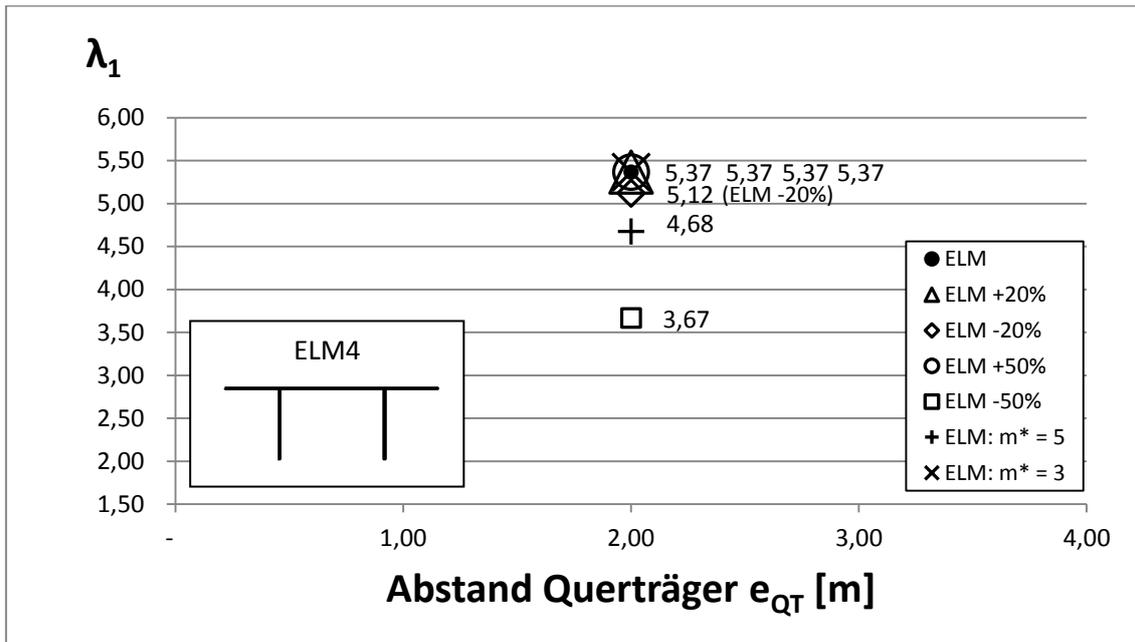


Abbildung 27: Detail D1_Beiwerte λ_1 – orthotrope Platte mit offenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM 4

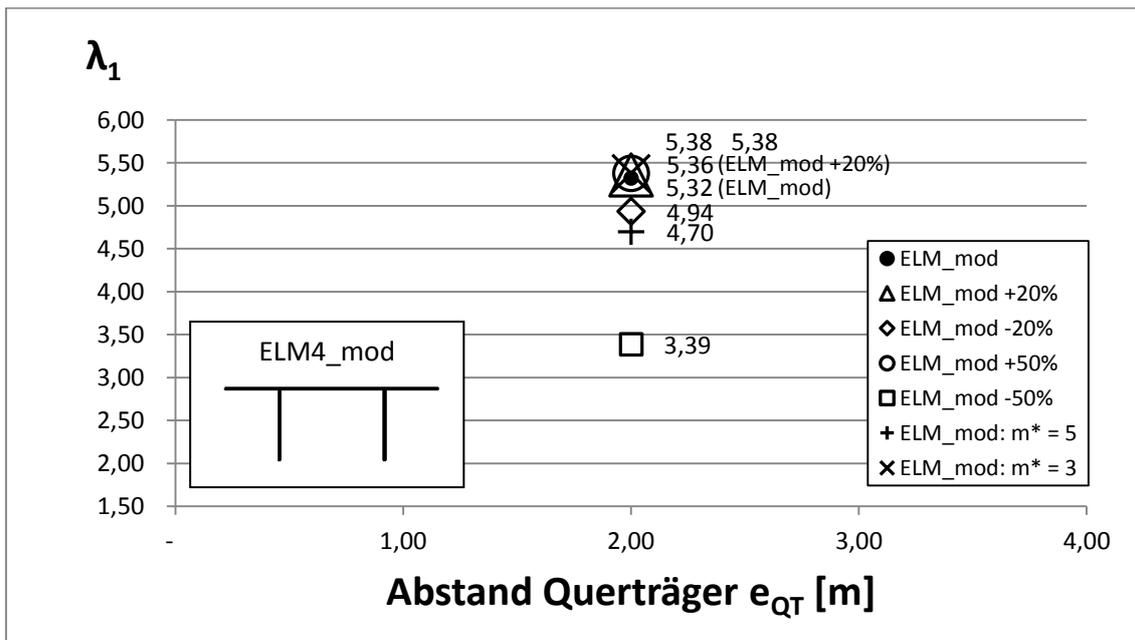


Abbildung 28: Detail D1_Beiwerte λ_1 – orthotrope Platte mit offenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM 4_mod

Bei den λ_1 -Werten der betrachteten geschlossenen Längsrippen fällt ebenfalls auf, dass aus den beiden Lastmodellen für die Werte kaum Unterschiede zu erkennen sind. Der unterschiedliche Querträgerabstand ist ebenfalls von untergeordnetem Einfluss, da die Lastwirkung lokal sehr begrenzt ist. Der Wertebereich reicht bei einem Querträgerabstand $e_{QT} = 2\text{ m}$ von $\lambda_1 = 4,81$ bis $5,94$ und bei einem Querträgerabstand $e_{QT} = 4\text{ m}$ von $\lambda_1 = 3,59$ bis $6,02$, wobei hier der untere Wert $\lambda_1 = 3,59$ aus dem um -50% verringertem Kollektiv stammt und dieser beim Modell mit dem Querträgerabstand $e_{QT} = 2\text{ m}$ aufgrund der niedrigen Beanspruchungshöhe keinen schädigungswirksamen Kollektivteil mehr beinhaltet (siehe Abbildung 29).

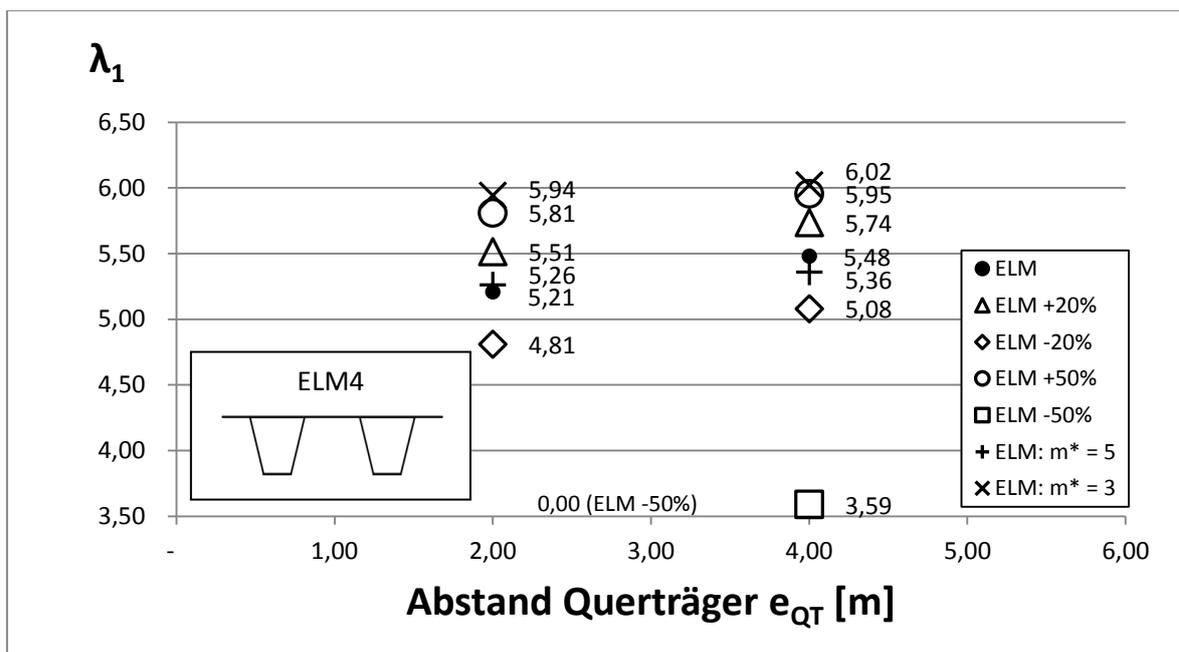


Abbildung 29: Detail D1_Beiwerte λ_1 – orthotrope Platten mit geschlossenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM 4

Im Vergleich des ELM 4 zum ELM 4_mod erkennt man, dass wegen der geringeren Schwerverkehrsbelastung der λ_1 -Wert des um -50% verringerten Kollektives (entspricht tatsächlich einer um 50% erhöhten Ermüdungsfestigkeit) für beide Querträgerabstände wegfällt ($\lambda_1 = 0$). (vgl. Abbildung 30)

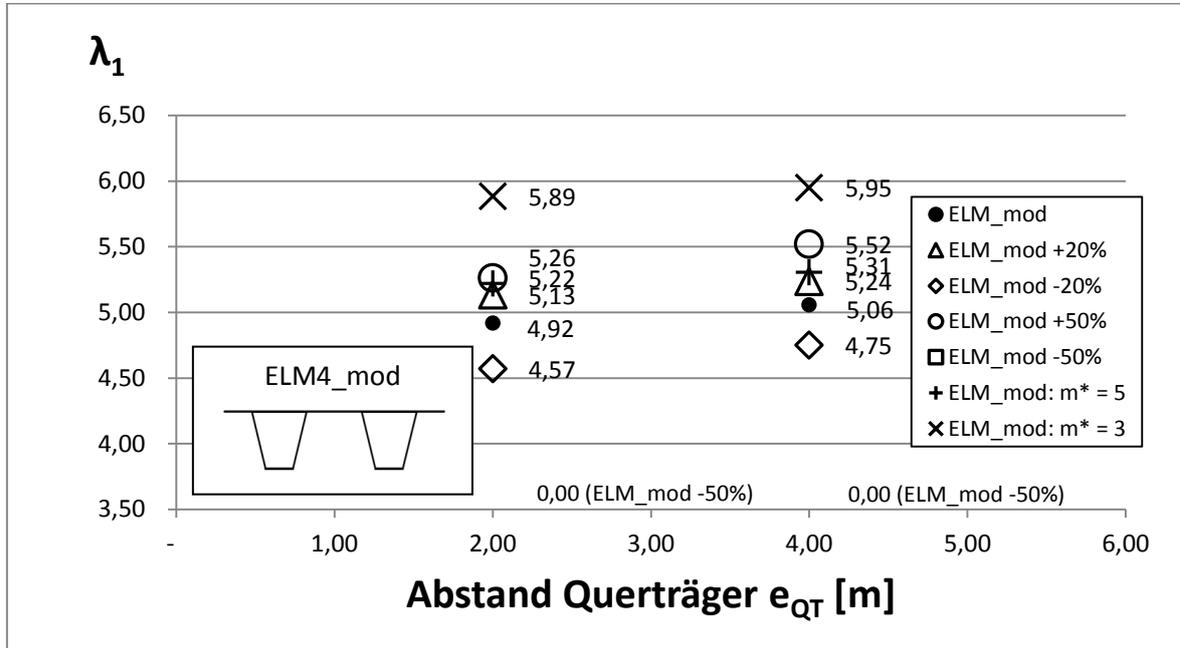


Abbildung 30: Detail D1_Beiwerte λ_1 - orthotrope Platten mit geschlossenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM 4_mod

4.1.2 Ergebnisse der λ_1 -Faktoren für Detail D2

Für den Detailpunkt D2 der orthotropen Platte mit offenen Längsrippen ist zwischen den Lastmodellen wieder kaum ein Unterschied im Hinblick auf die ermittelten λ_1 -Werte erkennbar. Dies hat vor allem mit der ähnlichen Verteilung der schädigenden Kollektivteile zu tun. Werte für λ_1 liegen hier im Bereich von 2,24 bis 3,29 (siehe Abbildungen 31 und 32). Abbildung 31 zeigt die Ergebnisse für λ_1 infolge des Ermüdungslastmodells 4 und Abbildung 32 die Ergebnisse infolge Ermüdungslastmodells 4_mod.

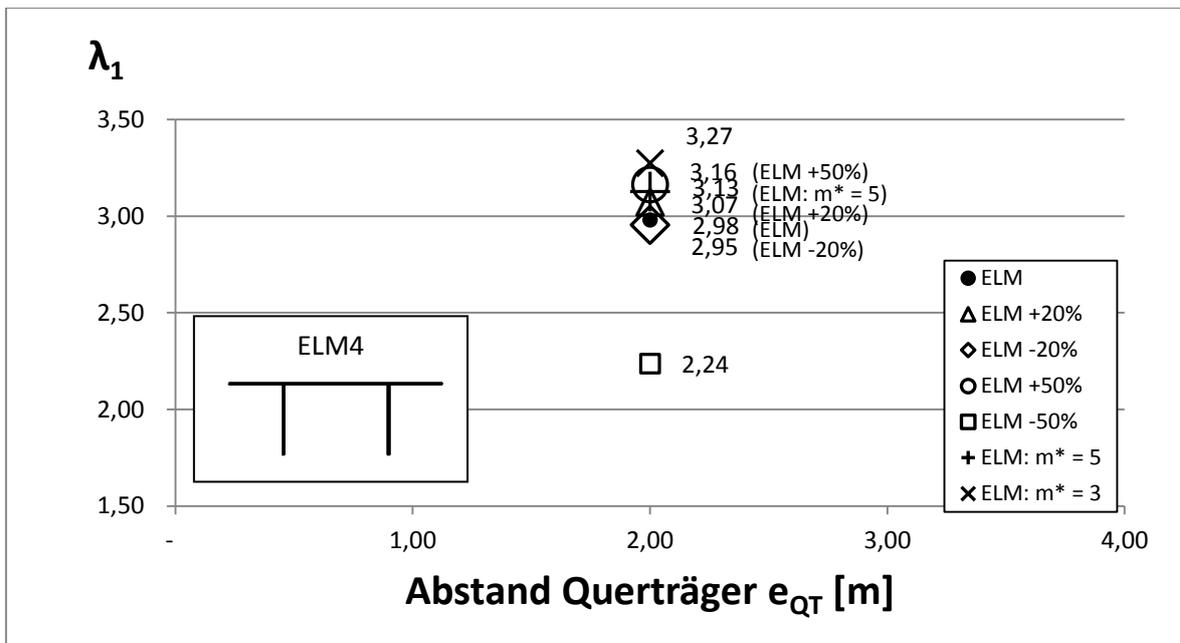


Abbildung 31: Detail D2_Beiwerte λ_1 - orthotrope Platten mit offenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM 4

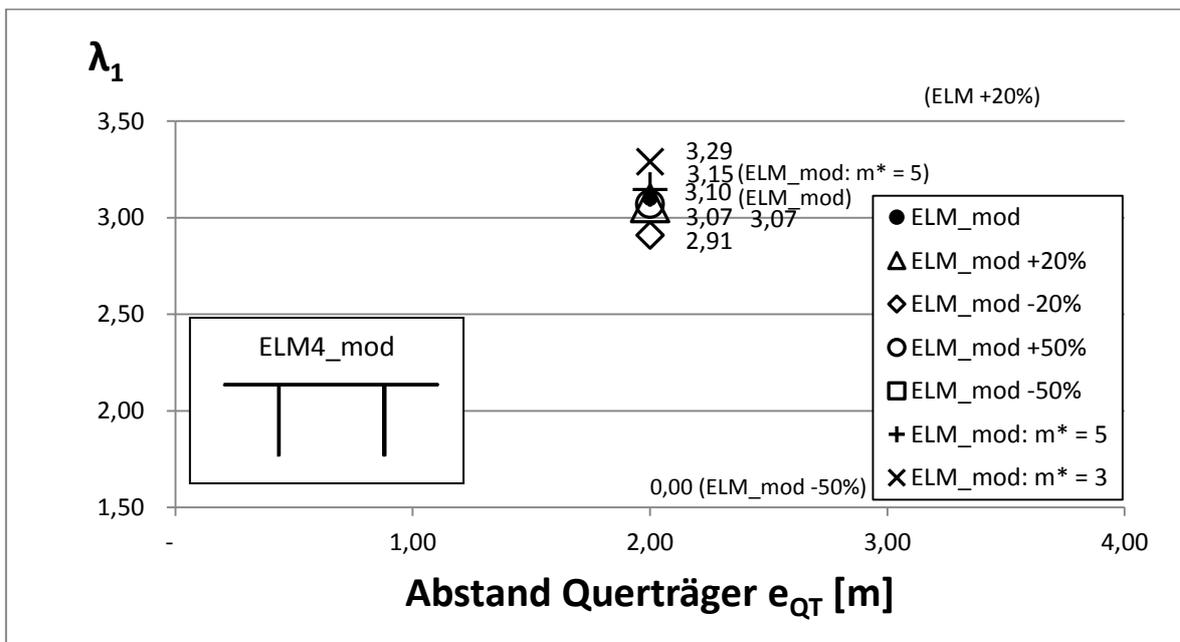


Abbildung 32: Detail D2_Beiwerte λ_1 - orthotrope Platten mit offenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM 4_mod

Betrachtet man nun für Detailpunkt D2 die orthotropen Platten mit geschlossenen Längsrippen, so ergeben sich zwischen den beiden untersuchten Lastmodellen für die λ_1 -Werte auch kaum Unterschiede. Allerdings erkennt man, dass es bei einer Vergrößerung des Querträgerabstands von $e_{QT} = 2\text{ m}$ auf $e_{QT} = 4\text{ m}$ zu einer steigenden Tendenz kommt. Somit ist ein Einfluss des Querträgerabstands auf die Werte λ_1 für den Detailpunkt D2 erkennbar. Diese λ_1 -Werte liegen hier für $e_{QT} = 2\text{ m}$ im Bereich von 1,98 bis 3,14 und für $e_{QT} = 4\text{ m}$ im Bereich von 2,25 bis 3,63.

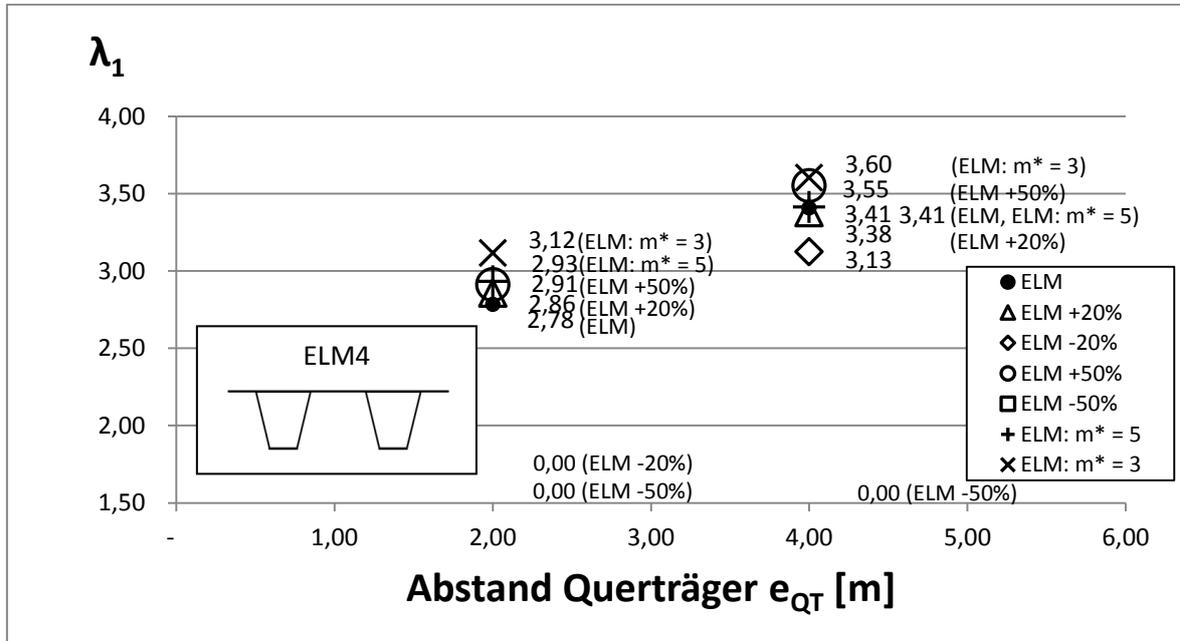


Abbildung 33: Detail D2_Beiwerte λ_1 - orthotrope Platten mit geschlossenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM 4

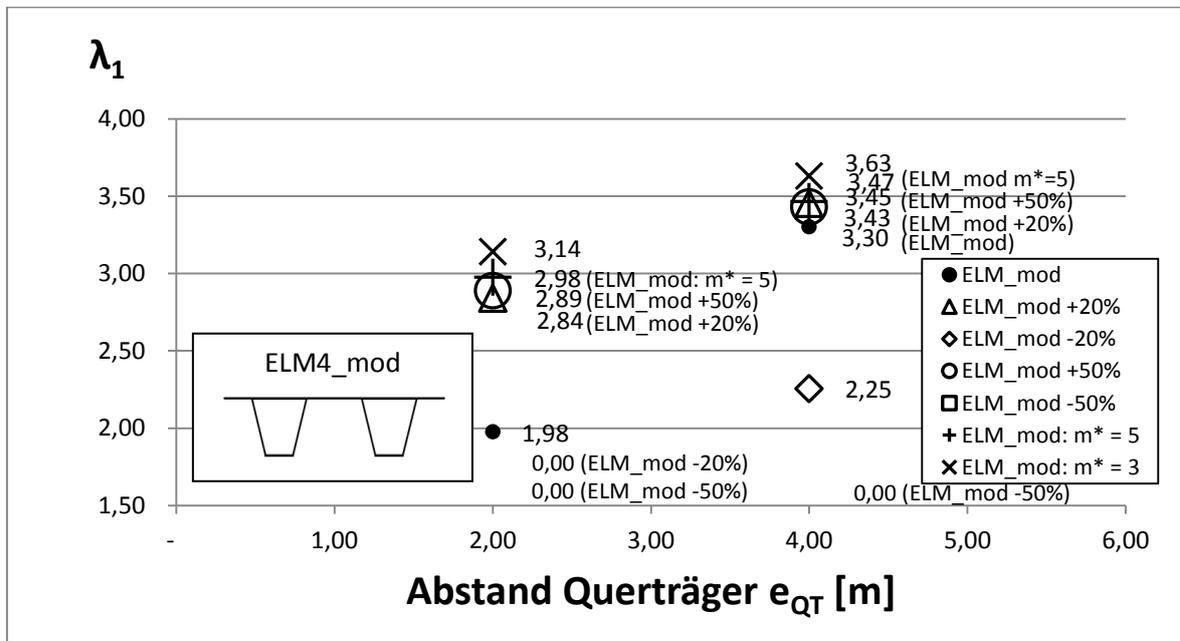


Abbildung 34: Detail D2_Beiwerte λ_1 - orthotrope Platten mit geschlossenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM 4_mod

4.1.3 Kollektivvergleiche

Bei der Betrachtung der soeben bestimmten λ_1 -Beiwerte fällt auf, dass es trotz gleichem Lastfaktor $f_{Last} = \frac{\Delta\sigma_{ELM3}}{\Delta\sigma_c}$ zu verschiedenen λ_1 -Werten kommt. Besonders klar ersichtlich ist dies in Abbildung 39. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass sich durch eine größere Beanspruchung eines Kollektives aus der Schwerverkehrssimulation (ELM 4 bzw. ELM 4_mod) bzw. durch den größeren Anteil an schädigenden Lastwechseln unterschiedliche Werte ergeben können. Aus diesem Grund werden nun neben dem Lastfaktor zusätzlich die zugehörigen Lastkollektive betrachtet.

Zu beachten ist, dass sich für Detail D1 und D2 auch die Ergebnisse ändern, wenn ein anderer Querträgerabstand vorliegt. Vergleicht man beispielsweise bei den Lastkollektiven des Detailpunktes D1 der orthotropen Platten mit geschlossenen Längsrippen nur die schädigenden Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_i$ aus dem Ermüdungslastmodell 4 bezogen auf die Spannungsschwingbreite aus dem Ermüdungslastmodell 3 $\Delta\sigma_{ELM3}$ miteinander, erkennt man durch den geänderten Querträgerabstand nur einen leichten Unterschied der Kollektive. Somit liegen auch die ermittelten Beiwerte λ_1 mit ihrem zugehörigen Lastfaktor f_{Last} nahe beieinander. (siehe Abbildung 35)

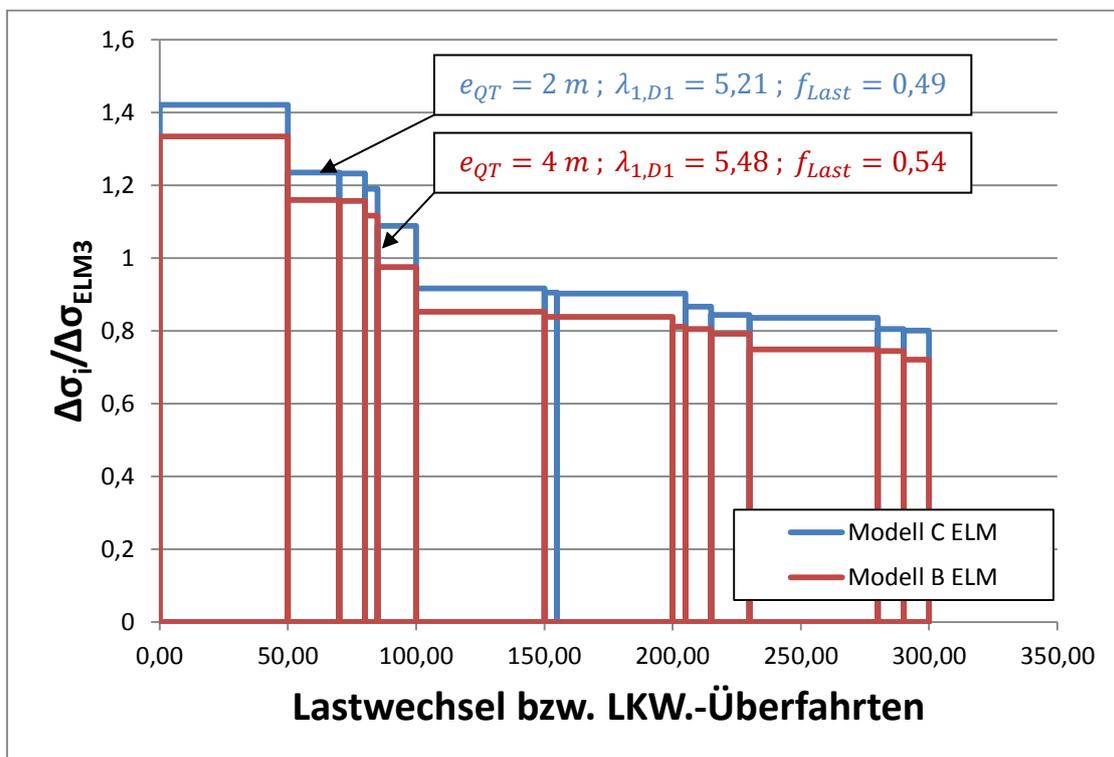


Abbildung 35: Detail D1-Kollektivvergleich der schädigenden Spannungsspiele des Lastmodells ELM 4

Stellt man nun die schädigenden Anteile der Lastkollektive aus dem Ermüdungslastmodell 4 mit jenen aus dem modifizierten Ermüdungslastmodell 4_mod, welches geringere Spannungsschwingbreiten aufweist, gegenüber, (vgl. Abbildung 35 mit Abbildung 36) würde man für letzteres deutlich geringere Beiwerte λ erwarten. Da der Haupteffekt infolge der unterschiedlichen Achslasthöhe jedoch im Faktor λ_2 schon eingerechnet ist (vgl. Abschnitt 3.2), sind die λ_1 -Beiwerte für beide Verkehrsmischungen daher ident.

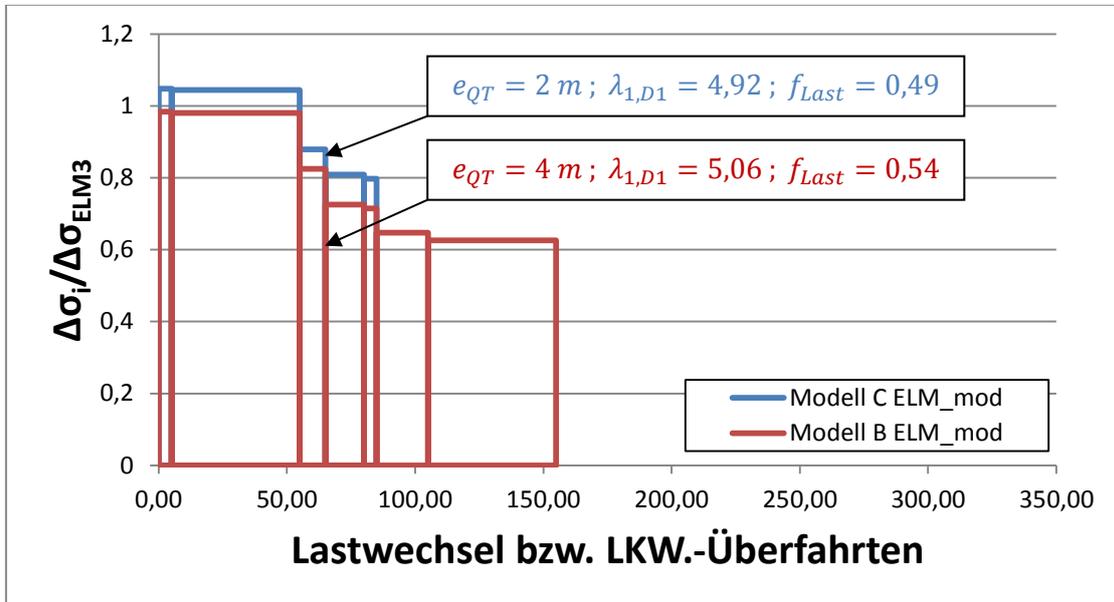


Abbildung 36: Detail D1-Kollektivvergleich der schädigenden Spannungsspiele des Lastmodells ELM 4_mod

Während sich für Detail D1 das bezogene Lastkollektiv auf das ELM3 $\Delta\sigma_i/\Delta\sigma_{ELM3}$ zwischen diesen zwei betrachteten orthotropen Platten kaum unterscheidet, was auch durch die sehr ähnlichen λ_1 -Werte erkennbar ist, sieht man beim selben Vergleich für Detail D2, dass aufgrund der stark unterschiedlichen Schädigungswirkung unterschiedliche Werte für λ_1 ermittelt wurden (siehe Abbildung 37).

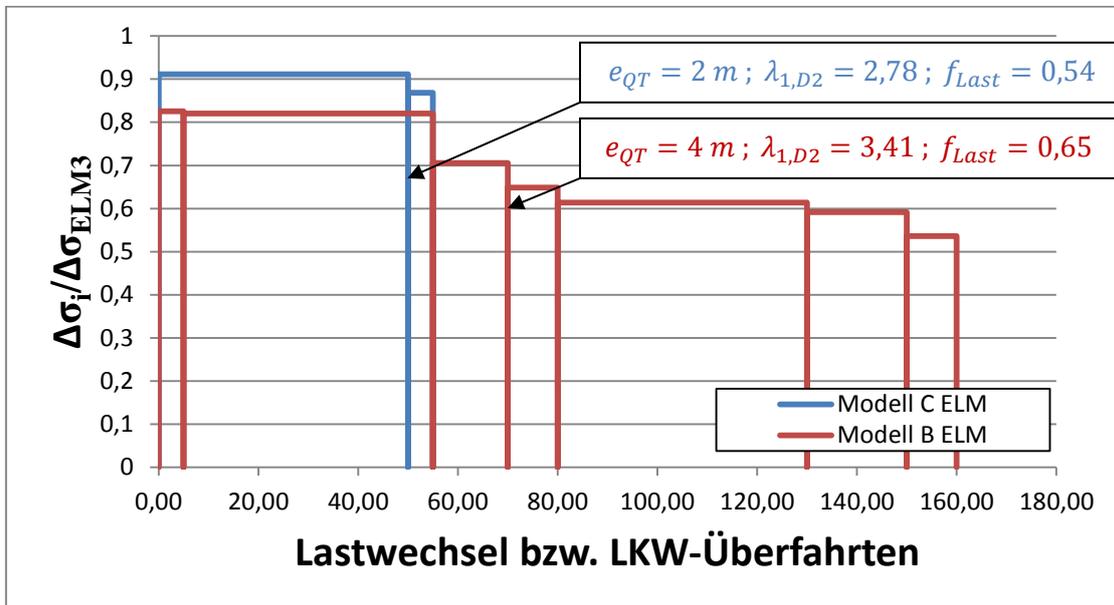


Abbildung 37: Detail D2 - Kollektivvergleich der schädigenden Spannungsspiele des Lastmodells ELM 4

Beim Kollektivvergleich aus dem modifizierten Ermüdungslastmodell 4_mod für Detail D2 erkennt man den Einfluss der schädigungswirksamen Kollektivteile noch mehr. Da beim Modell C, mit dem Querträgerabstand $e_{QT} = 2\text{ m}$, nur mehr ein Kollektivteil schädigend wird, ergibt sich aufgrund der geringeren Achslasten dieses Lastmodells ein viel geringerer Beiwert λ_1 bei nahezu gleichem Lastfaktor (siehe Abbildung 38).

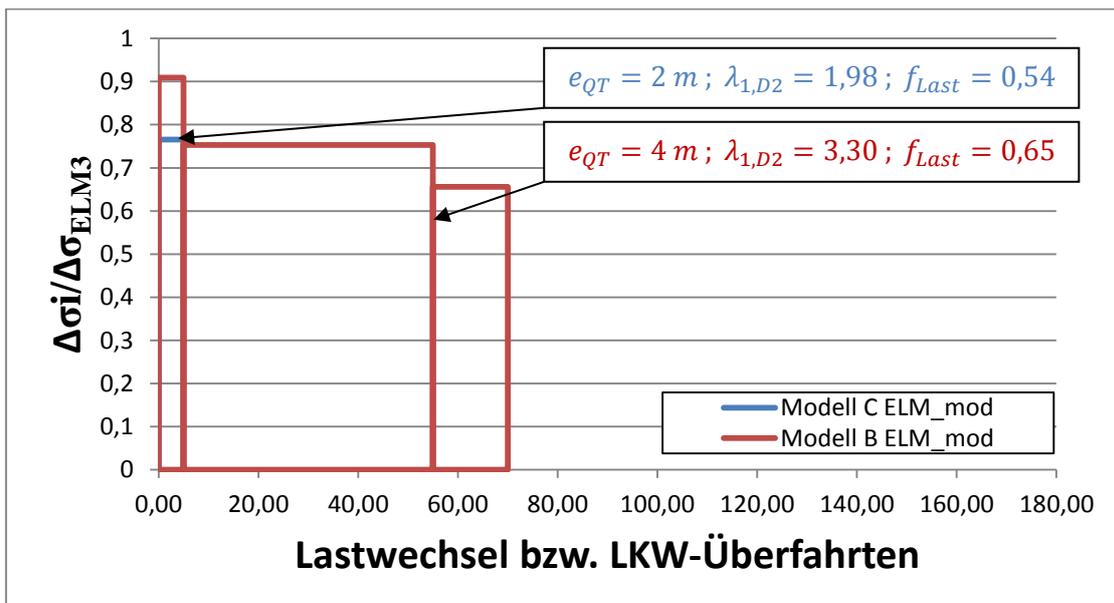


Abbildung 38: Detail D2 - Kollektivvergleich der schädigenden Spannungsspiele des Lastmodells ELM 4_mod

Des Weiteren ist zu beachten, dass sich bei einer Erhöhung und Verringerung der Kollektivteile aufgrund des stark nichtlinearen Einflusses der Ermüdungsfestigkeitskurve deutlich unterschiedliche schadenswirksame Kollektive ergeben. Erkennbar ist dies beispielsweise beim Vergleich der Kollektive des Modell C ELM und dem um 20% verringertem Kollektiv des Modell B ELM -20%. Trotz gleichem Lastfaktor ergeben sich unterschiedliche Werte für λ_1 (siehe Abbildung 39).

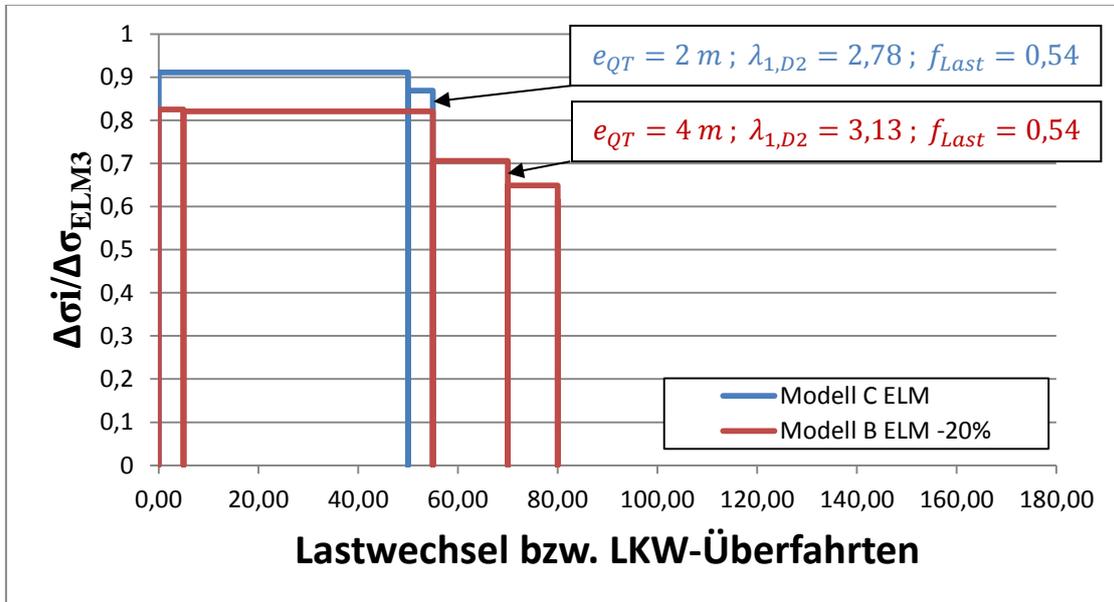


Abbildung 39: Detail D2 - Kollektivvergleich der schädigenden Spannungsspiele bei gleichem Lastfaktor des Lastmodells ELM 4

4.2 Vergleich der Beiwerte λ_1 für Detail D2

Vergleicht man die im DIN Fachbericht 103 [2] angegebenen Werte für den Stützbereich nun mit den errechneten Beiwerten λ_1 der orthotropen Platte mit offenen Längsrippen am Detailpunkt D2, wo für das Ermüdungslastmodell 4 $\lambda_{1,A,ELM} = 2,98$ abzulesen ist, erkennt man, dass sich zu dem empfohlenen Wert für eine Stützweite von 2 m $\lambda_{1,DIN-FB103} = 2,12$ (vgl. Abbildung 26) eine Unterschätzung von ca. 41 % ergibt. Für die gleiche Stützweite bei orthotropen Platten mit geschlossenen Längsrippen und $\lambda_{1,C,ELM} = 2,78$ ergibt sich eine Unterschätzung von ca. 48 %. Bei einer Stützweite von 4 m und geschlossenen Längsrippen mit der Empfehlung von $\lambda_{1,DIN-FB103} = 2,09$ ergibt sich zum errechneten Wert $\lambda_{1,B,ELM} = 3,41$ sogar eine Unterschätzung von ca. 63 %. Bei den restlichen variierten Werten von λ_1 ergibt sich eine ähnliche Differenz. In den nachfolgenden Abbildungen 40 bis 42 ist der empfohlene Wert aus dem DIN-Fachbericht 103 als Ergänzung in den Diagrammen der Beiwerte eingetragen.

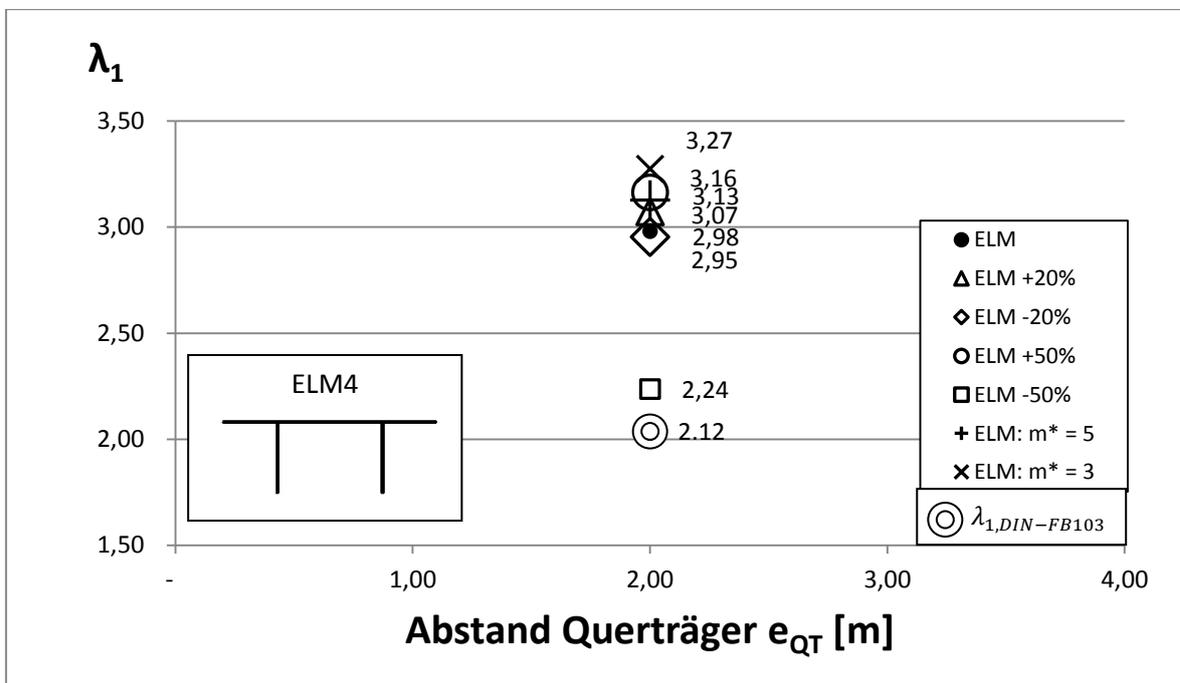


Abbildung 40: Beiwerte λ_1 – orthotrope Platten mit offenen Längsrippen – Detail D2; Vergleich mit Werten aus dem DIN-FB 103

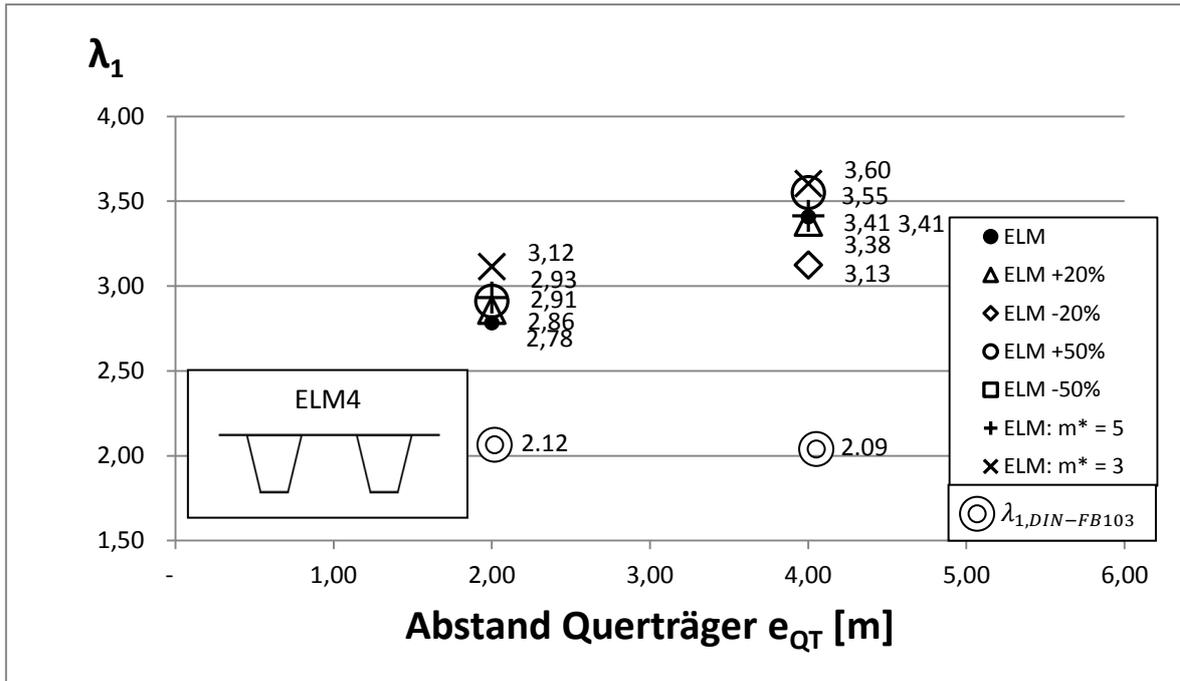


Abbildung 41: Beiwerte λ_1 - orthotrope Platten mit geschlossenen Längsrippen – Detail D2; Vergleich mit Werten aus dem DIN-FB 103

Da sich die Beiwerte aus Ermüdungslastmodell 4 und 4_mod kaum unterscheiden, wird hier auf eine weitere Abbildung der Werte aus dem modifizierten Ermüdungslastmodell 4_mod verzichtet. Die empfohlenen Werte des DIN-Fachberichts 103 sind ohnedies nicht von der Lasthöhe abhängig. Hier erkennt man nun den doch deutlichen Abstand der ermittelten zu den empfohlenen Werten aus der Literatur. Einzig bei dem Wert $\lambda_{1,C,ELM} = 1,98$ aus dem modifizierten Ermüdungslastmodell 4_mod mit dem Querträgerabstand $e_{QT} = 2\text{ m}$ liefert der empfohlene Wert ein konservatives Ergebnis.

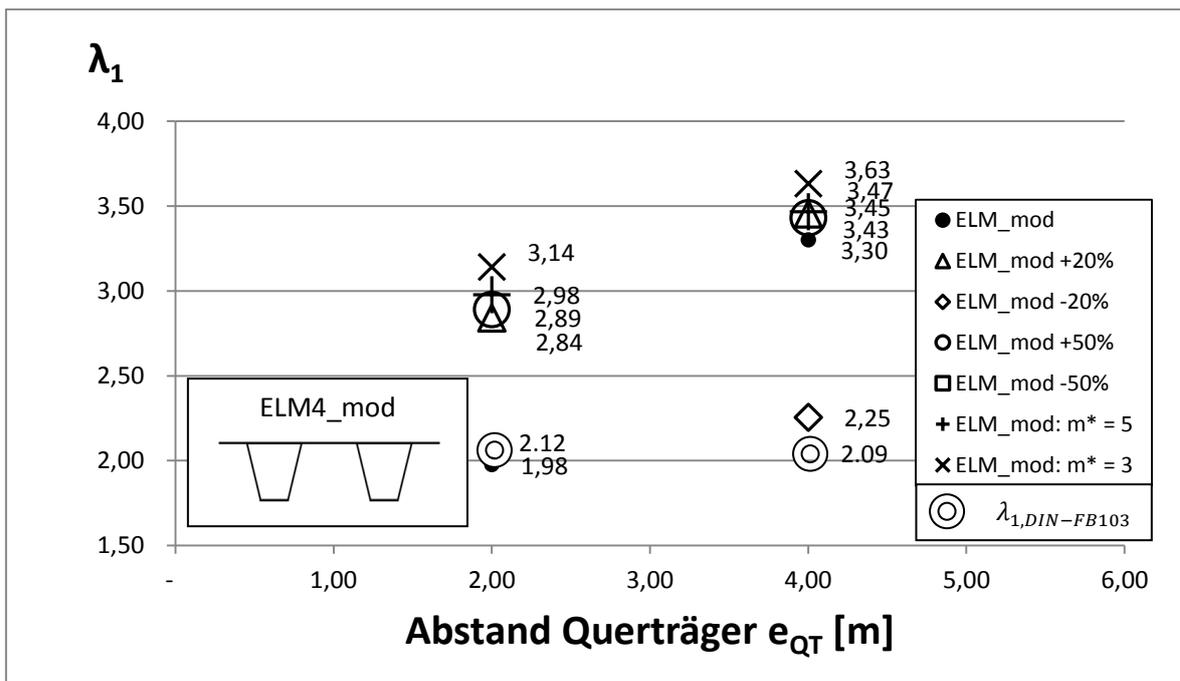


Abbildung 42: Beiwerte λ_1 - orthotrope Platten mit geschlossenen Längsrippen – Detail D2; Vergleich mit Werten aus dem DIN-FB 103

4.3 Zusammenfassung der ermittelten Beiwerte λ_1

Abschließend sind die λ_1 -Werte in Tabelle 5 und 7 für das Ermüdungslastmodell 4 und in Tabelle 6 und 8 für das Ermüdungslastmodell 4_mod mit den zugehörigen Lastfaktoren f_{Last} (Werte in Klammer) zusammengefasst (siehe auch Tabelle 4).

$\lambda_{1,D1}$ ELM							
Modell	ELM -50 %	ELM -20 %	ELM	ELM +20 %	ELM +50 %	$m^* = 3$	$m^* = 5$
A $e_{QT} = 2 \text{ m}$	3,67 (0,83)	5,12 (1,03)	5,37 (1,24)	5,37 (1,49)	5,37 (1,68)	5,37 (1,24)	4,68 (1,40)
B $e_{QT} = 4 \text{ m}$	3,59 (0,36)	5,08 (0,45)	5,48 (0,54)	5,74 (0,65)	5,95 (0,81)	6,02 (0,54)	5,36 (0,61)
C $e_{QT} = 2 \text{ m}$	-	4,81 (0,41)	5,21 (0,49)	5,51 (0,59)	5,81 (0,74)	5,94 (0,49)	5,26 (0,55)

Tabelle 5: Detail D1 - Zusammenfassung der ermittelten λ_1 Faktoren für das Lastmodell ELM 4

$\lambda_{1,D1}$ ELM_mod							
Modell	ELM_mod -50 %	ELM_mod -20 %	ELM_mod	ELM_mod +20 %	ELM_mod +50 %	$m^* = 3$	$m^* = 5$
A $e_{QT} = 2 \text{ m}$	3,39 (0,83)	4,94 (1,03)	5,32 (1,24)	5,36 (1,49)	5,38 (1,86)	5,38 (1,24)	4,70 (1,40)
B $e_{QT} = 4 \text{ m}$	-	4,75 (0,45)	5,06 (0,54)	5,24 (0,65)	5,52 (0,81)	5,95 (0,54)	5,31 (0,61)
C $e_{QT} = 2 \text{ m}$	-	4,57 (0,41)	4,92 (0,49)	5,13 (0,59)	5,26 (0,74)	5,89 (0,49)	5,22 (0,55)

Tabelle 6: Detail D1 - Zusammenfassung der ermittelten λ_1 Faktoren für das Lastmodell ELM 4_mod

Anmerkungen:

- Bei um 20% bzw. 50% erhöhter Ermüdungsfestigkeit ist mit ELM-20% bzw. ELM -50% zu rechnen.
- Bei um 20% bzw. 50% geringerer Ermüdungsfestigkeit ist mit ELM+20% bzw. ELM+50% zu rechnen.

In Tabelle 7 und 8 sind neben den an das Ermüdungslastmodell 4 bzw. 4_mod angepassten λ Faktoren auch jene empfohlenen Werte aus dem DIN-Fachbericht 103 [2] für Stützweiten von $e_{QT} = 2\text{ m}$ bzw. 4 m eingetragen.

$\lambda_{1,D2}$ ELM							
Modell	ELM -50 %	ELM -20 %	ELM	ELM +20 %	ELM +50 %	$m^* = 3$	$m^* = 5$
A $e_{QT} = 2\text{ m}$	2,24 (0,58)	2,95 (0,72)	2,98 (0,86)	3,07 (1,04)	3,16 (1,30)	3,27 (0,86)	3,13 (0,98)
B $e_{QT} = 4\text{ m}$	-	3,13 (0,54)	3,41 (0,65)	3,38 (0,77)	3,55 (0,97)	3,60 (0,65)	3,41 (0,73)
C $e_{QT} = 2\text{ m}$	-	-	2,78 (0,54)	2,86 (0,64)	2,91 (0,80)	3,12 (0,54)	2,93 (0,60)
DIN-FB103 $e_{QT} = 2\text{ m}$	-	-	2,12	-	-	-	-
DIN-FB103 $e_{QT} = 4\text{ m}$	-	-	2,09	-	-	-	-

Tabelle 7: Detail D2 - Zusammenfassung der ermittelten λ_1 Faktoren für das Lastmodell ELM 4

$\lambda_{1,D2}$ ELM_mod							
Modell	ELM_mod -50 %	ELM_mod -20 %	ELM_mod	ELM_mod +20 %	ELM_mod +50 %	$m^* = 3$	$m^* = 5$
A $e_{QT} = 2\text{ m}$	-	2,91 (0,72)	3,10 (0,86)	3,07 (1,04)	3,07 (1,30)	3,29 (0,86)	3,15 (0,98)
B $e_{QT} = 4\text{ m}$	-	2,25 (0,54)	3,30 (0,65)	3,43 (0,77)	3,45 (0,97)	3,63 (0,65)	3,47 (0,73)
C $e_{QT} = 2\text{ m}$	-	-	1,98 (0,54)	2,84 (0,64)	2,89 (0,80)	3,14 (0,54)	2,98 (0,60)
DIN-FB103 $e_{QT} = 2\text{ m}$	-	-	2,12	-	-	-	-
DIN-FB103 $e_{QT} = 4\text{ m}$	-	-	2,09	-	-	-	-

Tabelle 8: Detail D2 - Zusammenfassung der ermittelten λ_1 Faktoren für das Lastmodell ELM4_mod

Anmerkungen:

- Bei um 20% bzw. 50% erhöhter Ermüdungsfestigkeit ist mit ELM-20% bzw. ELM -50% zu rechnen.
- Bei um 20% bzw. 50% geringerer Ermüdungsfestigkeit ist mit ELM+20% bzw. ELM+50% zu rechnen.

4.4 Zusammenfassung – Schadensäquivalenzbeiwerte λ_1

Aus der Berechnung der Schädigungsäquivalenzfaktoren und dem darauffolgenden Vergleich der errechneten Beiwerte λ_1 mit jenen, welche im DIN-Fachbericht 103 empfohlen sind, kann gesagt werden, dass bei Verwendung dieser Werte für den Ermüdungsnachweis des Detailpunktes D2 am Anschluss der Längsrippen zum Querträger, besondere Vorsicht geboten ist. Mit den Beiwerten aus dem DIN-Fachbericht 103 [2] für den vereinfachten Nachweis mit Lastmodell ELM3 kann, im Vergleich zum Nachweis mit einer Schwerverkehrssimulation wie in Anhang A, B und C mit dem Ermüdungslastmodell 4 bzw. 4_mod durchgeführt, kein konservatives Ergebnis erreicht werden. Erkennbar wird dies an den neu bestimmten Beiwerten λ_1 , welche doch deutlich größere Werte annehmen, als jene empfohlenen aus dem DIN-Fachbericht 103.

Somit sind die im DIN-Fachbericht 103 [2] angegebenen Beiwerte für das in dieser Arbeit betrachtete Detail D2 von Längsrippen orthotroper Platten nicht zu empfehlen. Anstatt dieser Werte müssten bei einem vereinfachten Ermüdungsnachweis mit dem Ermüdungslastmodell 3 für die Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors die im Folgenden nochmals beschriebenen Beiwerte angesetzt werden. Beginnend mit den ermittelten Beiwerten λ_1 für den lokalen Detailpunkt D1 des Schweißnahtanschlusses an das Deckblech können aufgrund des vernachlässigbar kleinen Einflusses des Querträgerabstandes für offene Längsrippen mit einem Längsrippenabstand um $e_{LR} = 360$ mm konservativ mit $\lambda_{1,D1,offen} = 5,40$ und für geschlossene Längsrippen um $e_{LR} = 300$ mm mit $\lambda_{1,D1,geschl.} = 6,00$ gerechnet werden.

Für den Detailpunkt D2 kann bei offenen Längsrippen und einem Querträgerabstand $e_{QT} = 2$ m konservativ mit $\lambda_{1,D2,offen,2m} = 3,30$ gerechnet werden. Bei geschlossenen Längsrippen und einem Querträgerabstand von etwa $e_{QT} = 2$ m kann mit $\lambda_{1,D2,geschl.,2m} = 3,20$ und bei einem Querträgerabstand von $e_{QT} = 4$ m mit $\lambda_{1,D2,geschl.,4m} = 3,60$ gerechnet werden.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Unterweger, Harald; Nguyen, Viet Tue; Freytag, Bernhard: Verstärkung orthotroper Stahlfahrbahnplatten mit Hochleistungsbetonen zur Erzielung einer deutlich erhöhten Restlebensdauer, FFG-Forschungsprojekt Nr. 840487. Graz. Technische Universität Graz, 2015.
- [2] Sedlacek, Gerhard; Eisel, Hans; Hensen, Wolfgang; Kühn, Bertram; Paschen, Michael: Leitfaden zum DIN Fachbericht 103: Stahlbrücken. Berlin. Ernst & Sohn Verlag, März 2003.
- [3] Weitz, Fritz R.: Entwurfsgrundlagen und Entscheidungskriterien für Konstruktionssysteme im Großbrückenbau unter besonderer Berücksichtigung der Fertigung. Dissertation. Darmstadt. Technische Hochschule Darmstadt, 1975.
- [4] Fiedler, E.: Die Entwicklung der orthotropen Fahrbahnplatte in Deutschland. Der Stahlbau 78 (2009), H.8
- [5] Unterweger, H.: Stahl- und Verbundbrücken. Skriptum zur Lehrveranstaltung "Stahl- und Verbundbrücken", Institut für Stahlbau. Graz. Technische Universität Graz, 2011.
- [6] Unterweger, H; Taras A.: A-23-Praterbrücke/Stromtragwerk, Lebensdauerberechnung für das Fahrbahndeck infolge der lokalen Schwerverkehrsbelastung, Graz, März 2012
- [7] Radaj, D.; Sonsino, C.M.; Fricke, W.: Fatigue assessment of welded joints by local approaches, Second edition, Cambridge, England, 2006
- [8] Abaqus/CAE 6.10-1, Softwarepaket, Dassault Systèmes Simulia Corp., 2010.
- [9] ÖNORM EN 1991-2, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke: Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken. Wien. Österreichisches Normungsinstitut, 01.03.2012.
- [10] ÖNORM EN 1993-1-1, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten: Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Wien. Österreichisches Normungsinstitut, 15.10.2014.
- [11] ÖNORM EN 1993-1-9, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten: Teil 1-9: Ermüdung. Wien. Österreichisches Normungsinstitut, 01.04.2013.
- [12] ÖNORM EN 1993-2, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten: Teil 2: Stahlbrücken. Wien. Österreichisches Normungsinstitut, 15.08.2010.

A Modell A: orthotrope Platte mit offenen Längsrippen

Bei den Berechnungen der Modelle A, B und C wurden die Ermüdungslastmodelle aus Anhang D verwendet.

Für die nachfolgenden Berechnungen dieses Abschnitts wurde das Modell der Praterbrücke aus dem FFG-Forschungsprojekt Nr. 840487: "Verstärkung orthotroper Stahlbahnplatten mit Hochleistungsbetonen zur Erzielung einer deutlich erhöhten Restlebensdauer" [1] übernommen.

Beim gewählten Modell bleibt die globale Tragwirkung der Brücke unberücksichtigt, da die für die Ermüdung maßgeblichen Spannungen nur aus der lokalen Tragwirkung des Fahrbahndecks herrühren. [1] Daher wurde für diese Straßenbrücke mit orthotroper Fahrbahnplatte im Modell nur ein Brückendeck zwischen den Hauptträgern betrachtet. Die darüberhinausgehenden Bereiche zeigen ein ähnliches lokales Tragverhalten und werden daher nicht mitberücksichtigt. [1]

A.1 Geometrie des betrachteten Brückendecks

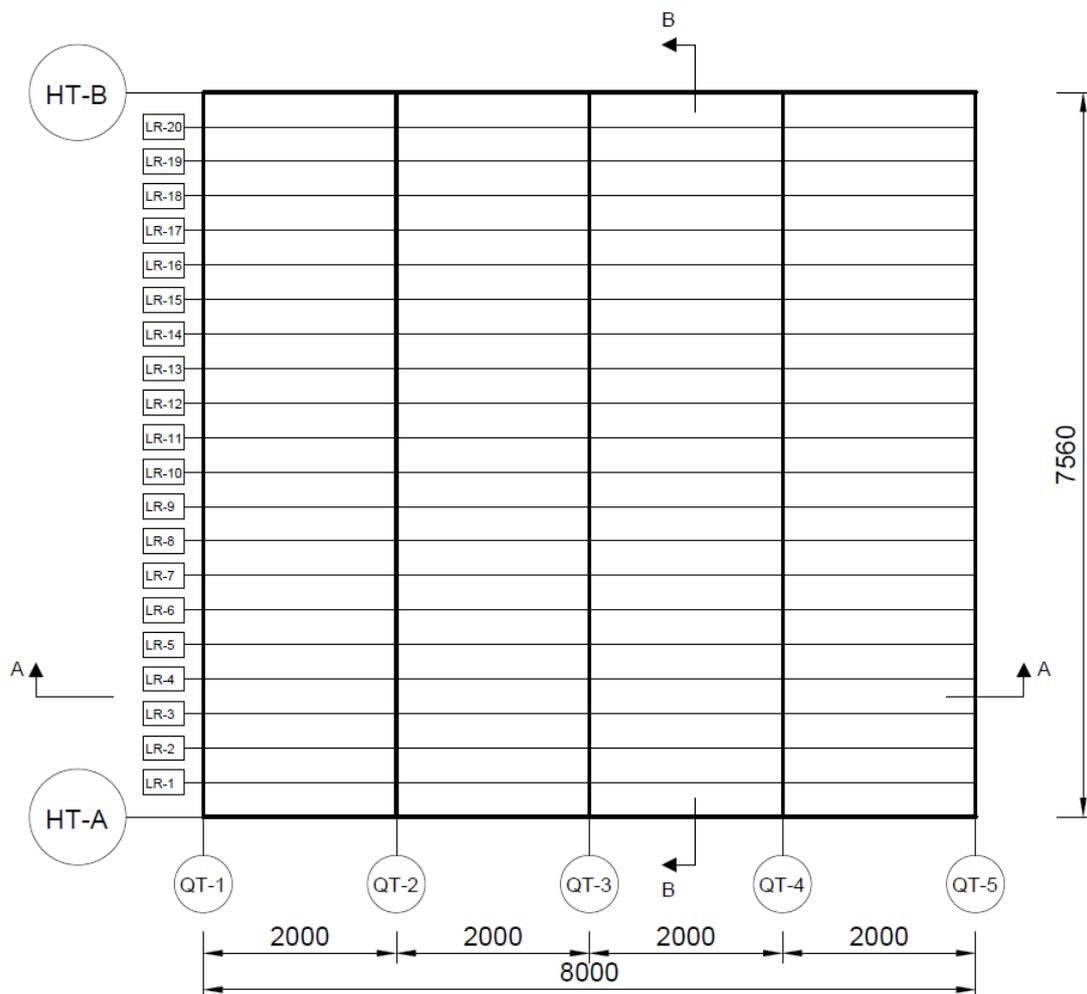


Abbildung 43: Modell A - Grundriss

Das betrachtete Brückendeck mit den Grenzabmessungen 8,0 m auf 7,56 m besteht im Grundriss aus 2 Hauptträgern, 5 Querträgern (in der Literatur auch Querrippen genannt) sowie den 20 Längsrippen (siehe Abbildung 43). Die Hauptträger und Längsrippen haben eine Länge von $l_{HT} = l_{LR} = 8\text{ m}$ und die Querträger eine Länge von $l_{QT} = 7,56\text{ m}$. Der Hauptträgerabstand beträgt $e_{HT} = 7,56\text{ m}$, der Querträgerabstand beträgt $e_{QT} = 2\text{ m}$ und der Längsrippenabstand $e_{LR} = 0,36\text{ m}$.

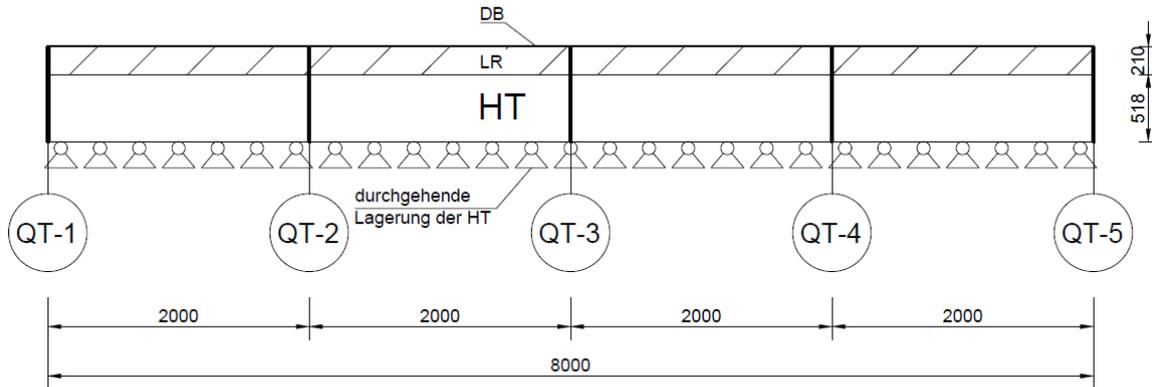


Abbildung 44: Modell A - Schnitt A-A

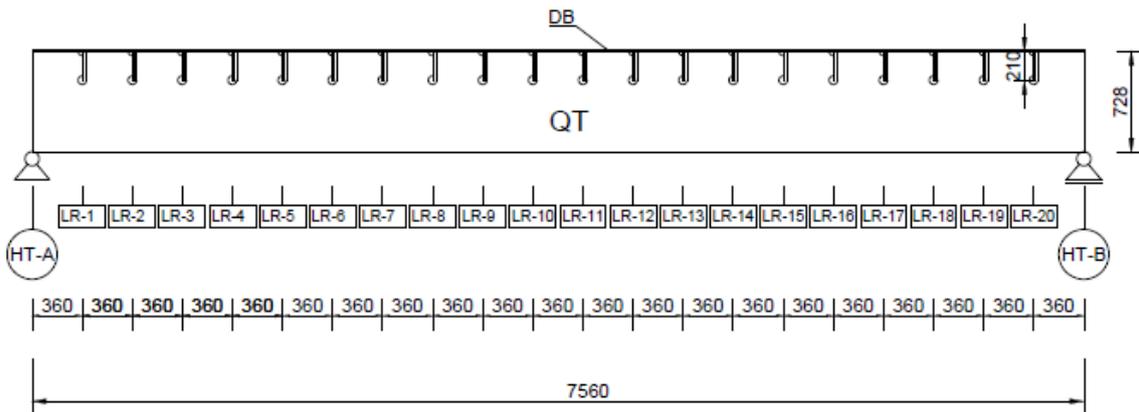


Abbildung 45: Model A - Schnitt B-B

Die Höhe der Längsrippen beträgt $h_{LR} = 0,21\text{ m}$ und die der Querträger $h_{QT} = 0,728\text{ m}$. Die Hauptträgerstege wurden bis zum Untergurt der Querträger modelliert und sind an ihrer Unterkante linienförmig gelagert. [1] Die Längsrippen sind durchlaufend über die Länge des Brückendecks angeordnet und schließen an die Querträger, welche im Anschlussbereich ausgenommen sind, jeweils einseitig an (siehe Abbildungen 44 und 45).

Die Blechstärke der Längsrippen beträgt $t_{LR} = 10\text{ mm}$, die der Hauptträger $t_{HT} = 12\text{ mm}$ und die der Querträger $t_{QT} = 8\text{ mm}$. Die Deckblechdicke beträgt $t_{DB} = 10\text{ mm}$ und führt zu einer Deckblechschlankheit von $e_{LR}/t_{DB} = 36$. Die Norm EN 1993-2 empfiehlt in Anhang C, Punkt C.1.2.2 eine Deckblechschlankheit von $e/t \leq 25$. Diese Anforderung wird hier klar überschritten.

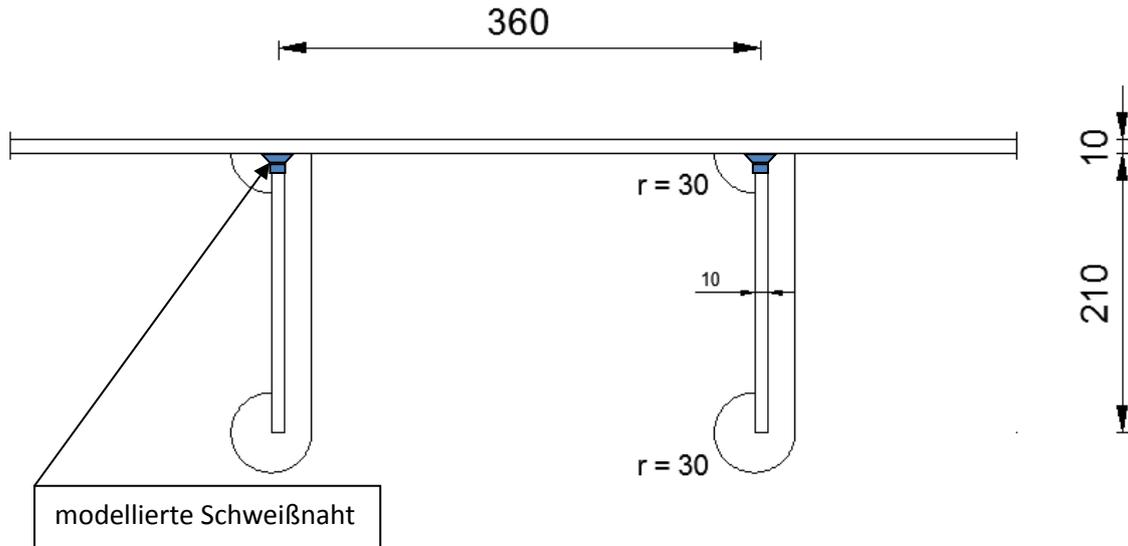


Abbildung 46: Modell A - Längsrippengeometrie

Die hier dargestellten offenen Längsrippen schließen wie aus Abbildung 46 ersichtlich einseitig an den Querträger an. Weiters schließen sie mit einer beidseitigen Kehlnaht an das Deckblech an. Die Geometrie dieser Schweißnaht ist nachfolgend in Abbildung 47 dargestellt.

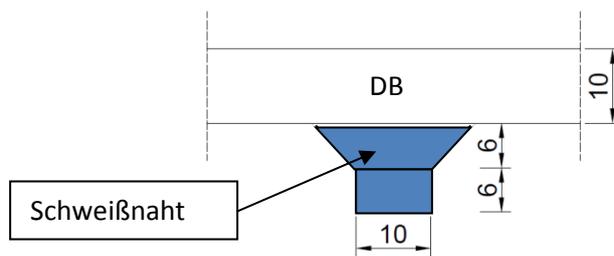


Abbildung 47: Modell A - Schweißnahtgeometrie

A.2 Finite-Elemente-Modellierung

Die Modellierung und Berechnung wurde mit dem Finite-Elemente-Programm Abaqus (Version 6.10) [8] durchgeführt. Das Modell wurde wie oben erwähnt aus [1] übernommen. Die getroffenen Annahmen und Programmeingaben werden in diesem Abschnitt zusammengefasst.

A.2.1 Material

Das gesamte Brückendeck besteht aus Stahl mit folgenden für die Modellierung relevanten Eigenschaften lt. EN 1993-1-1, Abschnitt 3.2.6 (1)

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

A.2.2 Bauteile (Parts)

Für das betrachtete Brückendeck des Modell A gibt es in Abaqus mehrere Möglichkeiten, die einzelnen Bauteile zu modellieren. In diesem Modell wurden die Bauteile als Volumen-, Schalen- und Stabelemente modelliert. Die Modellierungsart, sowie die Blechstärken des einzelnen Bauteils können nachfolgend Tabelle 9 entnommen werden.

Bauteile	Dicke	Element
Hauptträger	$t_{HT} = 12 \text{ mm}$	Schale
Querträger	$t_{QT} = 8 \text{ mm}$	Schale
Querträger Untergurt	160x8	Stab
Längsrippen	$t_{LR} = 10 \text{ mm}$	Schale
Schweißnähte LR an DB	siehe Geometrie	Volumen
Deckblech	$t_{DB} = 10 \text{ mm}$	Volumen

Tabelle 9: Modell A - Bauteile

Die Modellierung als Schalenelement (Shell) hat den Vorteil, dass nur die Geometrie sowie die Dicke des Bauteils eingegeben werden muss und daraus ein erheblich geringerer Rechenaufwand vom Programm abverlangt wird, als die Modellierung mit Volumenelementen. Diese Modellierungsart eignet sich besonders für die Hauptträger, Querträger sowie Längsrippen. Nachfolgend in den Abbildungen 48 bis 53 sind die einzelnen Bauteile nach ihrer Modellierung in Abaqus abgebildet.



Abbildung 48: Modell A - Hauptträger (shell) $l = 8000 \text{ mm}$

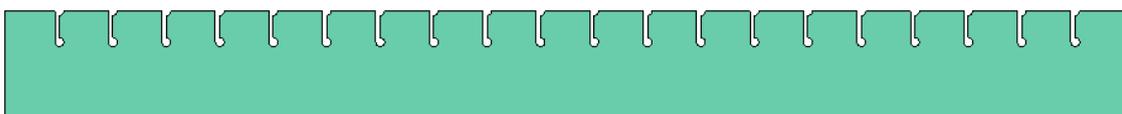


Abbildung 49: Modell A - Querträger (shell) $l = 7650 \text{ mm}$

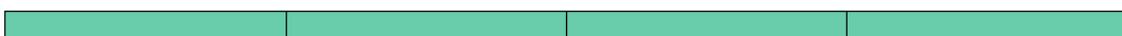


Abbildung 50: Modell A - Längsrippe (shell) $l = 8000 \text{ mm}$

Der Untergurt der Querträger wurde als Stab-Element (Beam) modelliert, da hierfür nur die Geometrieingabe der Länge sowie des gewünschten Profils erforderlich ist. Das verwendete Querschnittsprofil dieses Elements ist ein Rechteck mit den Abmessungen 160x8 (siehe Abbildung 51).

Abbildung 51: Modell A - Querträger Untergurt (beam) $l = 7650$ mm

Die komplexeste Möglichkeit der Modellierung besteht in der Eingabe als Volumen-Element (Solid). Diese Modellierung hat im Gegensatz zu den anderen Elementen eine erheblich größere Anzahl an Freiheitsgraden und direkt damit eine höhere Rechenzeit zur Folge. Daher wurde diese Modellierung nur für die Schweißnähte und das Deckblech verwendet (siehe Abbildungen 52 und 53), um das Spannungsdruckkonzept lt. EN 1993-1-9, Anhang B anwenden zu können, wobei die Regeln zur Modellierung [7] entnommen wurden.

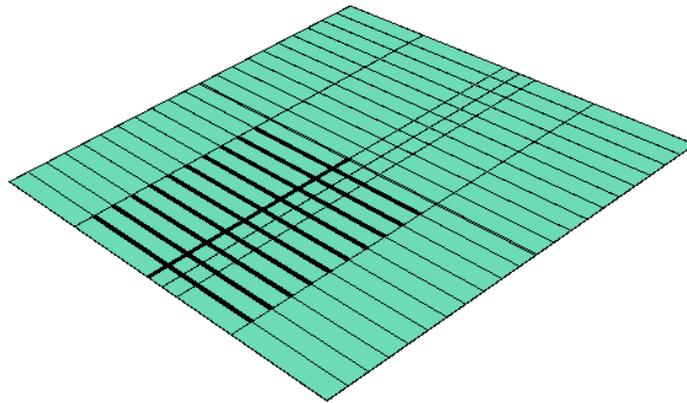


Abbildung 52: Modell A - Deckblech (solid) $l \times b = 8000 \times 7650$ mm

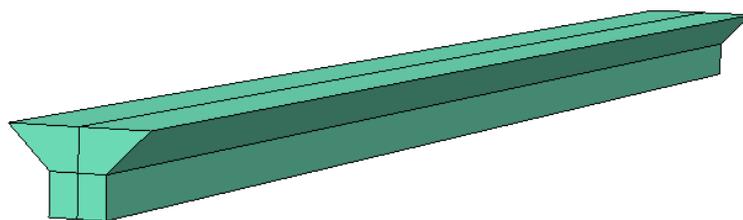


Abbildung 53: Modell A - Schweißnaht (solid)

Die Schweißnähte wurden nicht für die gesamte Längsrippe, sondern nur für den maßgeblichen Bereich des inneren Deckblechs modelliert, da hier im weiteren Berechnungsverlauf die Spannungen am Schweißnahtanschluss zum Deckblech abgelesen werden.

Zusammen ergeben die einzelnen Bauteile das betrachtete Brückendeck, für welches im Folgenden das FE-Netz generiert wird (siehe Abbildung 54).

A.2.3 Netzgenerierung

Das Deckblech wurde in 2 Bereiche aufgeteilt. Bereich 1 (Deckblech außen) besteht aus einem größeren Netz (vorgegebene Elementgröße 80 mm), Bereich 2 (Deckblech innen) aus einem feineren (vorgegebene Elementgröße 20 mm). In Bereich 2 werden Spannungen auch an den Schweißnähten abgelesen, daher wurden diese ebenfalls modelliert und ein feineres Netz für diesen Bereich gewählt. Die Netzgenerierung erfolgte in Abaqus mit der Einstellung "structured", um möglichst gleichmäßige Elemente zu erhalten. Die tatsächliche Elementgröße variiert aufgrund der automatischen Verteilung und der nachträglich gemachten Verfeinerungen zur Einhaltung einer optimalen Elementgeometrie. Das generierte Netz-Modell ist nachfolgend in Abbildung 54 mit den ungefähren Elementgrößen je Bauteil dargestellt.

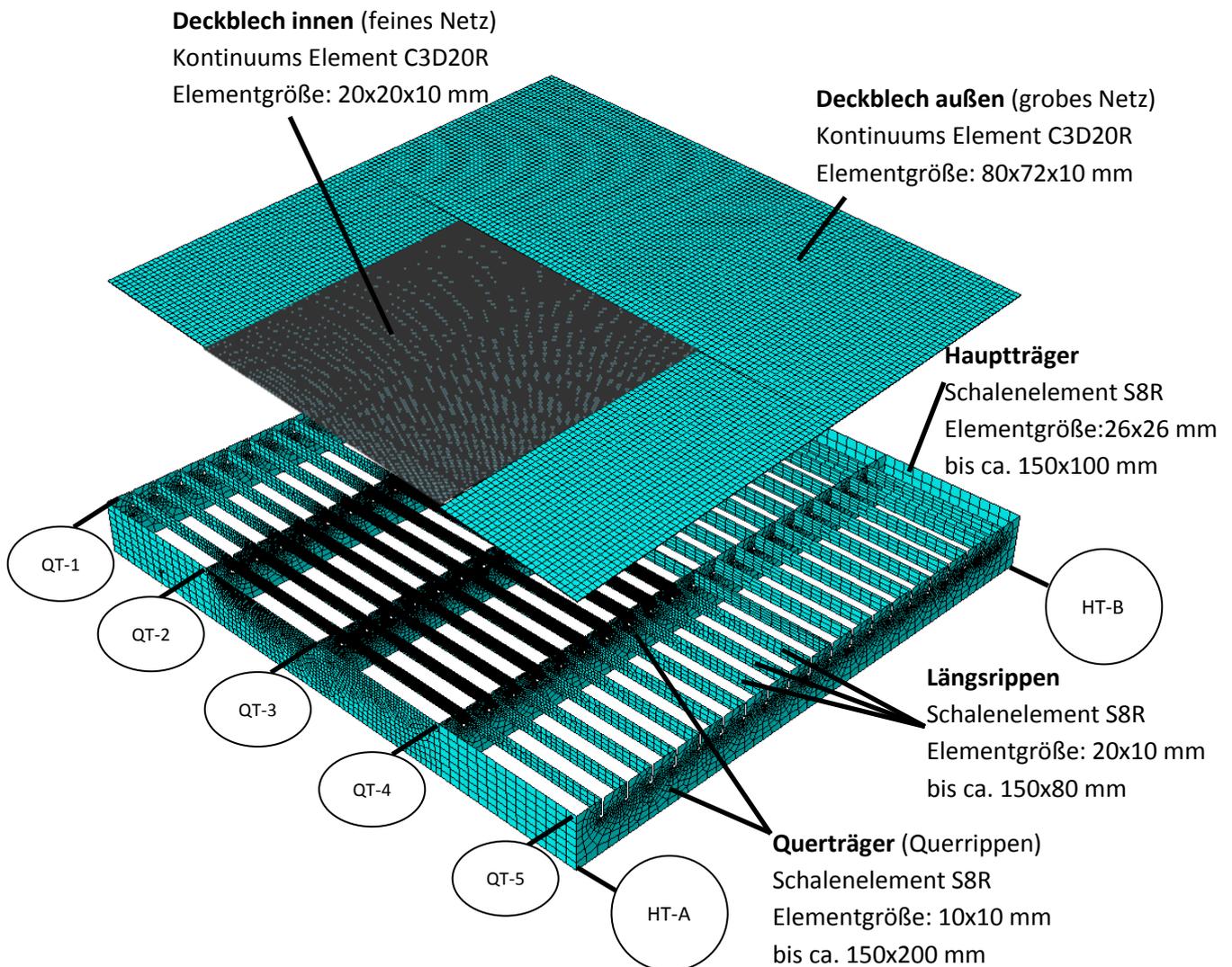


Abbildung 54: Modell A - Ansicht FEM-Modell mit Elementgrößen

Abbildung 55 zeigt den Schnitt durch Querträger 3 sowie die zur automatischen FE-Netzgenerierung gemachten Netzverfeinerungen.

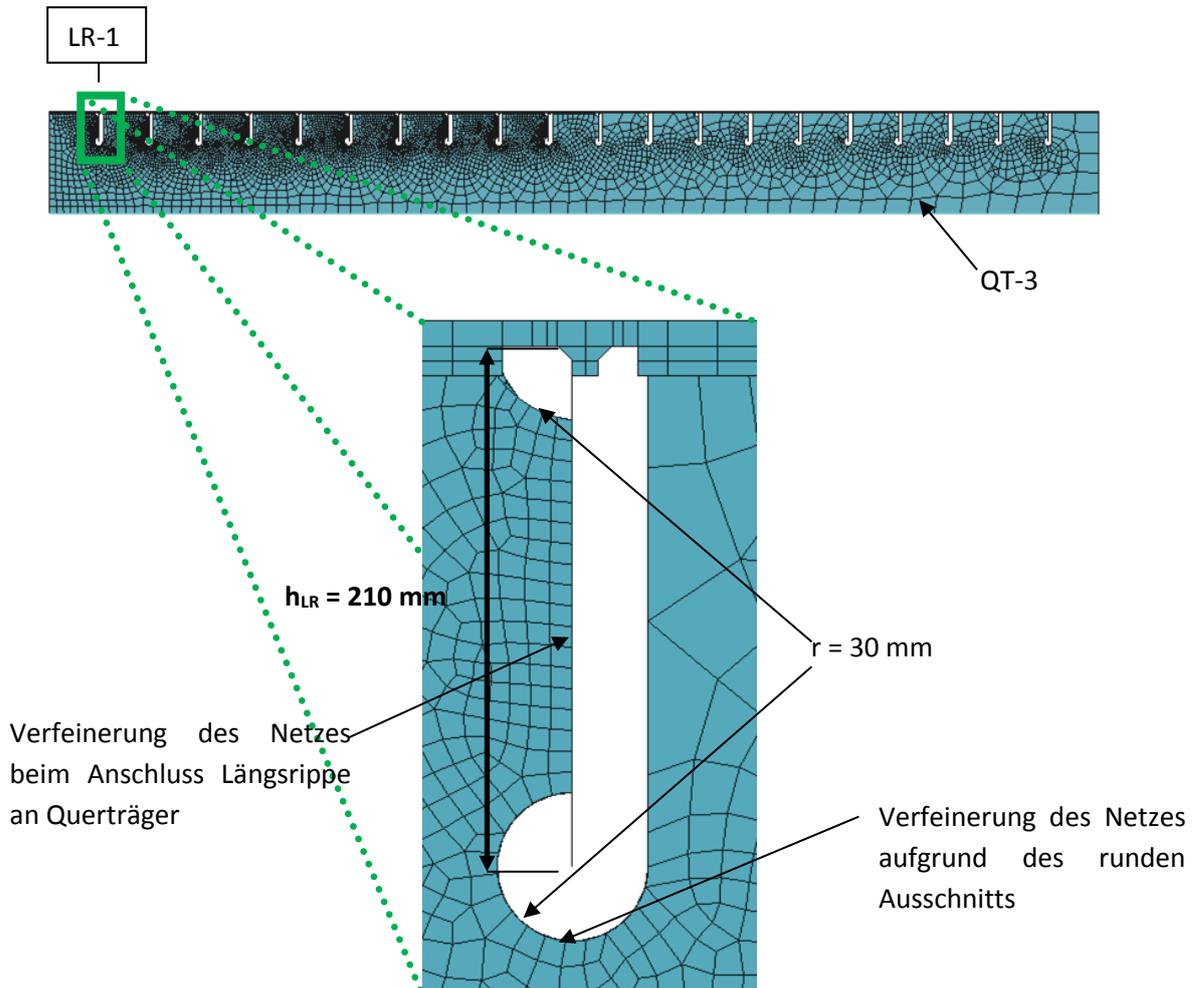


Abbildung 55: Modell A - Netzgenerierung, Schnitt durch Querträger 3

Da im Bereich des Querträger 3 bei der ersten Längsrippe (LR-1) die Spannungen abgelesen werden (siehe Abschnitt A.2.6), wurde das FE-Netz im Bereich des inneren Deckblechs ebenfalls für die Querträger und Längsrippen manuell verfeinert (vgl. Abbildung 54). Besonderes Augenmerk musste auf den hier in Abbildung 55 dargestellten Ausschnitt der LR-1 am Anschluss an den QT-3 gelegt werden, da der Querträger besonders aufgrund der Ausrundungen eine feinere Netzverteilung erforderlich machte, um aussagekräftige Spannungen ablesen zu können.

A.2.4 Kopplungen

Um ein zusammenhängendes Modell zu generieren, mit welchem die Berechnungen durchgeführt werden können, ist es in Abaqus notwendig, Bauteile miteinander über Kopplungsbedingungen zu verbinden, um Verschiebungen und Verdrehungen der Anschlussknoten übergeben zu können. Des Weiteren werden durch die Kopplung auch die nicht modellierten Schweißverbindungen berücksichtigt (vgl. Tabelle 10).

Die Kopplung der Schalen-Elemente, Hauptträger, Querträger und Längsrippen, erfolgte in Abaqus mit dem Befehl "Merge", wodurch diese Einzelteile zu einem zusammenhängenden Teil verbunden wurden und die Bauteile dadurch starr miteinander verbunden sind. Ebenfalls wurden die Volumen-Elemente, Deckblech und Schweißnähte mit dem Befehl "Merge" zu einem Teil verbunden. Die beiden Deckblechteile wurden als "Tie" (starre Verbindung) verbunden. Weiters wurde nun das Deckblech (Solid-Element) mit den Rippen (Shell-Elemente) mit der Bedingung "Shell-to-solid coupling" verbunden. Zuletzt wurden noch die Untergurte mit den zugehörigen Querträgern als "Tie" verbunden. Eine Auflistung der miteinander gekoppelten Bauteile sowie die verwendete Methode ist in Tabelle 10 zusammengefasst.

Teil 1	Teil 2	Kopplungsmethode
HT	QT, LR	Merge
Deckblech innen	Schweißnähte	Merge
Deckblech innen	Deckblech außen	Tie
Rippen (HT,QT,LR)	Deckblech	Shell-to-solid coupling
Querträger	Querträger-Untergurt	Tie

Tabelle 10: Modell A - Kopplungsmethoden

A.2.5 Lagerung

Die Hauptträger wurden, wie in nachfolgenden Abbildungen 56 und 57 ersichtlich, als durchgehend gelenkig gelagert modelliert. Die gesperrten Freiheitsgrade sind für den Hauptträger A: $U_x = U_y = U_z = Rot_z = 0$ und für den Hauptträger B: $U_x = U_y = Rot_z = 0$.

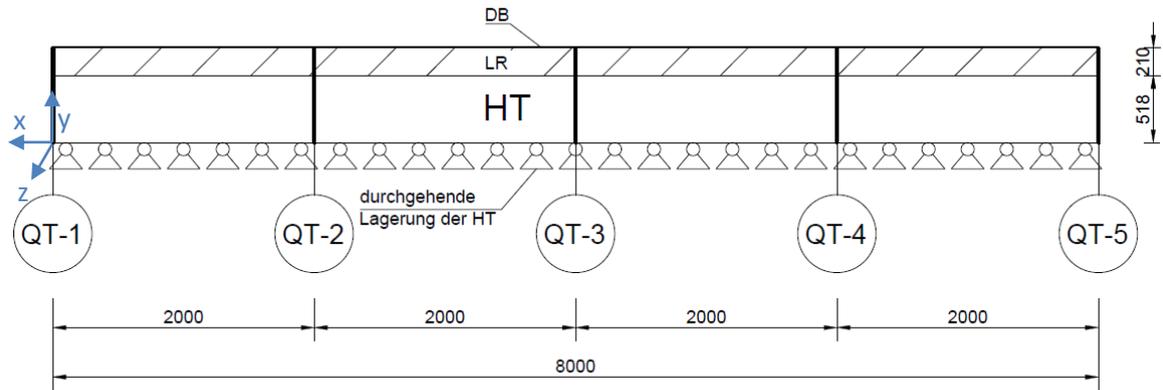


Abbildung 56: Modell A - Lagerung der Hauptträger

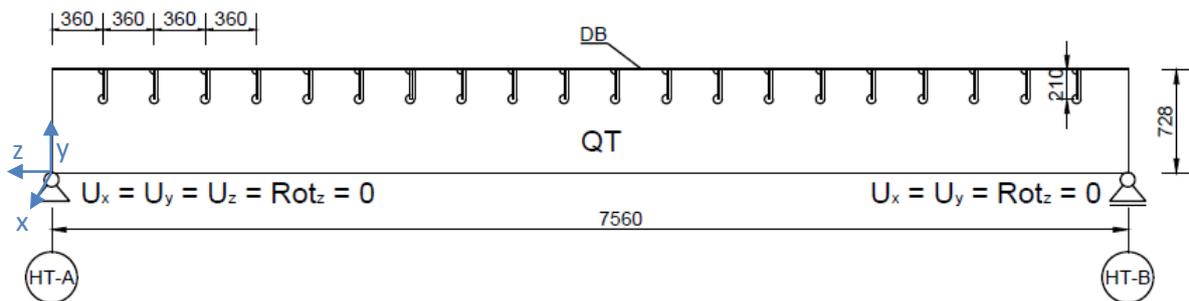


Abbildung 57: Modell A - Lagerung der Querträger

A.2.6 Betrachtete Detailpunkte

Im Rahmen der Berechnungen wurden zwei Detailpunkte im Hinblick auf ihre Ermüdungsbelastung gesondert betrachtet. Beide Punkte befinden sich im Bereich der ersten Längsrippe (LR-1). Wobei Detailpunkt D2 direkt am Anschluss der Längsrippe an den Querträger 3 (QT-3) liegt und Detailpunkt D1 in einem Abstand von $e_{LR} = 360$ mm zum QT-3 (siehe Abbildungen 58 und 59).

Detail D1 betrachtet den Anschlusspunkt der Schweißnaht an das Deckblech (siehe Abbildungen 58 und 59). Für diesen Detailpunkt liegt aus der EN 1993-1-9, Anhang B, Tabelle B.1 ein Kerbfall 100 ($\Delta\sigma_c = 100 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$) vor.

Detail D2 betrachtet den maßgebenden Anschlusspunkt der Längsrippe an den Querträger (siehe Abbildungen 58 und 59). Für diesen Detailpunkt liegt aus der EN 1993-1-9, Anhang B, Tabelle B.1 ein Kerbfall 100 ($\Delta\sigma_c = 100 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$) vor.

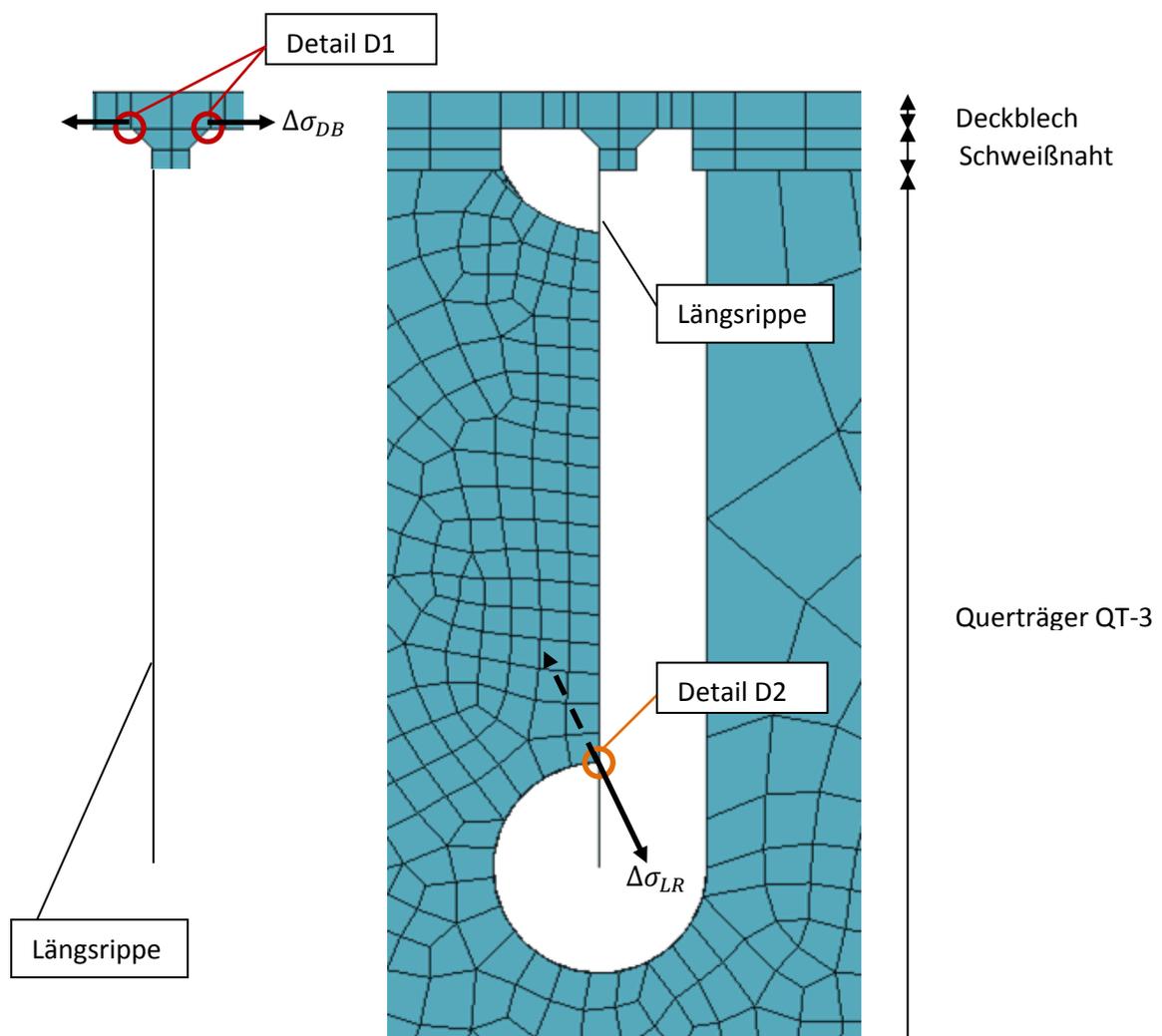


Abbildung 58: Modell A - Betrachtete Detailpunkte

Zur besseren Erläuterung, wo sich die Detailpunkte im Grundriss befinden, soll nachfolgende Abbildung 59 dienen.

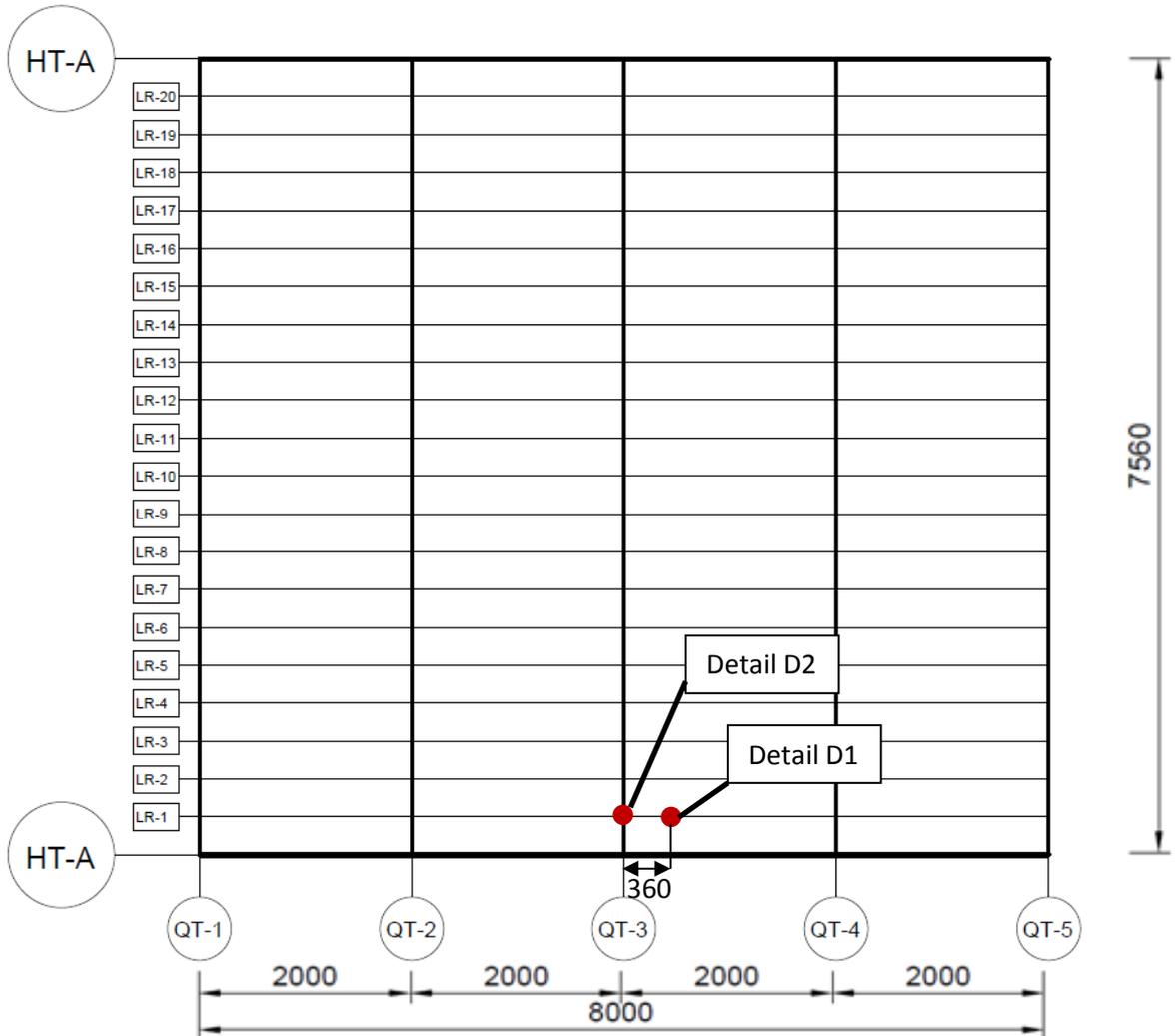


Abbildung 59: Modell A - Lage im Grundriss von Detail D1 und D2

A.2.7 Lastaufstellung

Zur Berechnung der schädigenden Spannungsspiele wurden das Ermüdungslastmodell 3 (ELM 3) sowie das Ermüdungslastmodell 4 (ELM 4) lt. ÖNORM EN 1991-2, Abschnitt 4.6.4 und Abschnitt 4.6.5 angewendet. Weiters wurde ein modifiziertes Ermüdungslastmodell 4 (ELM 4-mod) aus [6] angesetzt. Die einzelnen Lastmodelle werden in Anhang D näher beschrieben.

Mit den einzelnen Einheitsflächenlasten eines Reifens je Schwerfahrzeugstyp aus Anhang D.3 wurde ein Lastzug über das Brückendeck erzeugt, wobei aufgrund des vernachlässigten Einflusses von Nebenfahrstreifen nur die Radlast auf der ersten Längsrippe (LR-1) angesetzt wurde. Der Schwerpunkt der Lastfläche liegt jeweils mittig über der Längsrippe 1 (LR-1). Dies führt im Detailpunkt D1 und D2 zu den größten Spannungsspielen. (siehe Abbildung 60)

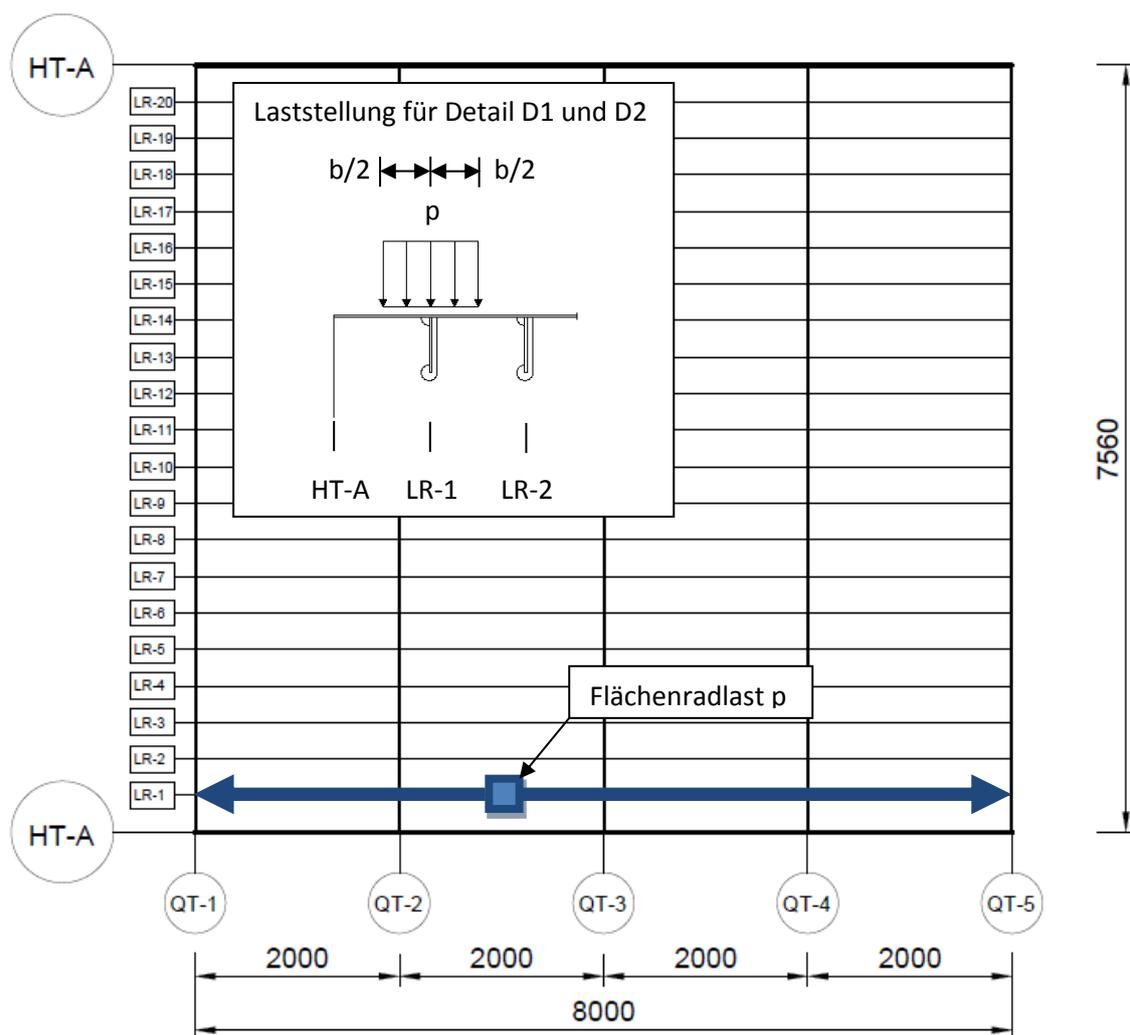


Abbildung 60: Modell A - Lastzug für größtes Spannungsspiel in Detail D1 und D2

Nach der Berechnung durch Abaqus wurden die Spannungen ausgelesen und aus diesen im Programm Microsoft Excel die Einflusslinien je Detailpunkt erstellt (siehe Abschnitt A.3).

A.3 Ermittelte Einflusslinien

Die in diesem Kapitel dargestellten Einflusslinien wurden, mit Ausnahme der Einflusslinien zufolge Ermüdungslastmodell 3, aus [1] übernommen.

A.3.1 Detail D1 – Spannungseinflusslinien aus Einheitsachslasten

Um die Strukturspannungen bei Detail D1 zu erhalten, wurden laut [7] an einem Punkt im Abstand von $0,4 \cdot t_{DB} = 0,4 \cdot 10 = 4 \text{ mm}$ zum Nahrand der Kehlnaht und an einem Punkt im Abstand von $1,0 \cdot t_{DB} = 10 \text{ mm}$ zum Nahrand die Spannungen σ_1 und σ_2 ermittelt und daraus durch lineare Extrapolation die Spannung σ_{HS} am Nahrand ermittelt (siehe Abbildung 61).

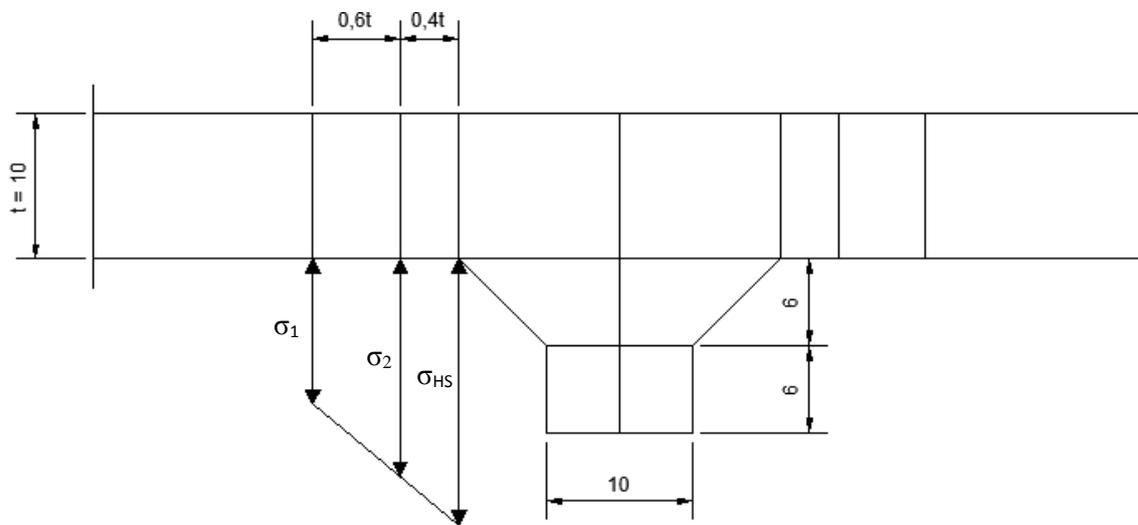


Abbildung 61: Spannungsermittlung Detail D1 [1]

Zur Berechnung der Einflusslinien wurde eine Einheitsachslast mit 100 kN angesetzt. Die Umrechnung auf die wirklichen Achslasten erfolgt in Abschnitt A.4. Aus den Abbildungen 62 bis 64 der Einflusslinien erkennt man, dass jede Achse aufgrund der lokal begrenzten Wirkung der Deckblechbiegung genau ein Spannungsspiel im betrachteten Detailpunkt hervorruft, wobei das Maximum auftritt, wenn das jeweilige Rad der Achse genau mittig über dem Detailpunkt D1 steht. In den nachfolgenden Abbildungen 62 bis 64 sind darüber hinaus die Querträger durch dickere vertikale Linien bei $x = -236$ und 164 cm gekennzeichnet.

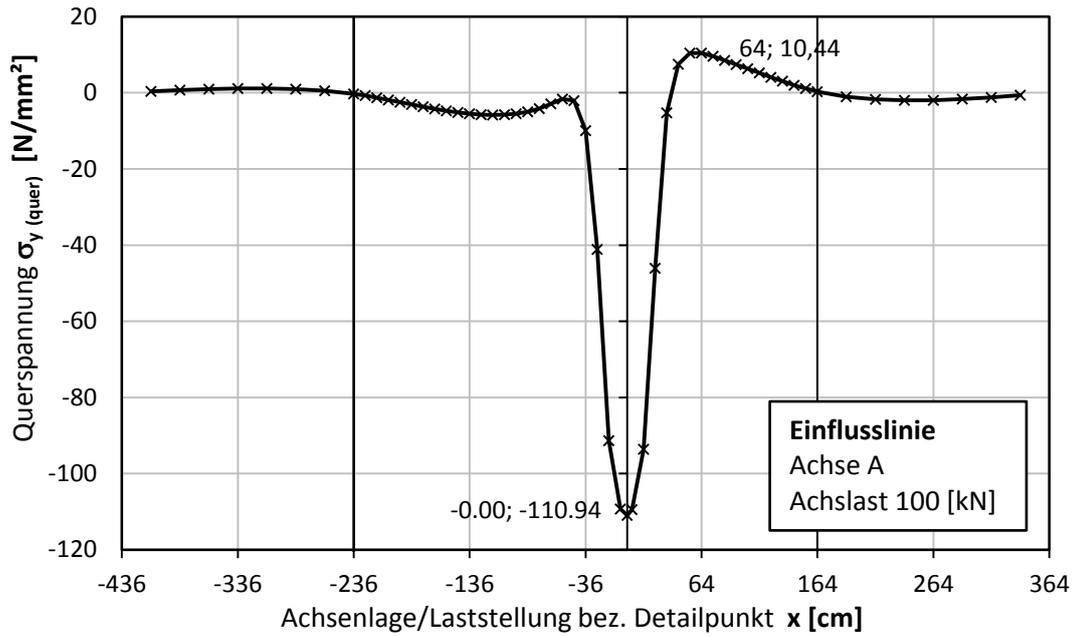


Abbildung 62: Detail D1 - Spannungseinflusslinie aus Achse A [1]

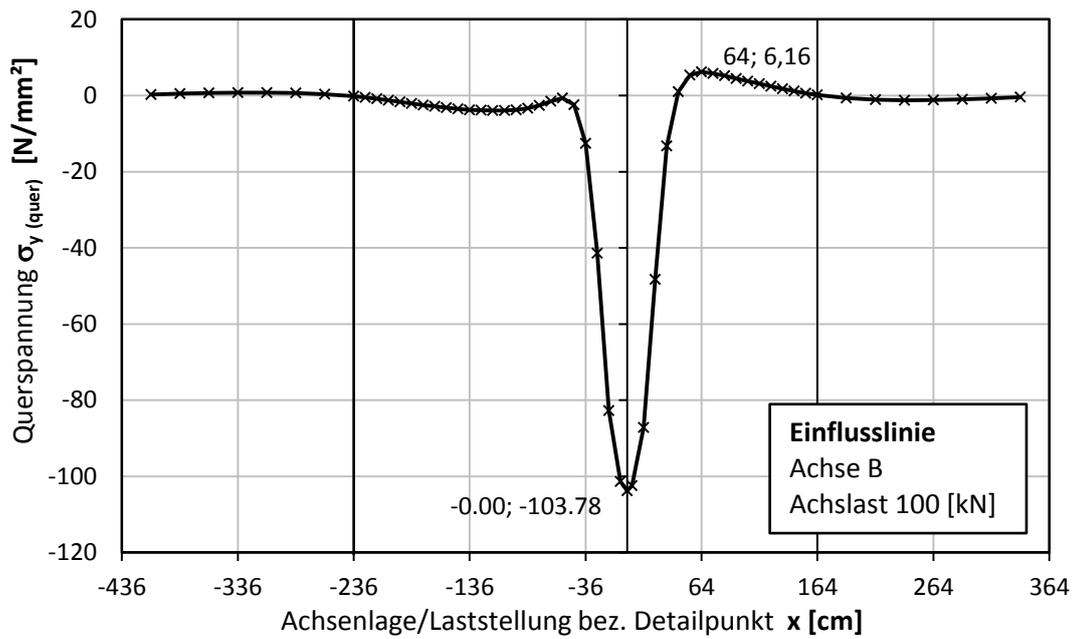


Abbildung 63: Detail D1 - Spannungseinflusslinie aus Achse B [1]

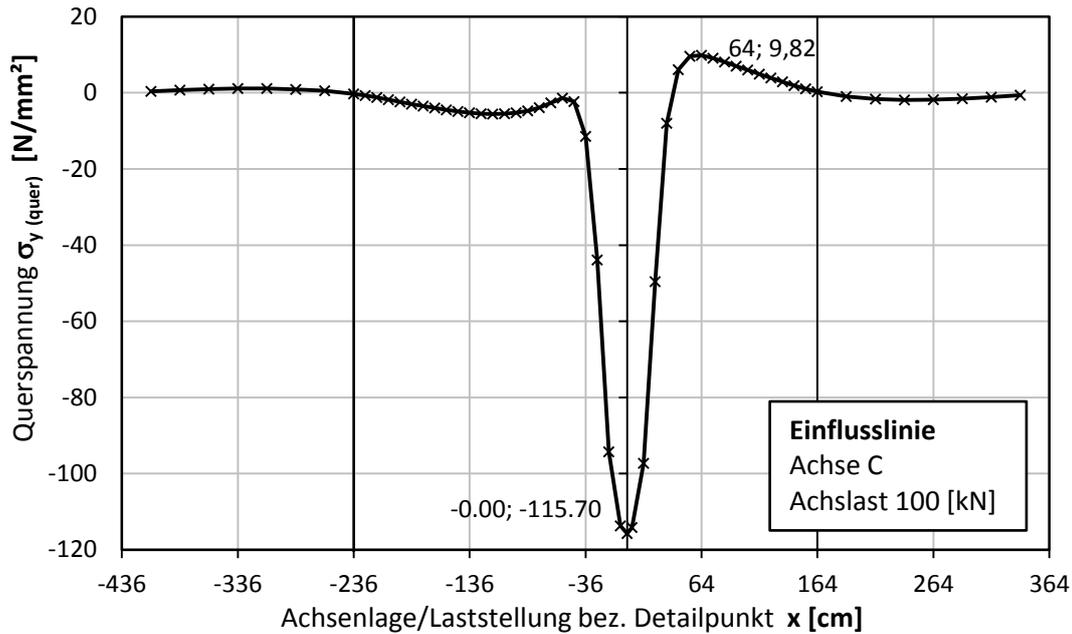


Abbildung 64: Detail D1 - Spannungseinflusslinie aus Achse [1]

Zur Ermittlung des Spannungsspiels aus Ermüdungslastmodell 3 wurde keine Einflusslinie ermittelt, sondern vereinfacht nur die Laststellung mit der größten Spannung betrachtet. Die Radlast aus dem Ermüdungslastmodell 3 liegt hier direkt über dem Detailpunkt D1, wobei der Schwerpunkt der Flächenlast mittig über der Schweißnaht liegt. Nach Ablesen der Spannungen und Extrapolation auf die Strukturspannung am Nahrand der Kehlnaht, wie zu Beginn von Kapitel A.3.1 beschrieben, wurde diese Spannung als Spannungsspiel für das Ermüdungslastmodell 3 angenommen, welches gleichzeitig das Einstufenkollektiv darstellt.

$$\sigma_1 = 95,64 \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right], \sigma_2 = 84,41 \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right] \quad (\sigma_1 \text{ und } \sigma_2 \text{ siehe Abbildung 61})$$

$$\sigma_{HS} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{0,6} * 0,4 + \sigma_1 = \frac{95,64 - 84,41}{0,6} * 0,4 + 95,64 = \mathbf{103,13} \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right] = \sigma_{ELM3} = \Delta \sigma_{ELM3,D1}$$

A.3.2 Detail D2 – Spannungseinflusslinien aus Einheitsachslasten

Aus den Einflusslinien in den Abbildungen 65 bis 68 erkennt man die beiden Spannungsspiele, welche jeweils ein Maximum im Detailpunkt hervorrufen, wenn das betreffende Rad der Achse in einem Abstand von 80 cm zum Detailpunkt mittig über der Längsrippe steht. In den nachfolgenden Abbildungen 65 bis 68 sind darüber hinaus die Querträger durch dickere vertikale Linien bei $x = -200$ und 200 cm gekennzeichnet. Zur Berechnung der Einflusslinien wurde eine Einheitslast mit 100 kN angesetzt.

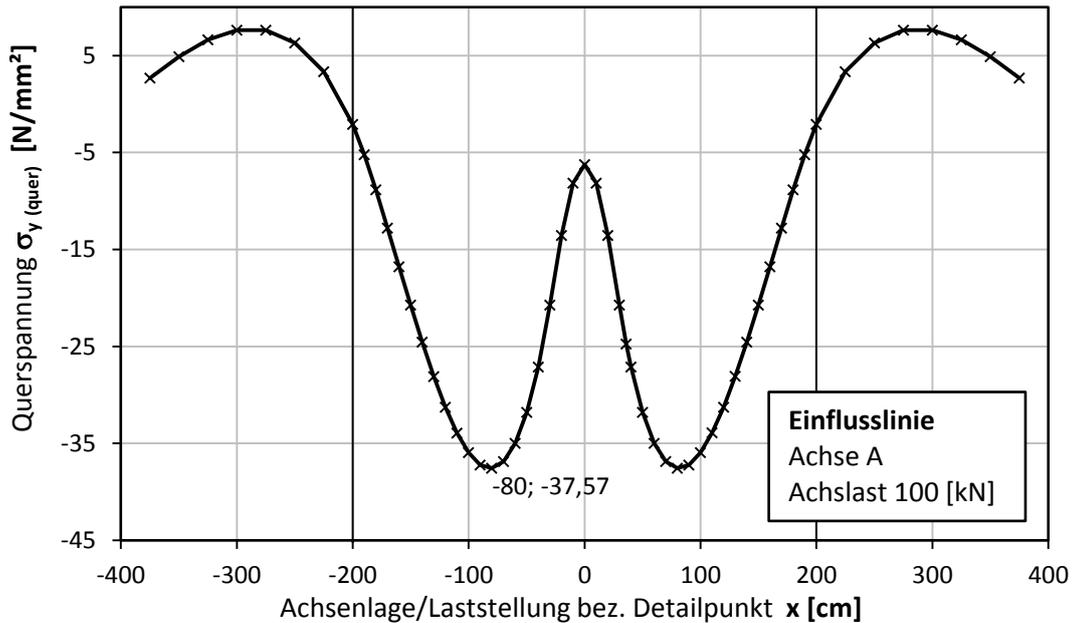


Abbildung 65: Detail D2 - Spannungseinflusslinie aus Achse A [1]

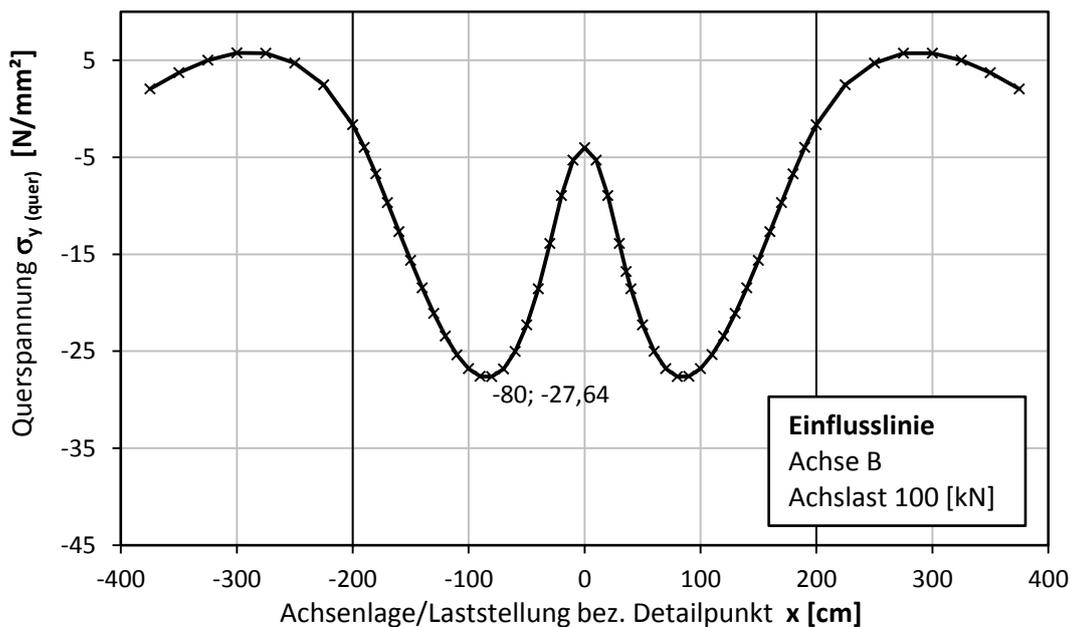


Abbildung 66: Detail D2 - Spannungseinflusslinie aus Achse B [1]

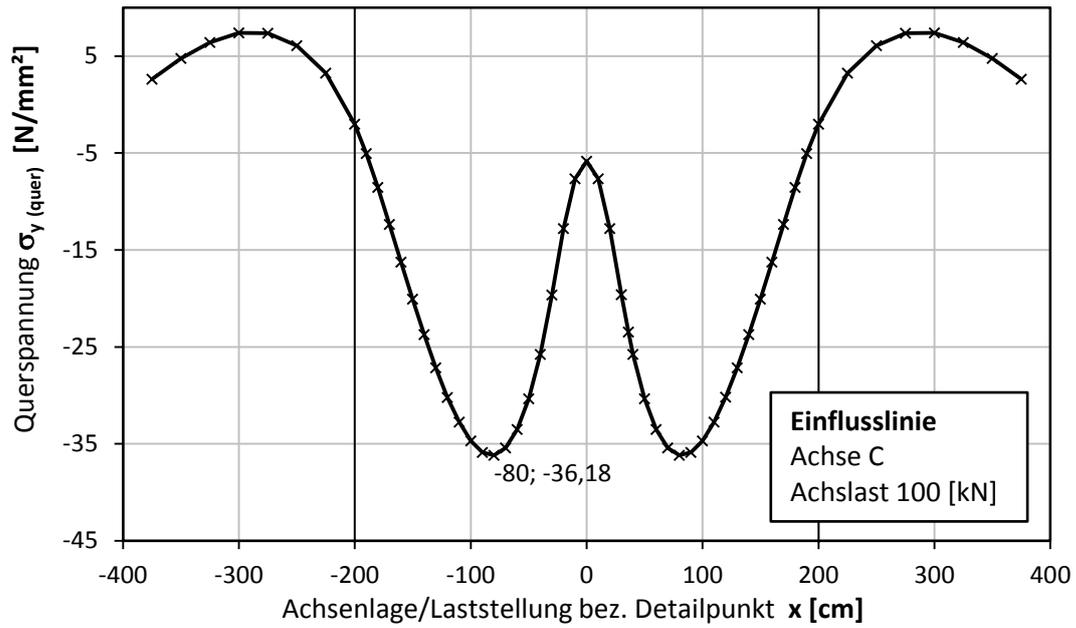


Abbildung 67: Detail D2 - Spannungseinflusslinie aus Achse C [1]

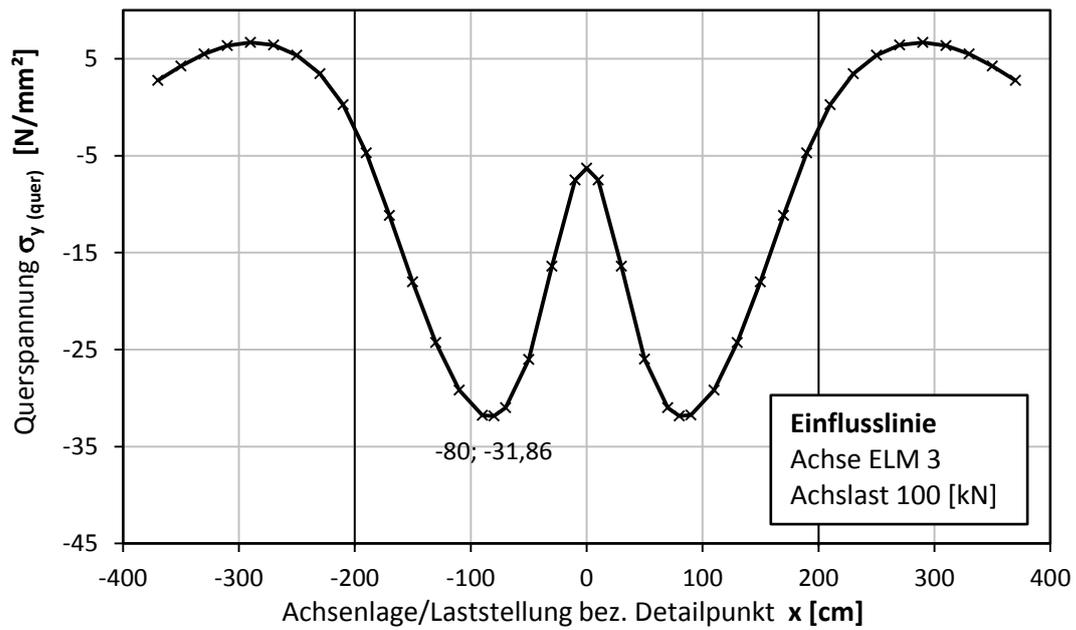


Abbildung 68: Detail D2 – Spannungseinflusslinie aus Achse ELM 3

A.4 Ermittlung der Lastkollektive

Für Detail D1 sowie D2 (siehe Abschnitt A.2.6) wurden die Spannungsschwingspiele $\Delta\sigma$ mit Hilfe der Reservoirmethode laut EN 1993-1-9 Bild A.1 c) ausgezählt.

A.4.1 Detail D1 – Spannungsverläufe und Lastspiele aus ELM 4

Die Ermittlung der Lastkollektive erfolgte je Schwerverkehrstyp mit dem Programm Microsoft Excel. Dabei wurden die Einflusslinien der einzelnen Achsen überlagert, um den Spannungsverlauf der Überfahrt des jeweiligen Fahrzeugs zu erhalten (siehe Abbildung 69).

A.4.1.1 Schwerverfahrzeug Typ T1

Für die Achsen des LKW Typ T1 wird die Berechnung der Spannungsverlauf beispielhaft für einen Punkt geführt. Die restlichen Punkte ergeben sich analog dazu. (vgl. Abbildung 69)

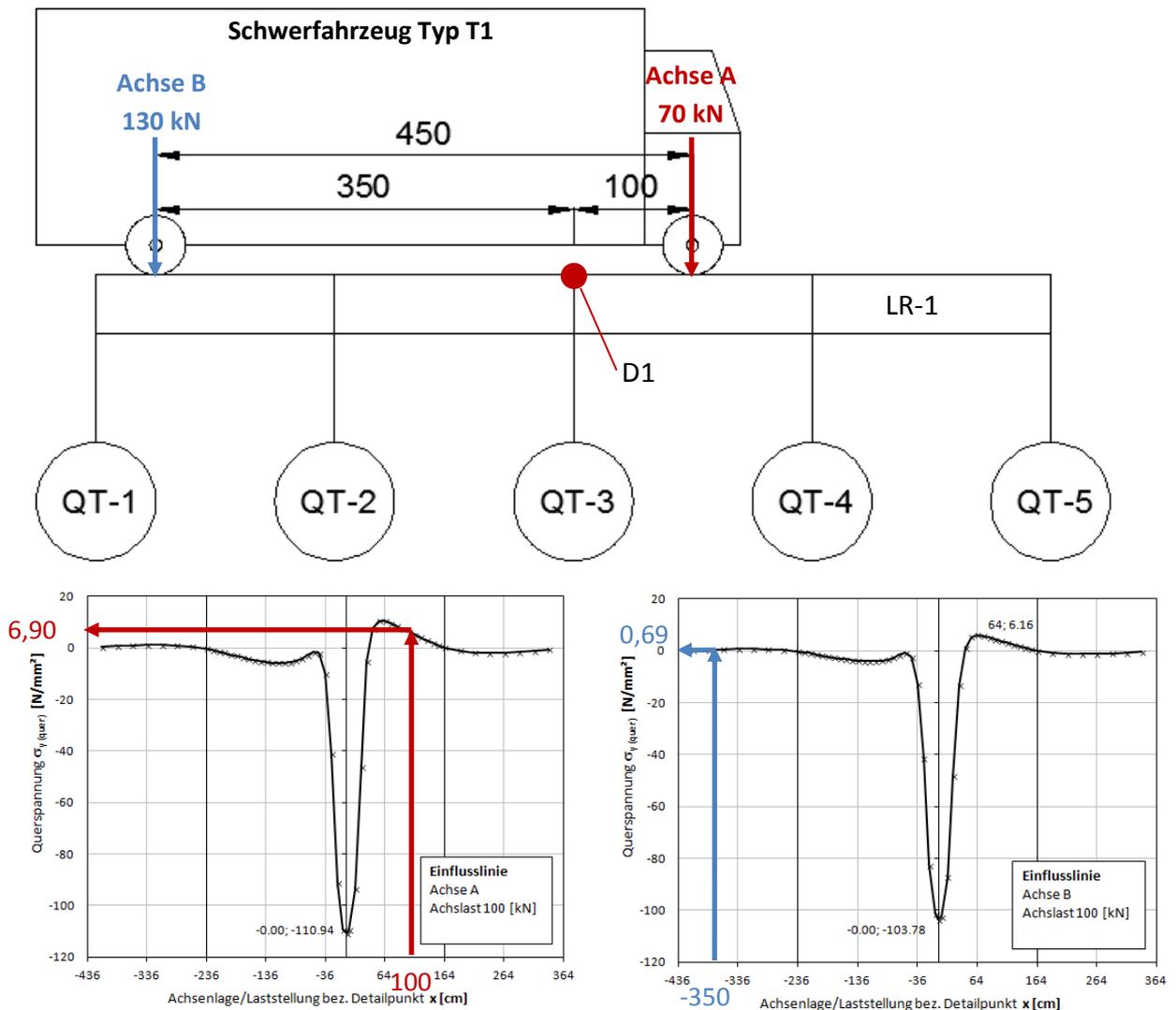


Abbildung 69: Detail D1 – Berechnung des Spannungsverlaufs für das Fahrzeug Typ T1

$$\sigma_{A,x=100} = 6,90 \left[\frac{N}{mm^2} \right], \sigma_{B,x=-350} = 0,69$$

$$\sigma_{Det,x=100} = 6,90 \left[\frac{N}{mm^2} \right] * \frac{70}{100} + 0,69 \left[\frac{N}{mm^2} \right] * \frac{130}{100} = 5,72 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

Die Darstellung der Einflusslinie für den Schwerfahrzeugstyp T1 (siehe Abbildung 70) zeigt die Spannungswerte des Detailpunktes D1, wobei die x-Achse den Abstand x von der ersten Achse des Fahrzeugs bis zum Detailpunkt D1 darstellt. Im oben vorgerechneten Fall beträgt der x-Abstand der ersten Achse zum Detailpunkt 100 cm, somit ist die Aufstellung des Fahrzeugs klar und der Spannungsverlauf für die Überfahrt von T1 kann berechnet werden.

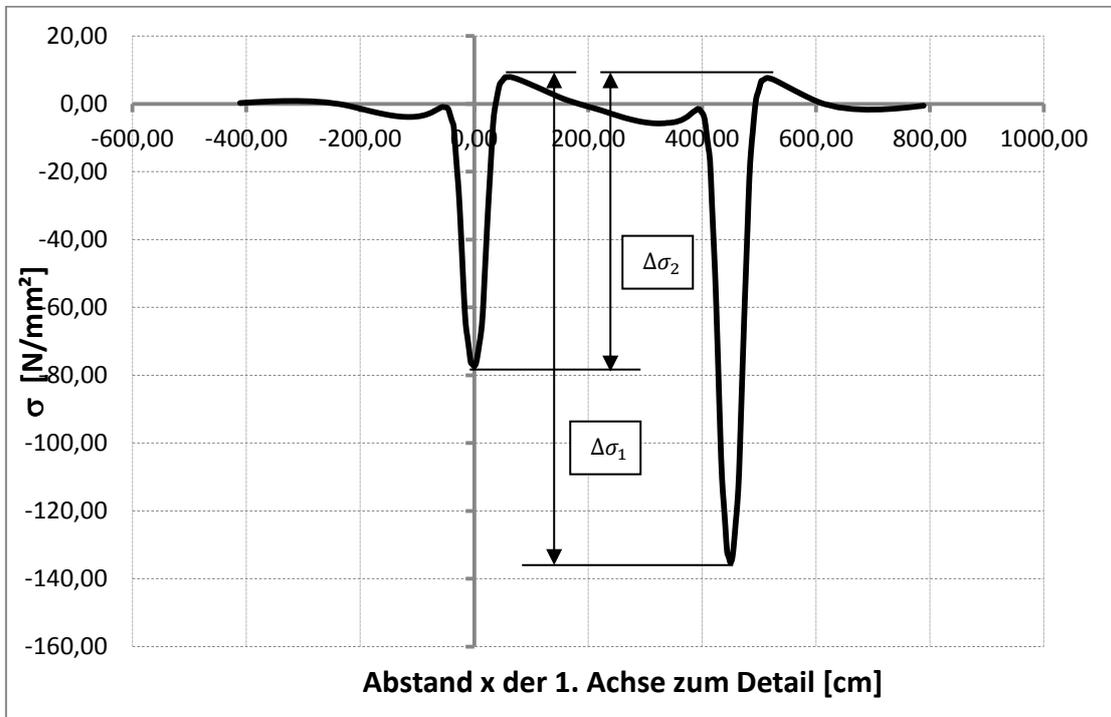


Abbildung 70: Detail D1 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T1 [1]

Für den Fahrzeugtyp können nun die Spannungsspiele $\Delta\sigma_i$ aus dem Diagramm des Spannungsverlaufs abgelesen werden, wobei sehr kleine Spannungsspiele nicht berücksichtigt wurden. Diese Vorgehensweise wurde für sämtliche Fahrzeugtypen analog durchgeführt (siehe Abbildungen 70 bis 79 sowie Tabellen 11 bis 20). In Tabelle 11 sind die Spannungsspiele für Fahrzeugtyp T1 zusammengefasst.

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	143,21	20
$\Delta\sigma_2$	84,98	20

Tabelle 11: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T1

A.4.1.2 Schwerfahrzeug Typ T2

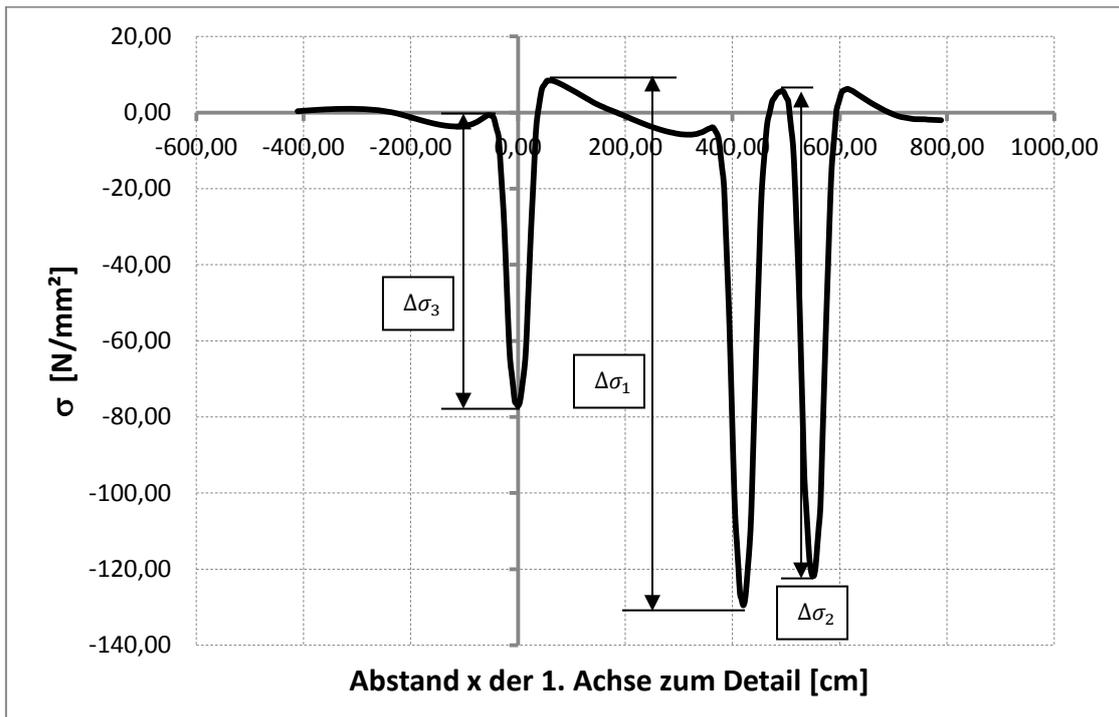


Abbildung 71: Detail D1 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T2 [1]

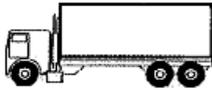
		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	137,95	5
$\Delta\sigma_2$	127,47	5
$\Delta\sigma_3$	76,41	5

Tabelle 12: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeug T2

A.4.1.3 Schwerfahrzeug Typ T3

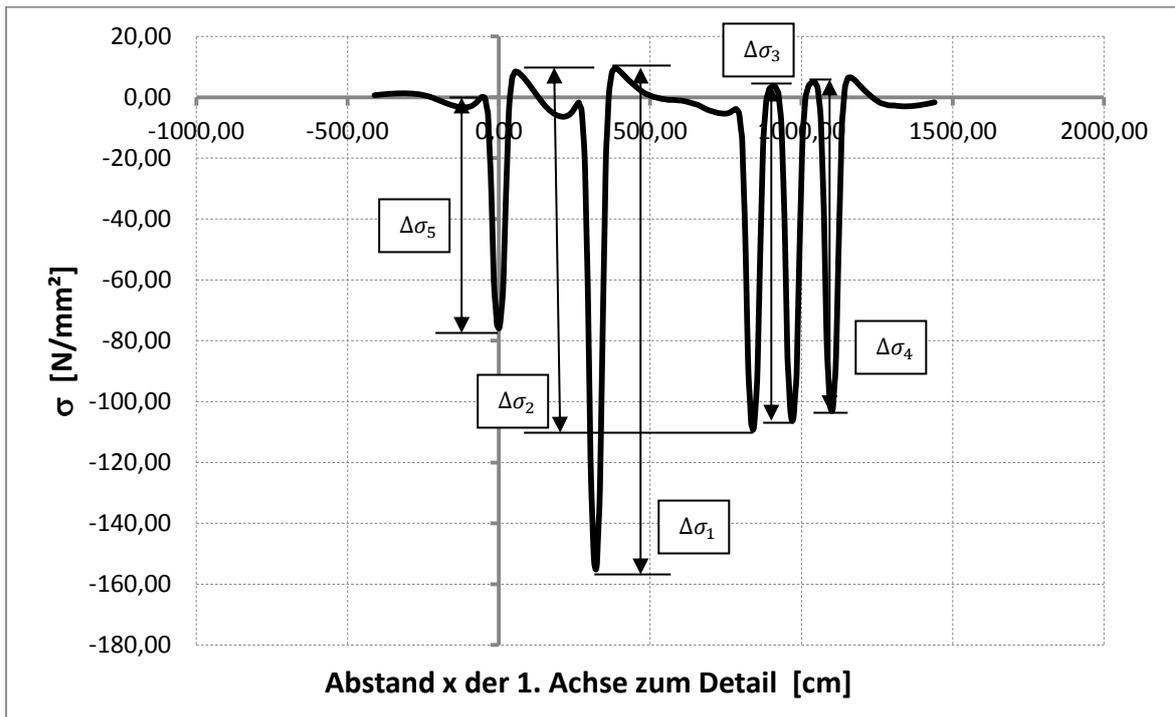


Abbildung 72: Detail D1 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T3 [1]

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	164,77	50
$\Delta\sigma_2$	117,78	50
$\Delta\sigma_3$	109,90	50
$\Delta\sigma_4$	108,20	50
$\Delta\sigma_5$	76,23	50

Tabelle 13: Detail D1 - Lastspiele des Schwerfahrzeugs T3

A.4.1.4 Schwerfahrzeug Typ T4

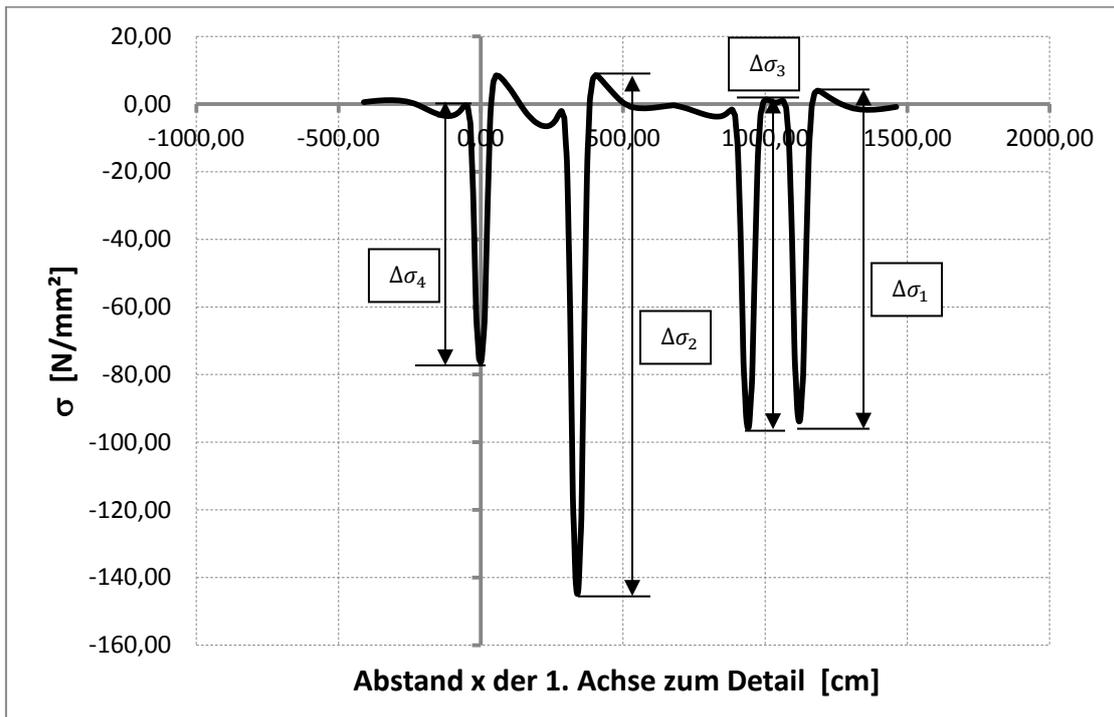


Abbildung 73: Detail D1 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T4 [1]

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	97,81	15
$\Delta\sigma_2$	153,35	15
$\Delta\sigma_3$	94,65	15
$\Delta\sigma_4$	75,97	15

Tabelle 14: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T4

A.4.1.5 Schwerfahrzeug Typ T5

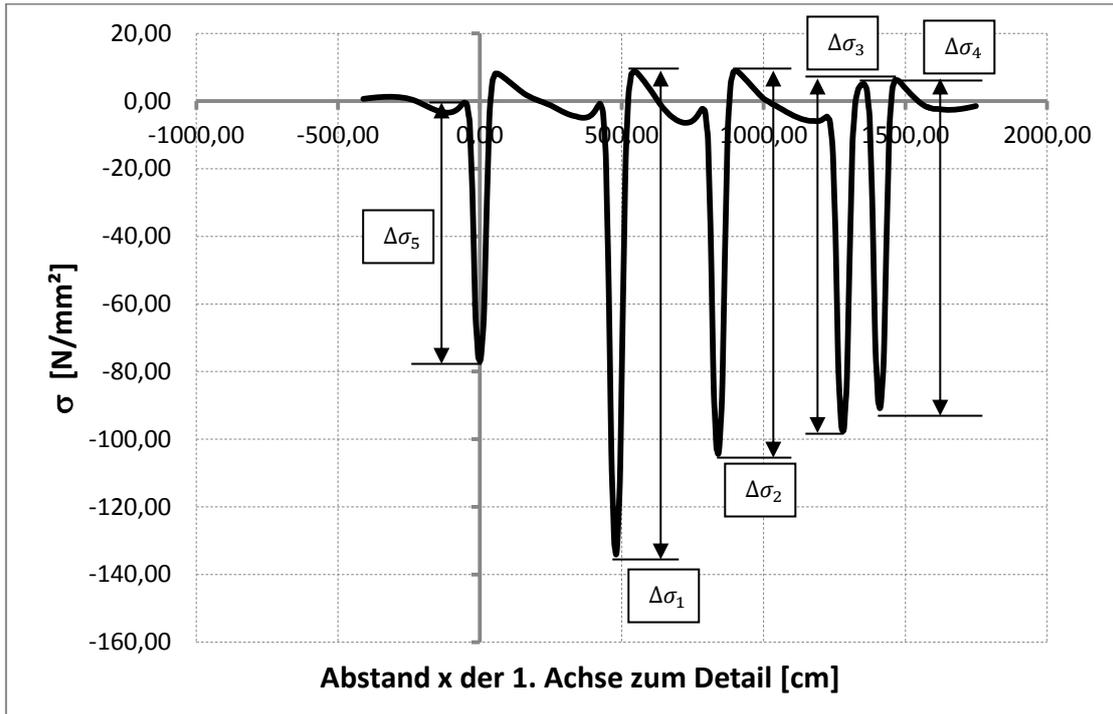


Abbildung 74: Detail D1 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T5 [1]

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	142,91	10
$\Delta\sigma_2$	113,34	10
$\Delta\sigma_3$	103,87	10
$\Delta\sigma_4$	95,98	10
$\Delta\sigma_5$	76,43	10

Tabelle 15: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T5

A.4.2 Detail D1 – Spannungsverläufe und Lastspiele aus ELM 4_mod

Für das Ermüdungslastmodell 4_mod sind in den Abbildungen 75 bis 79 die Spannungsverläufe je Fahrzeugstyp und zugehörig in den Tabellen 16 bis 20 die ermittelten Lastspiele dargestellt (vgl. Abschnitt 2.2).

A.4.2.1 Schwerfahrzeug Typ T1

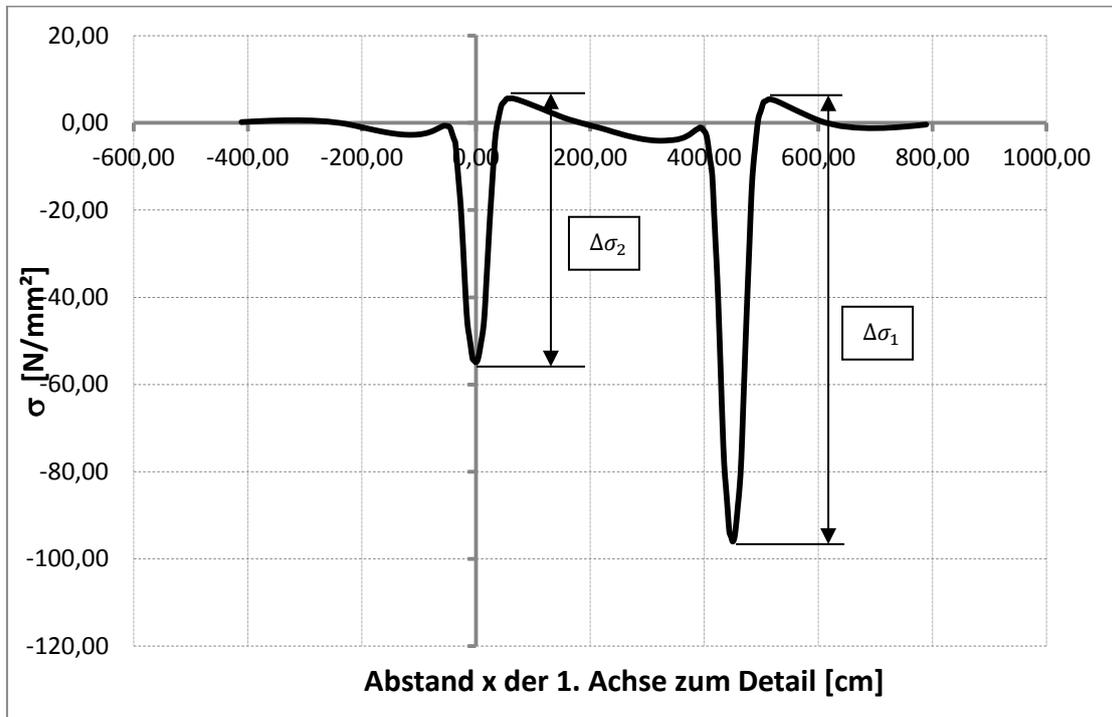


Abbildung 75: Detail D1 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T1 [1]

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{\text{mm}^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	101,68	20
$\Delta\sigma_2$	54,27	20

Tabelle 16: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T1

A.4.2.2 Schwerfahrzeug Typ T2

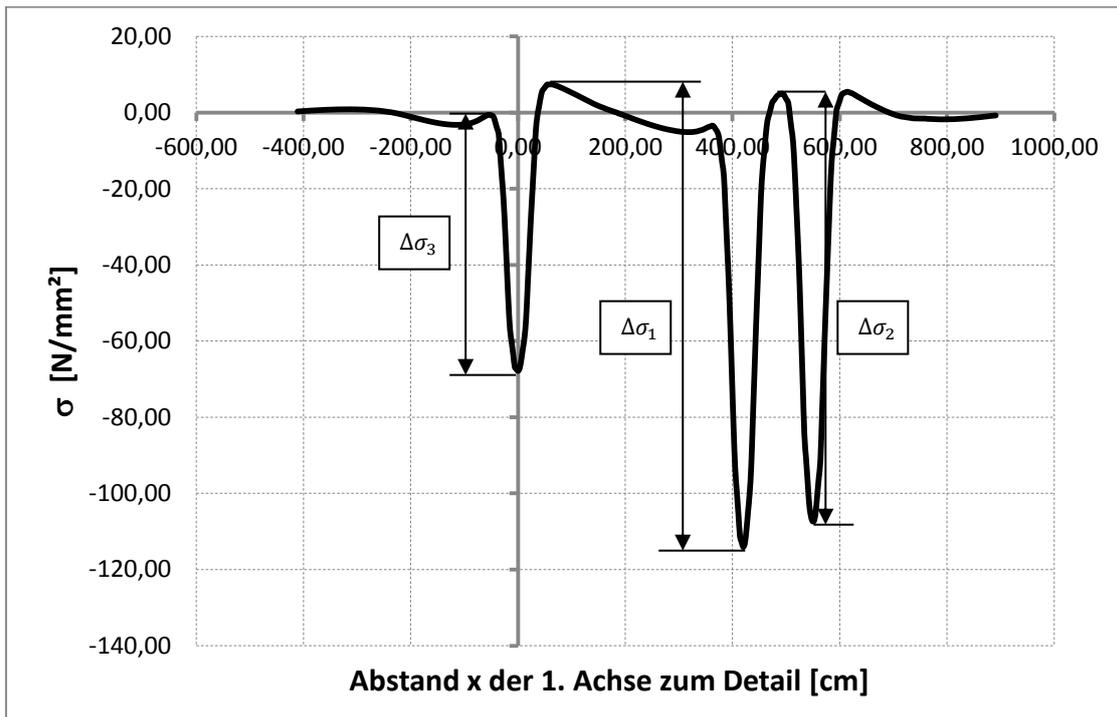


Abbildung 76: Detail D1 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T2 [1]

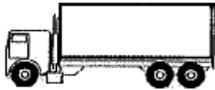
		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	121,50	5
$\Delta\sigma_2$	112,28	5
$\Delta\sigma_3$	67,24	5

Tabelle 17: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T2

A.4.2.3 Schwerfahrzeug Typ T3

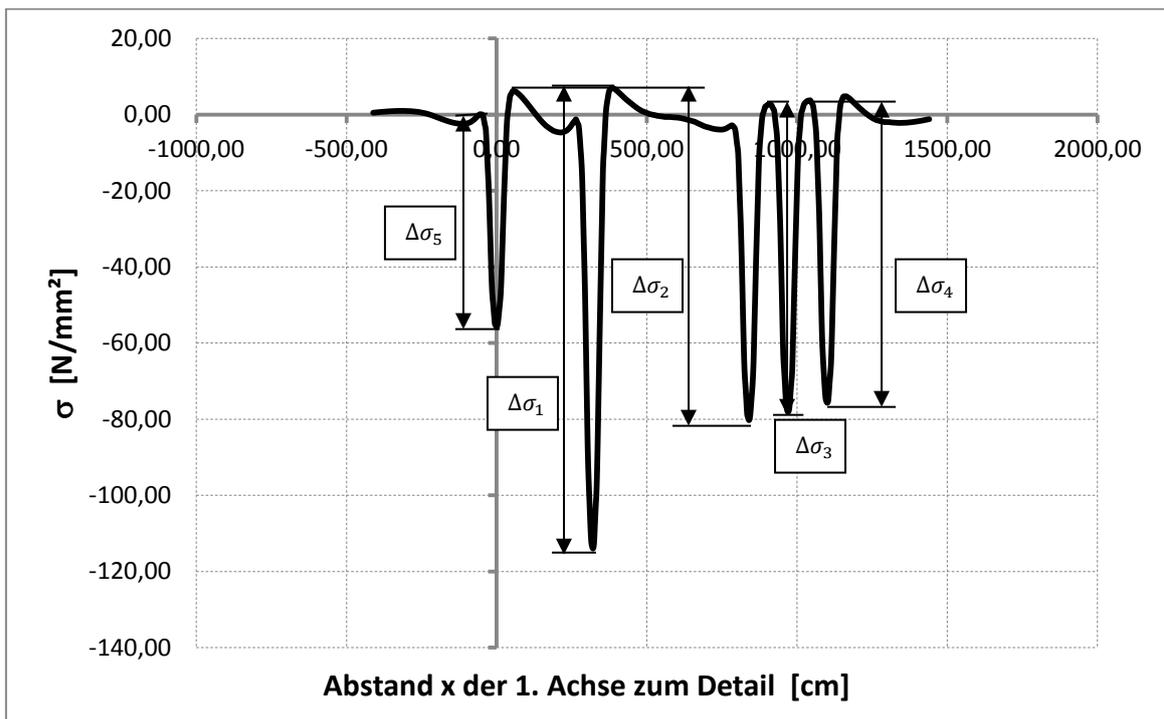


Abbildung 77: Detail D1 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T3 [1]

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	121,05	50
$\Delta\sigma_2$	86,50	50
$\Delta\sigma_3$	80,71	50
$\Delta\sigma_4$	79,46	50
$\Delta\sigma_5$	55,97	50

Tabelle 18: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T3

A.4.2.4 Schwerfahrzeug Typ T4

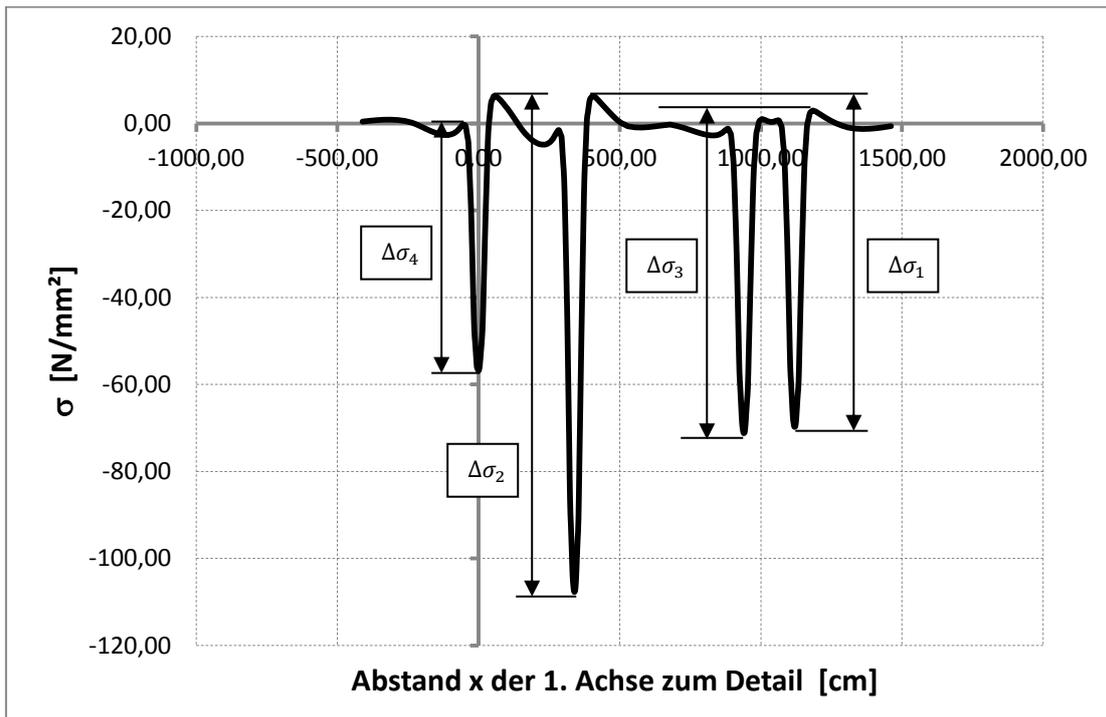


Abbildung 78: Detail D1 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T4 [1]

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	76,09	15
$\Delta\sigma_2$	113,99	15
$\Delta\sigma_3$	64,84	15
$\Delta\sigma_4$	56,55	15

Tabelle 19: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T4

A.4.2.5 Schwerfahrzeug Typ T5

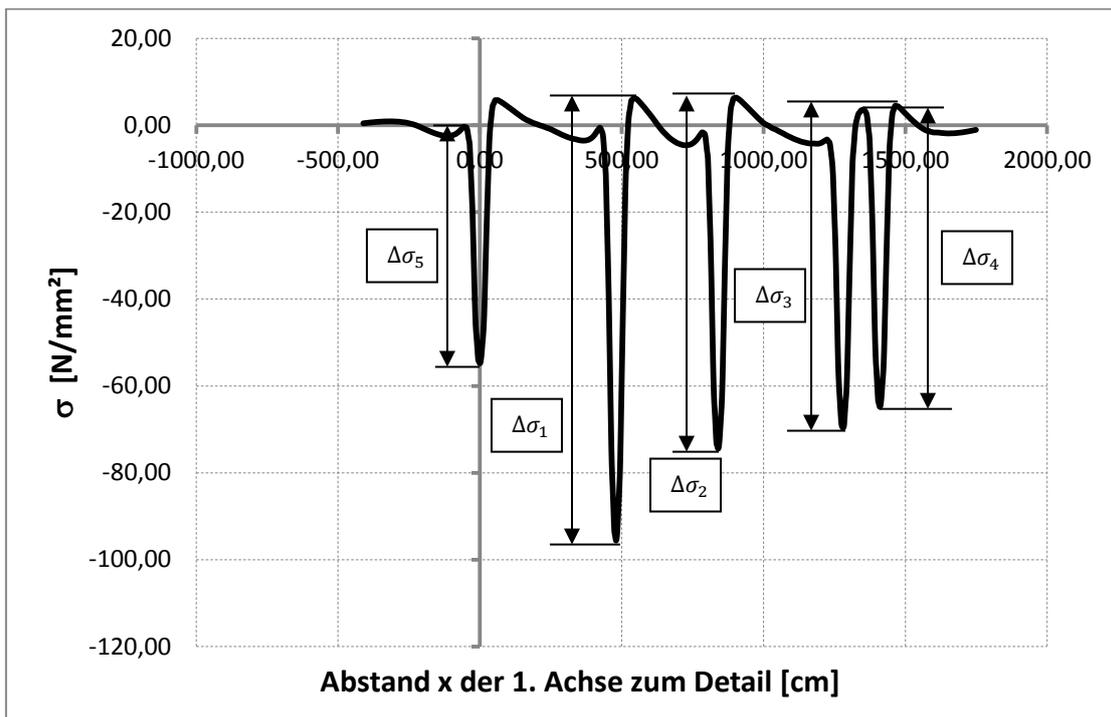


Abbildung 79: Detail D1 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T5 [1]

		
$\Delta\sigma_i$	N [$\frac{N}{mm^2}$]	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	101,91	10
$\Delta\sigma_2$	80,85	10
$\Delta\sigma_3$	74,14	10
$\Delta\sigma_4$	68,51	10
$\Delta\sigma_5$	54,48	10

Tabelle 20: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T5

A.4.3 Detail D2 – Spannungsverläufe und Lastspiele aus ELM 4

Die Ermittlung der Lastkollektive erfolgte je Schwerverkehrstyp mit dem Programm Microsoft Excel. Dabei wurden die Einflusslinien der einzelnen Achsen überlagert, um den Spannungsverlauf des jeweiligen Fahrzeugs zu erhalten. (siehe Abbildung 80)

A.4.3.1 Schwerverfahrzeug Typ T1

Für die Achsen des LKW Typ T1 wird die Berechnung des Spannungsverlaufs beispielhaft (vgl. Abbildung 80) wie in Abschnitt B.4.1.1 für einen Punkt geführt. Die Spannungsverläufe der restlichen Typen ergeben sich analog dazu.

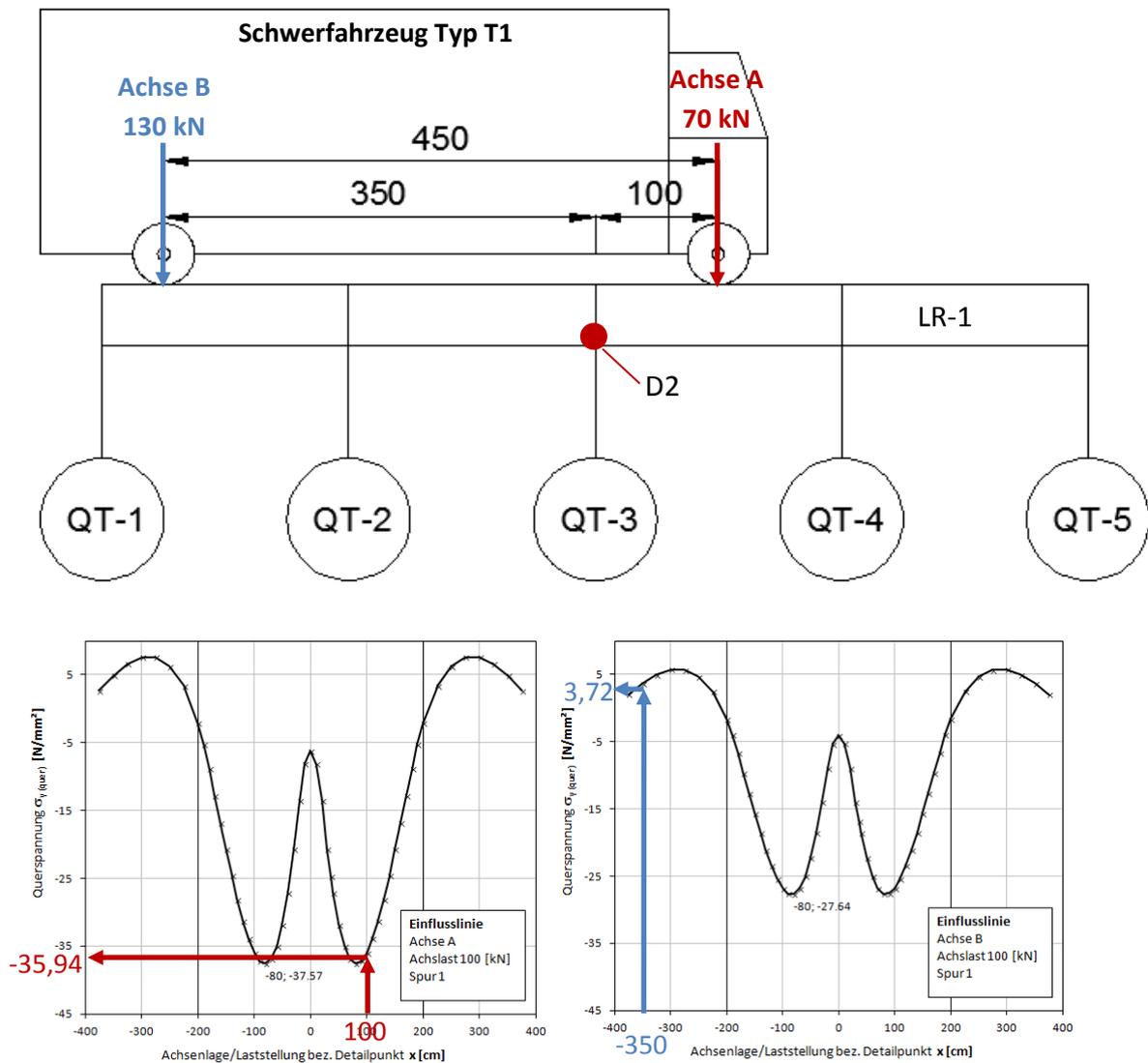


Abbildung 80: Detail D2 – Berechnung des Spannungsverlaufs für Fahrzeug Typ T1

$$\sigma_{A,x=100} = -35,94 \left[\frac{N}{mm^2} \right], \sigma_{B,x=-350} = 3,72$$

$$\sigma_{Det,x=100} = -35,94 \left[\frac{N}{mm^2} \right] * \frac{70}{100} + 3,72 \left[\frac{N}{mm^2} \right] * \frac{130}{100} = -20,30 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

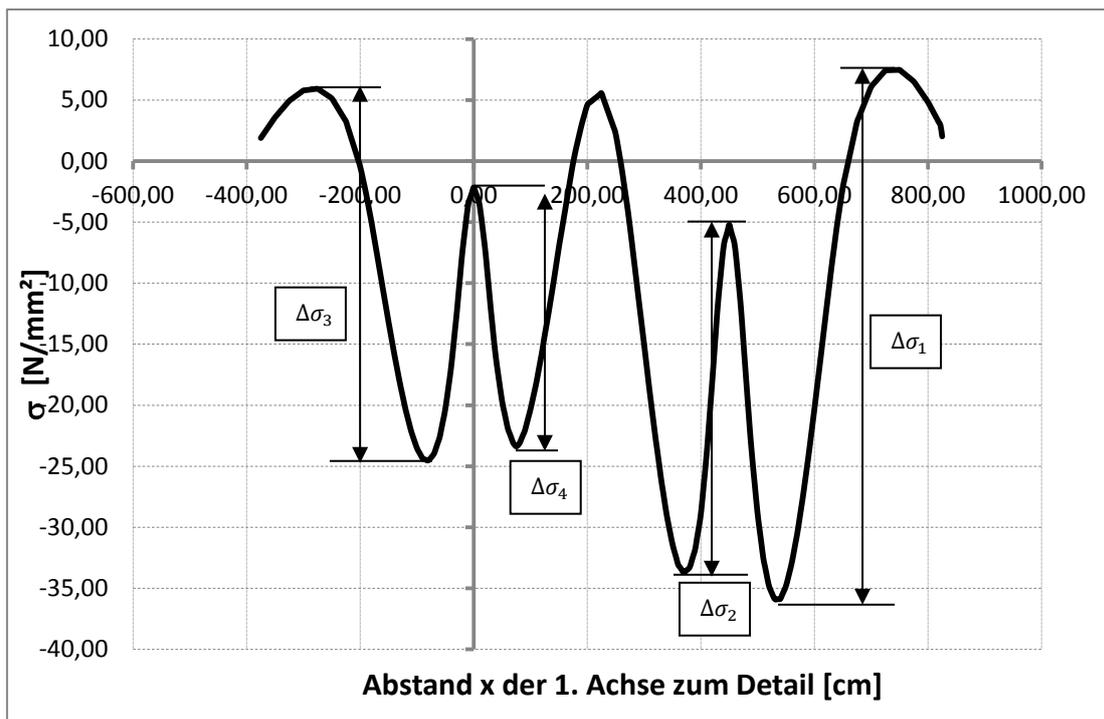


Abbildung 81: Detail D2 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T1 [1]

Für den Fahrzeugtyp können nun die Spannungsspiele $\Delta\sigma_i$ aus dem Diagramm der Einflusslinie abgelesen werden, wobei sehr kleine Spannungsspiele nicht berücksichtigt wurden. Diese Vorgehensweise ist bei den restlichen Fahrzeugtypen analog. (siehe Abbildungen 81 bis 91 sowie Tabellen 21 bis 30).

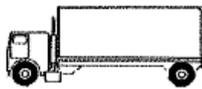
		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	n_i
$\Delta\sigma_1$	43,39	20
$\Delta\sigma_2$	28,45	20
$\Delta\sigma_3$	30,46	20
$\Delta\sigma_4$	21,23	20

Tabelle 21: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T1

A.4.3.2 Schwerfahrzeug Typ T2

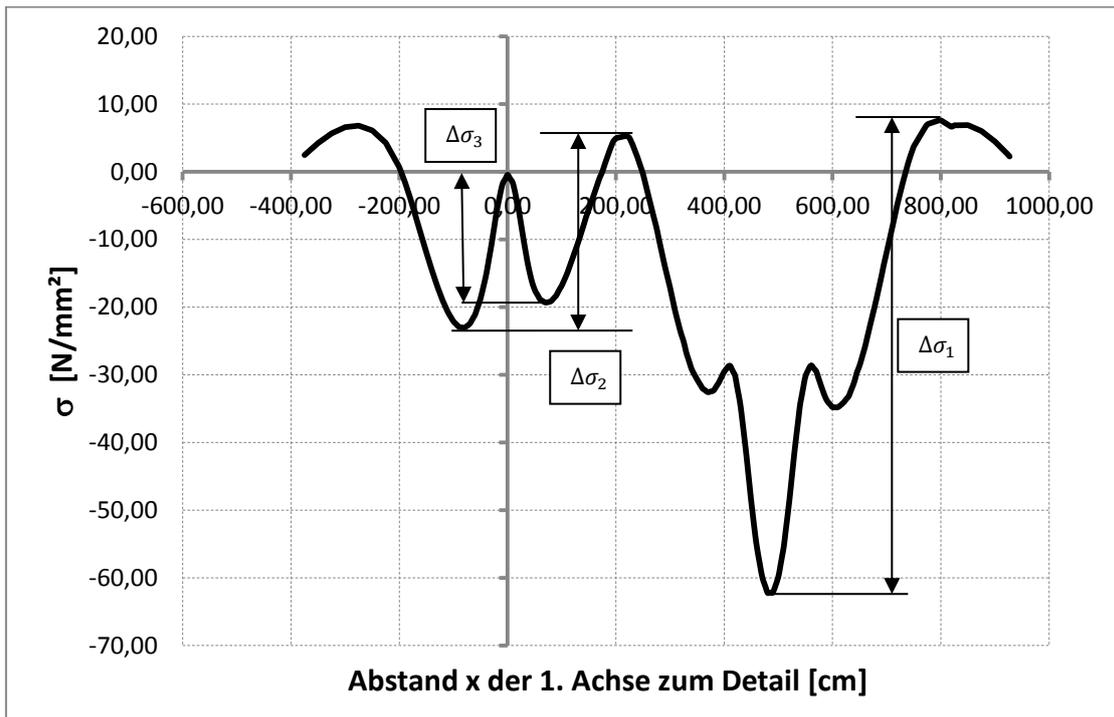


Abbildung 82: Detail D2 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T2 [1]

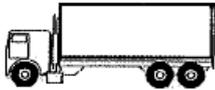
		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	n_i
$\Delta\sigma_1$	69,81	5
$\Delta\sigma_2$	28,38	5
$\Delta\sigma_3$	18,87	5

Tabelle 22: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T2

A.4.3.3 Schwerfahrzeug Typ T3

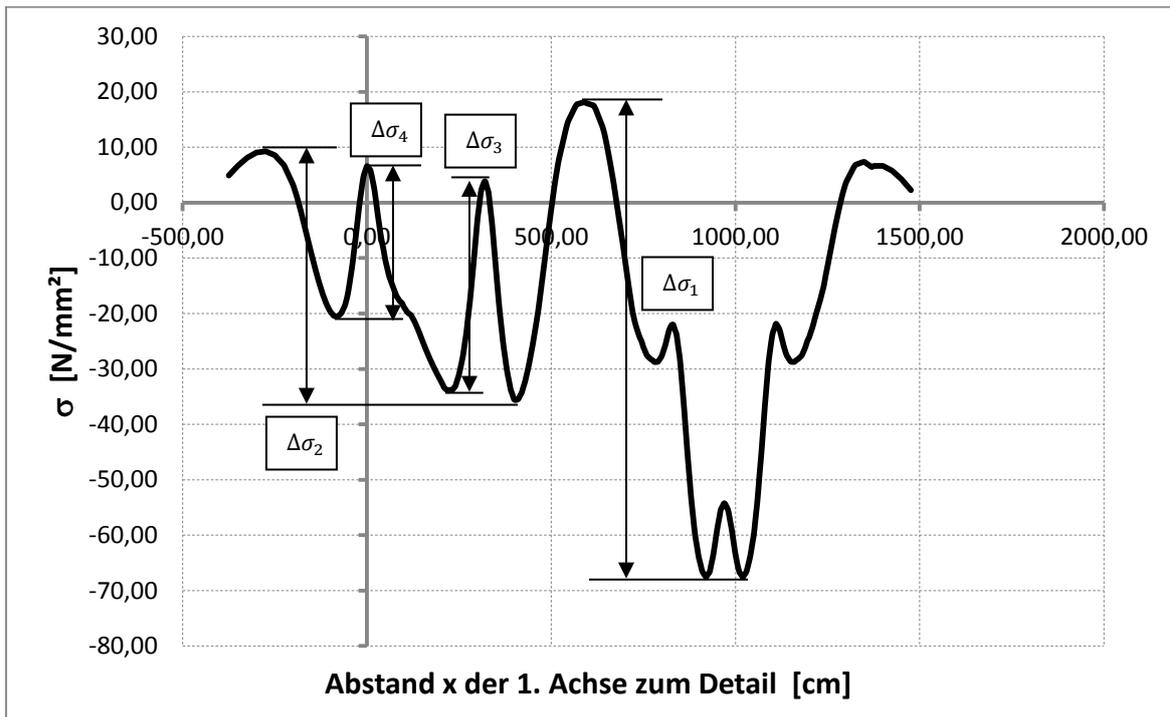


Abbildung 83: Detail D2 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T3 [1]

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	n_i
$\Delta\sigma_1$	85,69	50
$\Delta\sigma_2$	44,89	50
$\Delta\sigma_3$	37,75	50
$\Delta\sigma_4$	27,17	50

Tabelle 23: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T3

A.4.3.4 Schwerfahrzeug Typ T4

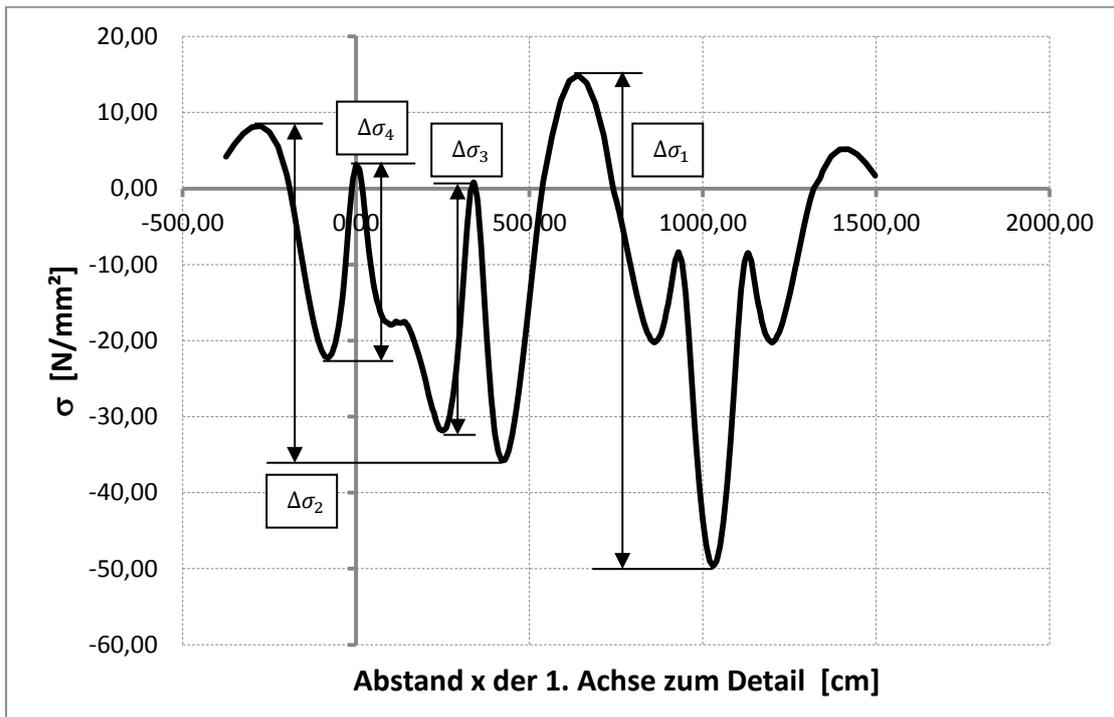


Abbildung 84: Detail D2 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T4 [1]

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	n_i
$\Delta\sigma_1$	64,48	15
$\Delta\sigma_2$	43,98	15
$\Delta\sigma_3$	32,66	15
$\Delta\sigma_4$	25,35	15

Tabelle 24: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T4

A.4.3.5 Schwerfahrzeug Typ T5

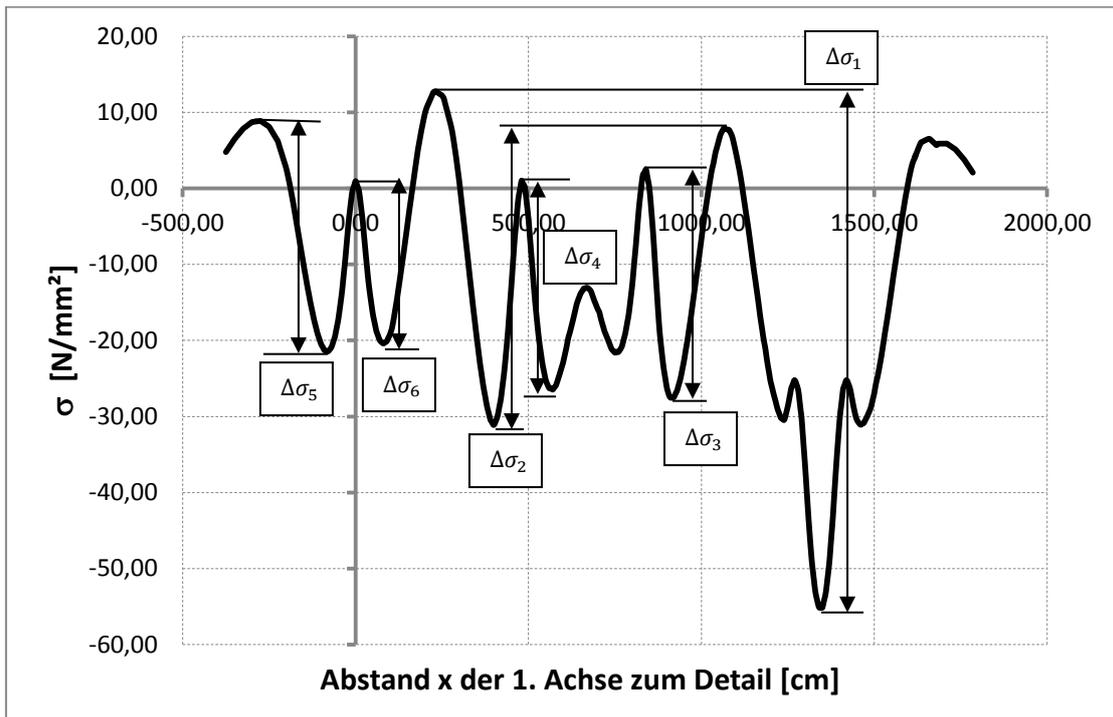


Abbildung 85: Detail D2 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T5 [1]

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{\text{mm}^2}$	n_i
$\Delta\sigma_1$	67,94	10
$\Delta\sigma_2$	39,03	10
$\Delta\sigma_3$	30,03	10
$\Delta\sigma_4$	27,49	10
$\Delta\sigma_5$	30,34	10
$\Delta\sigma_6$	21,36	10

Tabelle 25: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T5

A.4.4 Detail D2 – Spannungsverläufe und Lastspiele aus ELM 4_mod

Für das Ermüdungslastmodell 4_mod sind in den Abbildungen 86 bis 90 die Spannungsverläufe je Fahrzeugstyp und zugehörig in den Tabellen 26 bis 30 die ermittelten Lastspiele dargestellt (vgl. Abschnitt 2.2).

A.4.4.1 Schwerfahrzeug Typ T1

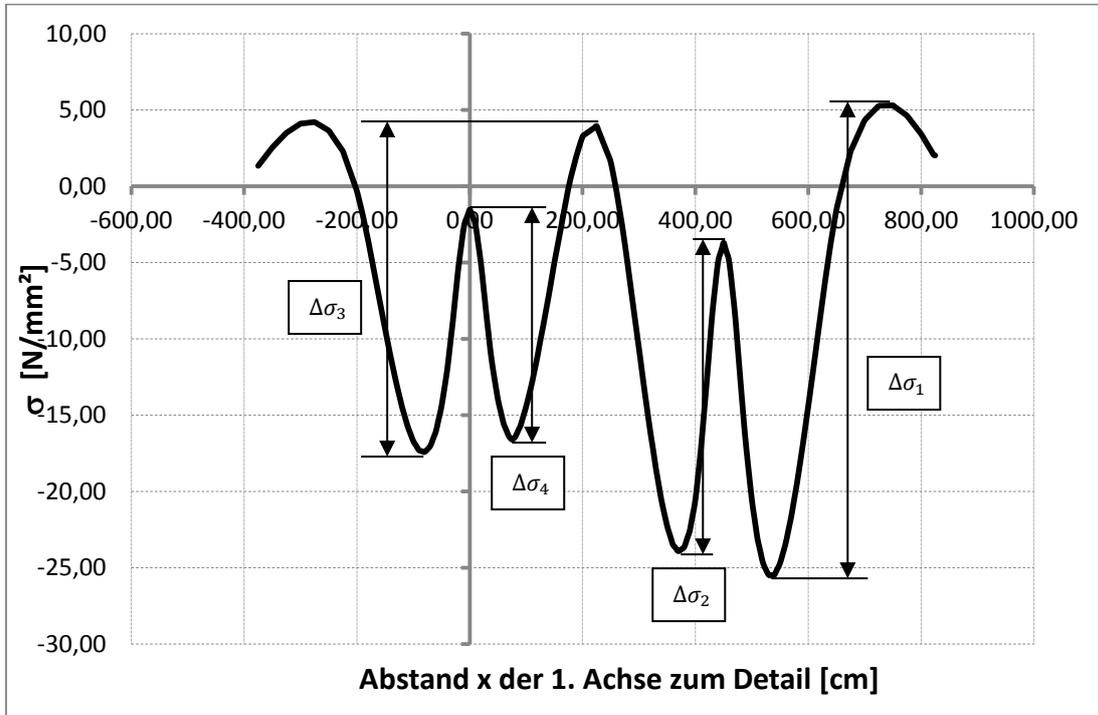


Abbildung 86: Detail D2 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T1 [1]

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{\text{mm}^2}$	n_i
$\Delta\sigma_1$	30,81	20
$\Delta\sigma_2$	20,20	20
$\Delta\sigma_3$	21,63	20
$\Delta\sigma_4$	15,07	20

Tabelle 26: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T1

A.4.4.2 Schwerfahrzeug Typ T2

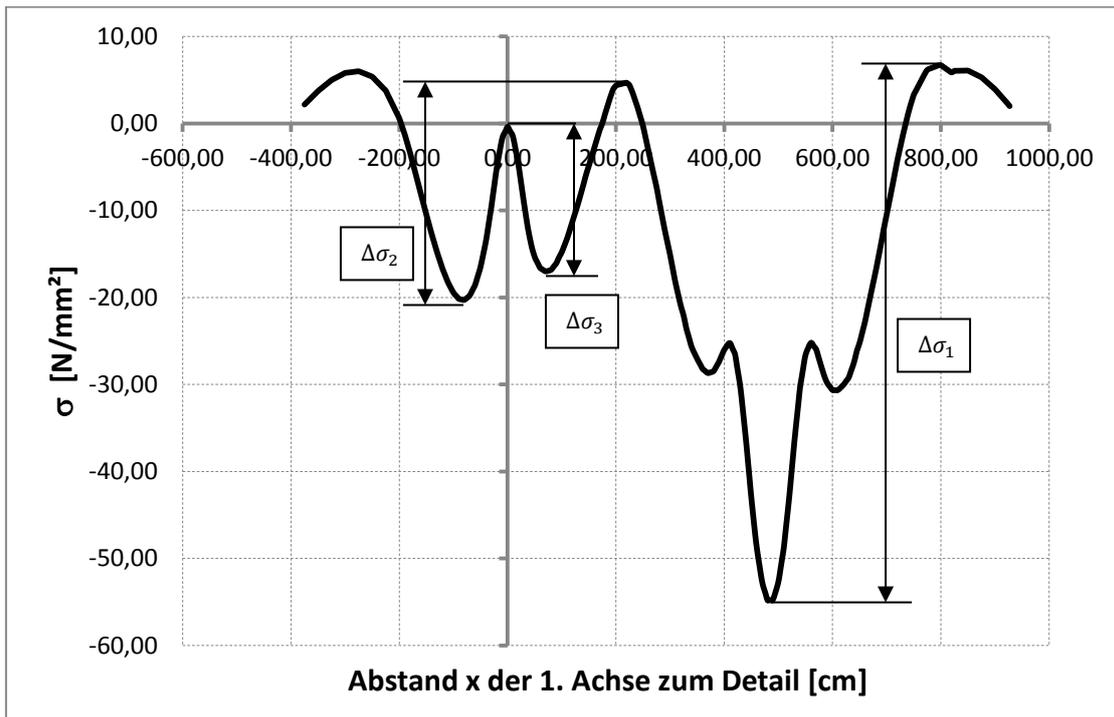


Abbildung 87: Detail D2 – Spannungsverlauf des Schwerfahrzeug Typ T2 [1]

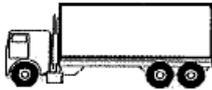
		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	n_i
$\Delta\sigma_1$	61,49	5
$\Delta\sigma_2$	24,97	5
$\Delta\sigma_3$	16,61	5

Tabelle 27: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T2

A.4.4.3 Schwerfahrzeug Typ T3

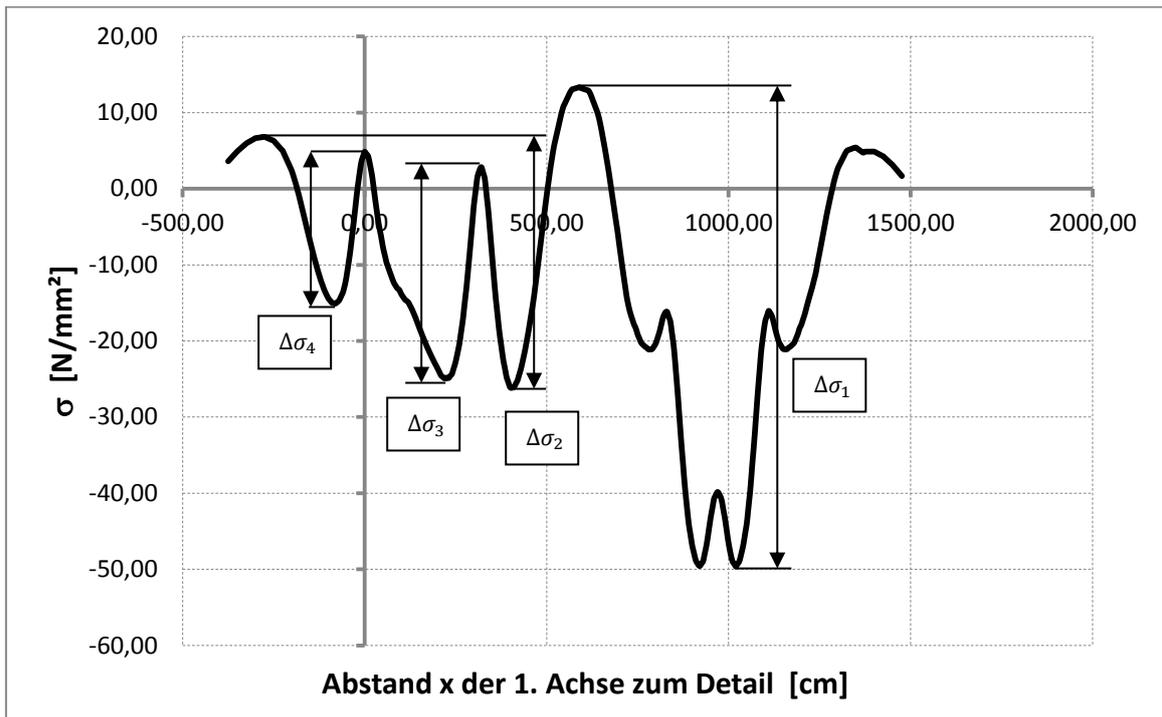


Abbildung 88: Detail D2 - Spannungsverlauf Schwerfahrzeug Typ T3 [1]

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	n_i
$\Delta\sigma_1$	62,94	50
$\Delta\sigma_2$	32,98	50
$\Delta\sigma_3$	27,73	50
$\Delta\sigma_4$	19,95	50

Tabelle 28: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T3

A.4.4.4 Schwerfahrzeug Typ T4

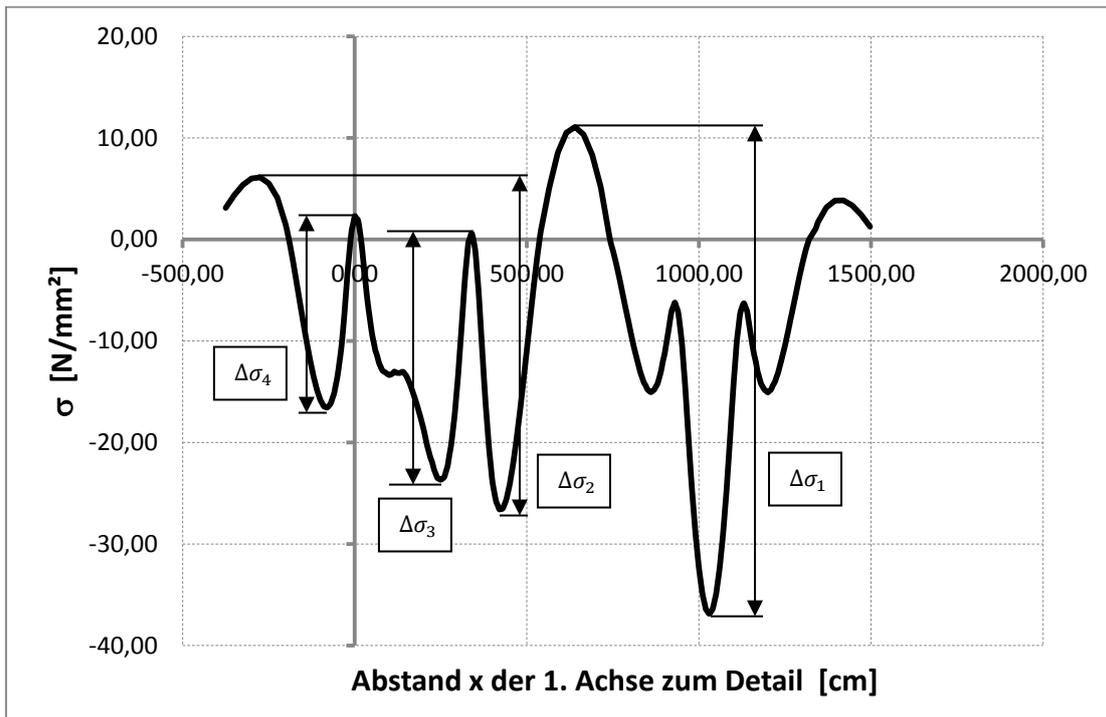


Abbildung 89: DetailD2 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T4 [1]

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	n_i
$\Delta\sigma_1$	47,93	15
$\Delta\sigma_2$	32,71	15
$\Delta\sigma_3$	24,29	15
$\Delta\sigma_4$	18,87	15

Tabelle 29: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T4

A.4.4.5 Schwerfahrzeug Typ T5

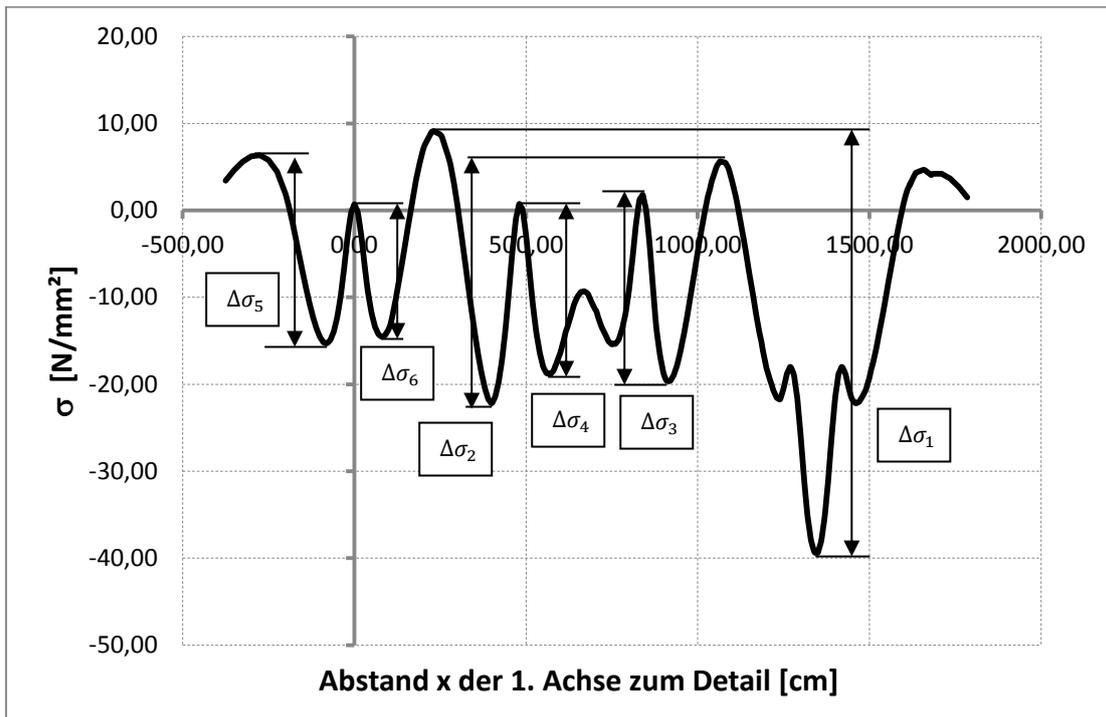


Abbildung 90: Detail D2 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T5 [1]

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	n_i
$\Delta\sigma_1$	48,48	10
$\Delta\sigma_2$	27,83	10
$\Delta\sigma_3$	21,42	10
$\Delta\sigma_4$	19,60	10
$\Delta\sigma_5$	21,63	10
$\Delta\sigma_6$	15,23	10

Tabelle 30: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T5

A.4.4.6 Fahrzeug Typ ELM3

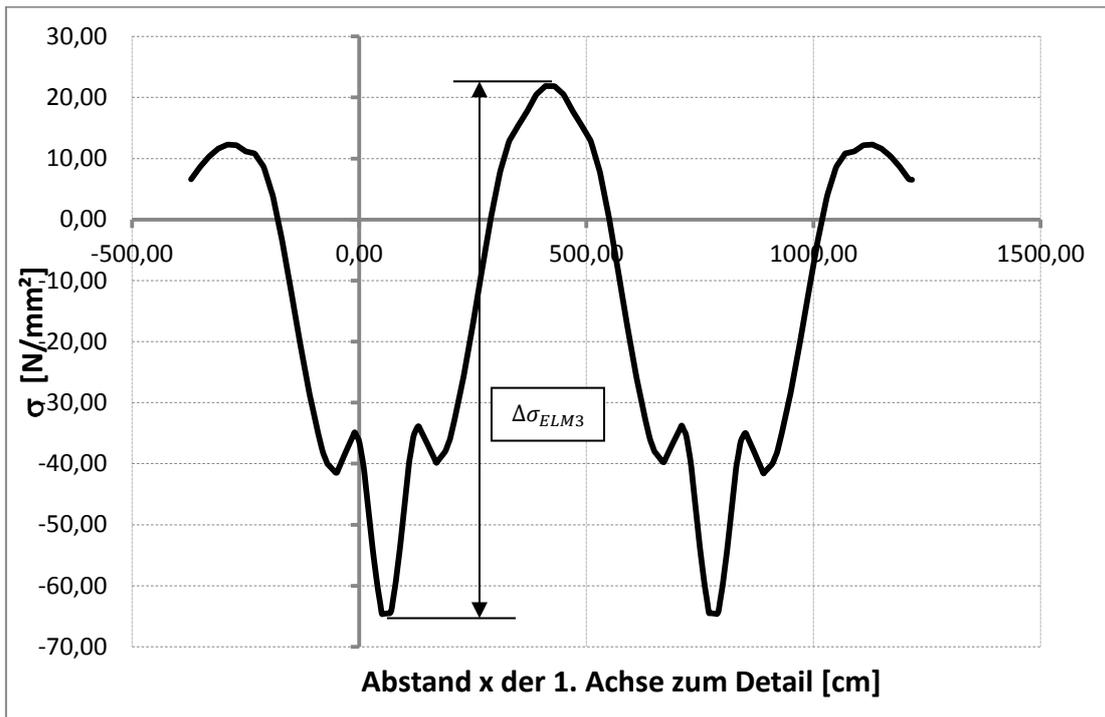


Abbildung 91: Detail D2 – Lastspiel des Fahrzeugs aus ELM3

Für das Ermüdungslastmodell 3 ist nur das maximale Spannungsspiel für die weitere Berechnung maßgebend. Hier ergibt sich $\Delta\sigma_{ELM3,D2} = 86,48 \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$ (siehe Abbildung 91)

A.4.5 Lastkollektiv - Einstufenkollektiv

Nach Berechnung der einzelnen Kollektivteile kann nun für die Detailpunkte D1 und D2 das gesamte Lastkollektiv mit den schädigenden und nicht schädigenden Lastwechseln dargestellt werden. Jedes Lastkollektiv wird für die weitere Verwendung in ein schädigungsäquivalentes Einstufenkollektiv umgerechnet, welches die gleiche schädigende Wirkung wie das Gesamtkollektiv besitzt. In den Abbildungen 92 bis 98 folgt die Darstellung der Lastkollektive für die nach Abbildung 25 untersuchten 5 Lastniveaus, sowie der 2 Grenzfälle $m^* = 3$ und $m^* = 5$ (siehe Abschnitt 4).

A.4.5.1 Detail D1 - Lastkollektive aus ELM 4

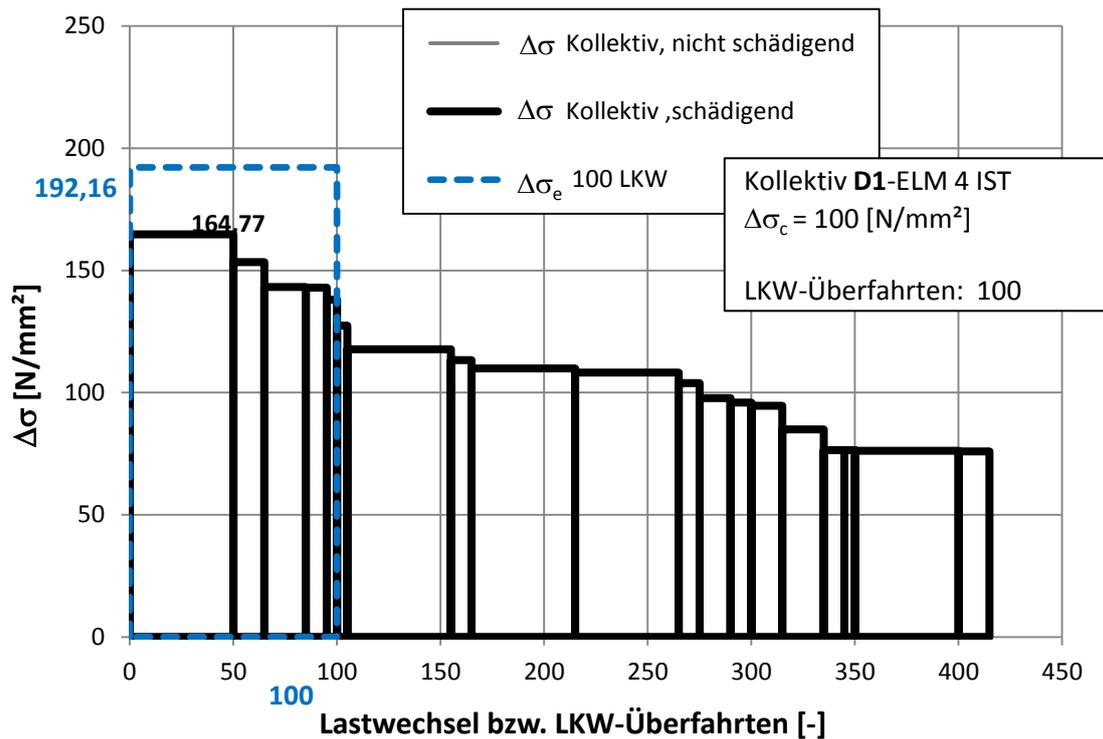


Abbildung 92: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4 IST

Aus dem Lastkollektiv für Detail D1 mit der Belastung aus Ermüdungslastmodell 4 (siehe Abbildung 92) ist erkennbar, dass bezogen auf eine Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c = 100 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$ sämtliche Kollektivteile schädigend wirken. Erst bei einer Verminderung um 50% fallen ein paar als nicht schädigend zur Berechnung von $\Delta\sigma_e$ weg (siehe Abbildung 96). Die nicht schädigenden Kollektivteile sind mit grauen Linien dargestellt.

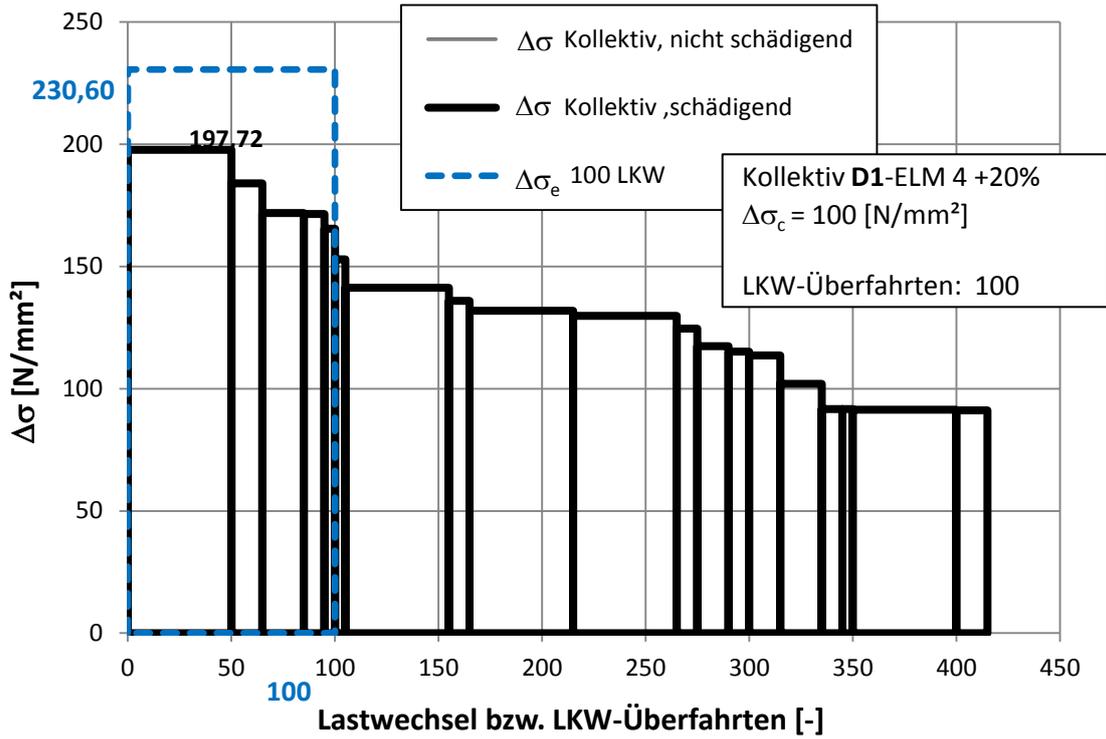


Abbildung 93: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4 +20%

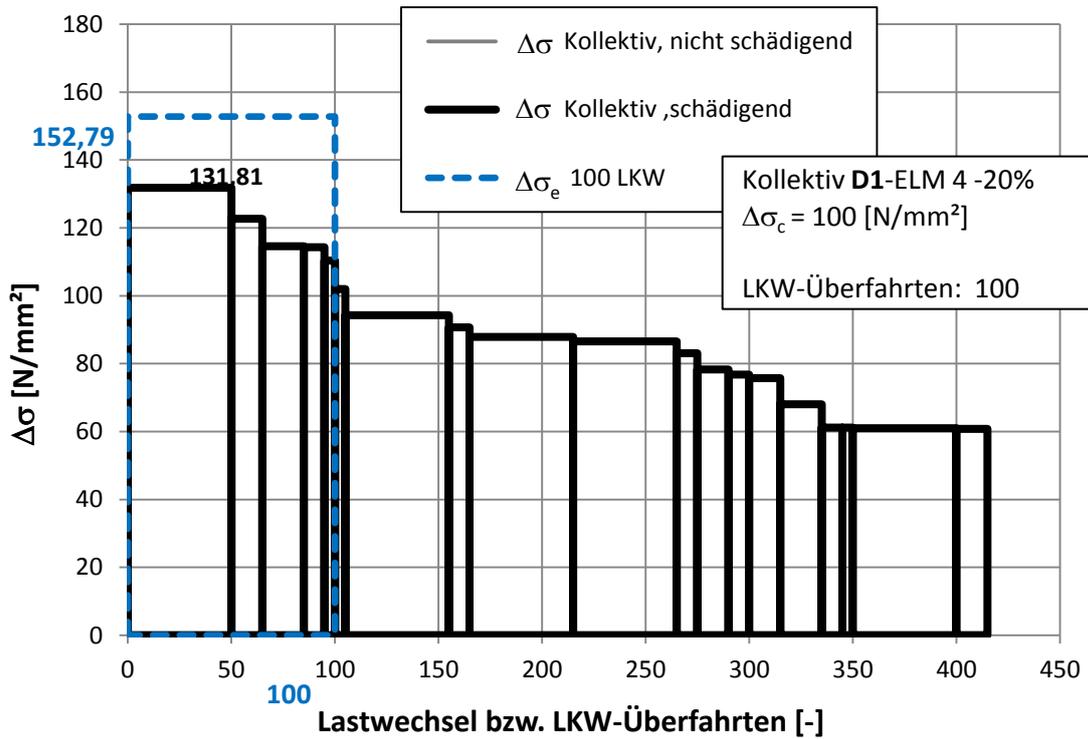


Abbildung 94: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4 -20%

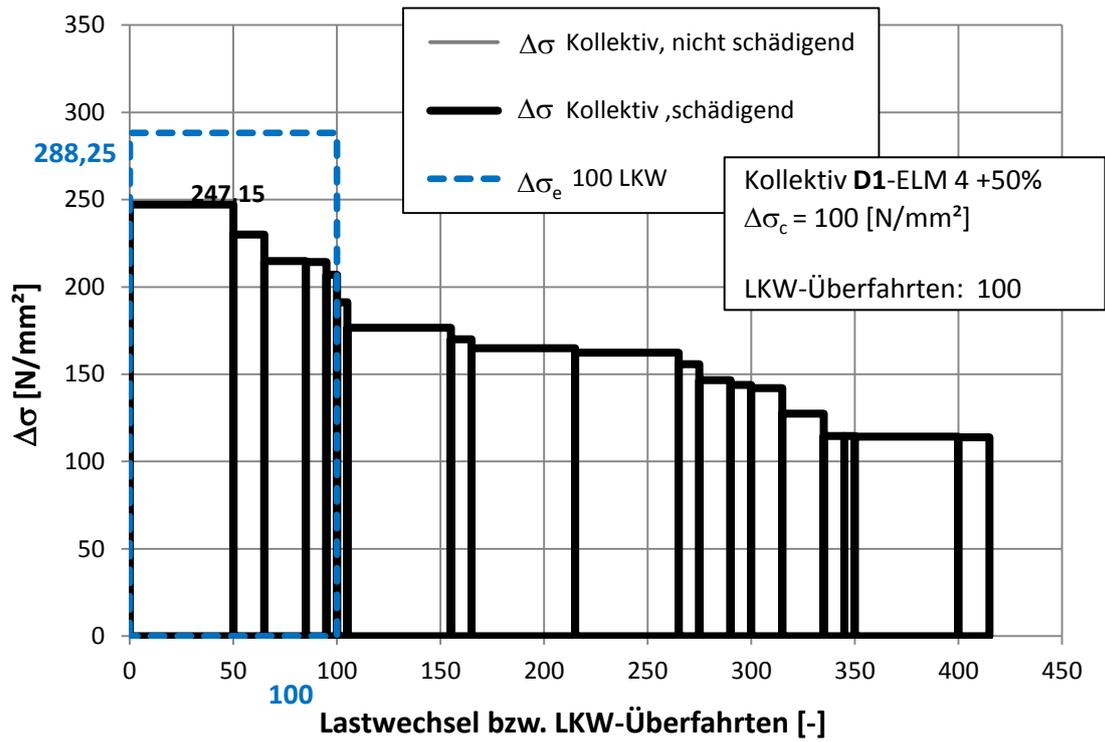


Abbildung 95: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4 +50%

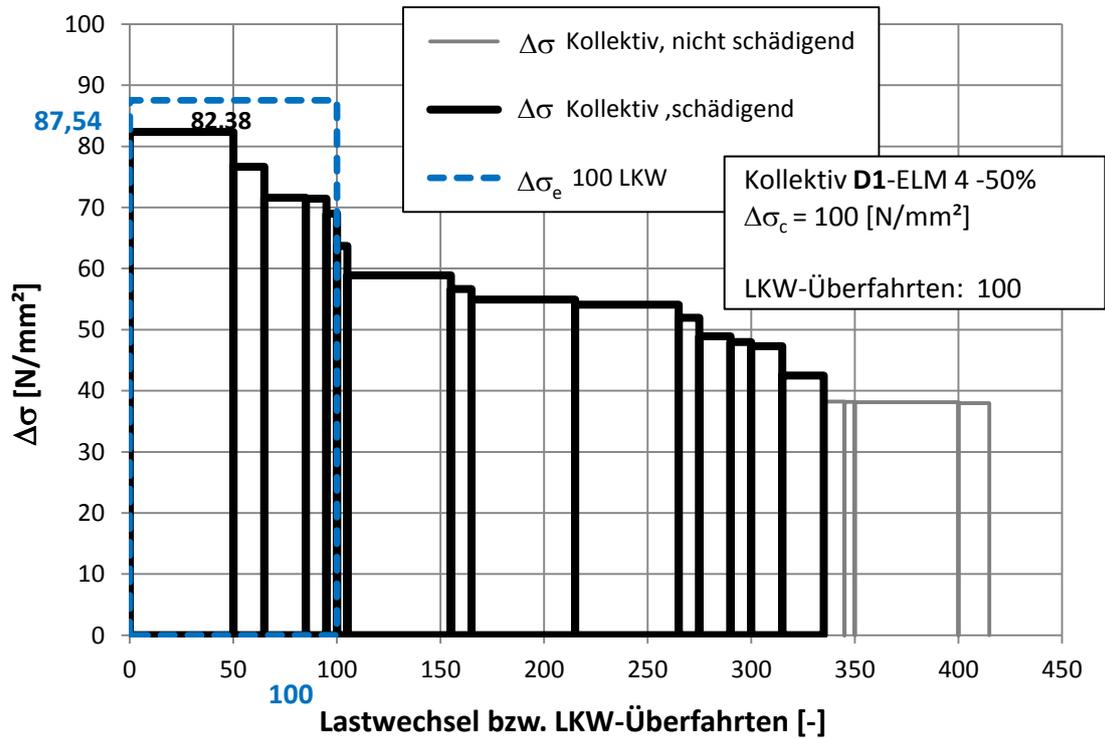


Abbildung 96: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4 -50%

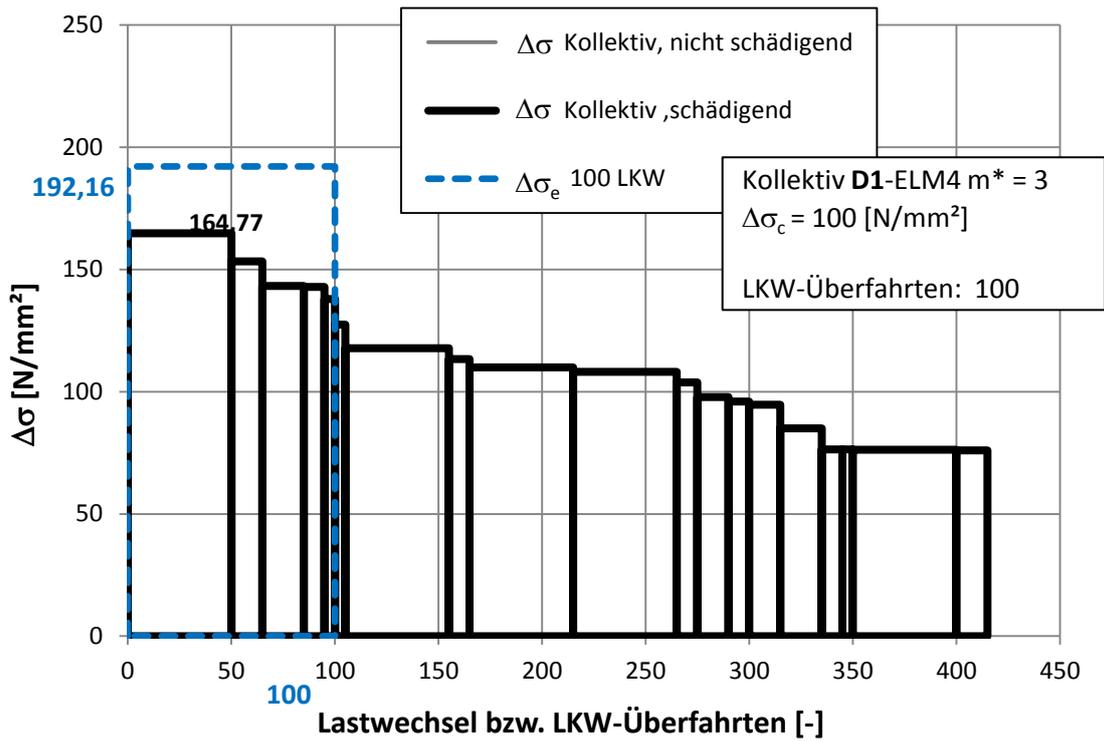


Abbildung 97: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4 m* = 3

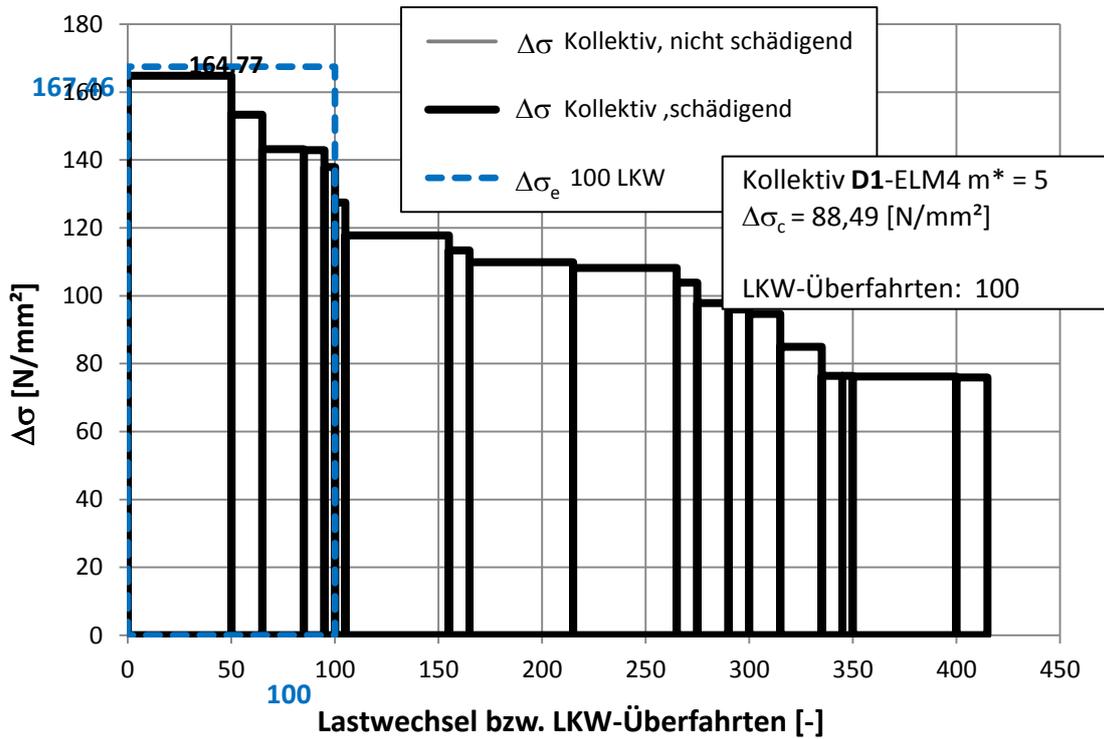


Abbildung 98: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4 m* = 5

A.4.5.2 Detail D1 - Lastkollektive aus ELM 4_mod

In den Abbildungen 99 bis 105 folgt die Darstellung der Lastkollektive für die nach Abbildung 25 untersuchten 5 Lastniveaus, sowie der 2 Grenzfälle $m^* = 3$ und $m^* = 5$ (siehe Abschnitt 4).

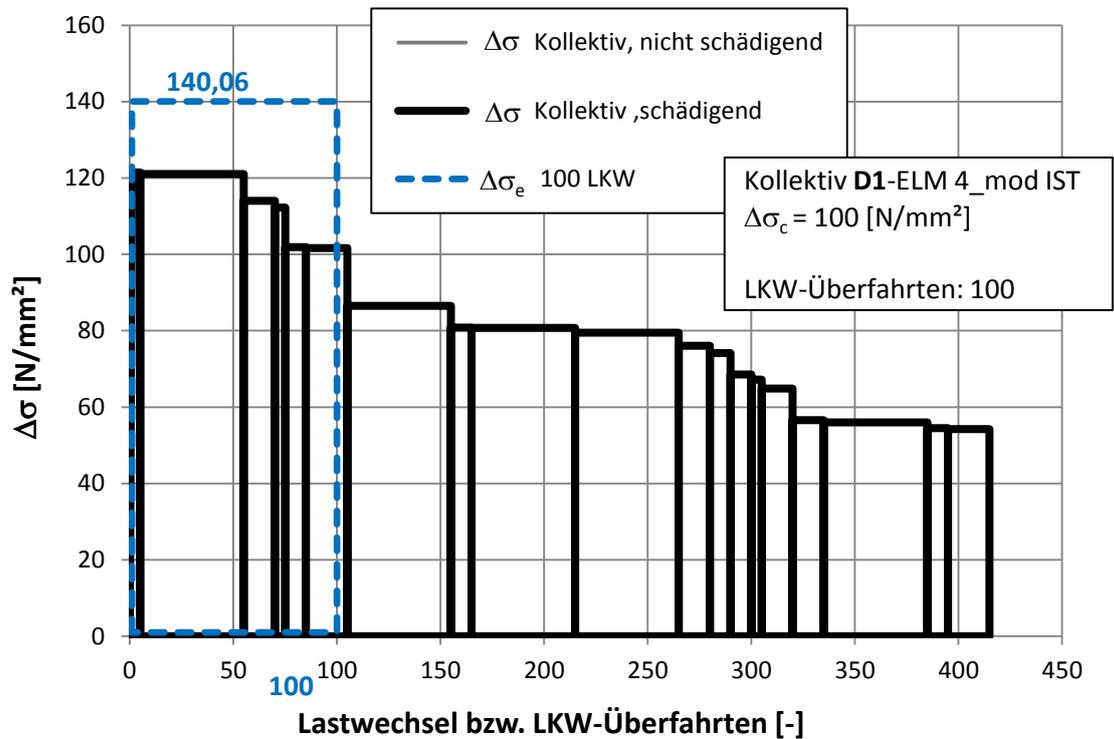


Abbildung 99: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod IST

Ähnlich wie beim Lastkollektiv aus dem Ermüdungslastmodell 4 haben trotz der geringeren Achslasten des Ermüdungslastmodells 4_mod sämtliche Kollektivteile eine schädigende Wirkung (siehe Abbildung 99). Erst bei Verminderung der Kollektivteile um 50% fallen viele als nicht schädigend zur Berechnung von $\Delta\sigma_e$ weg (siehe Abbildung 103).

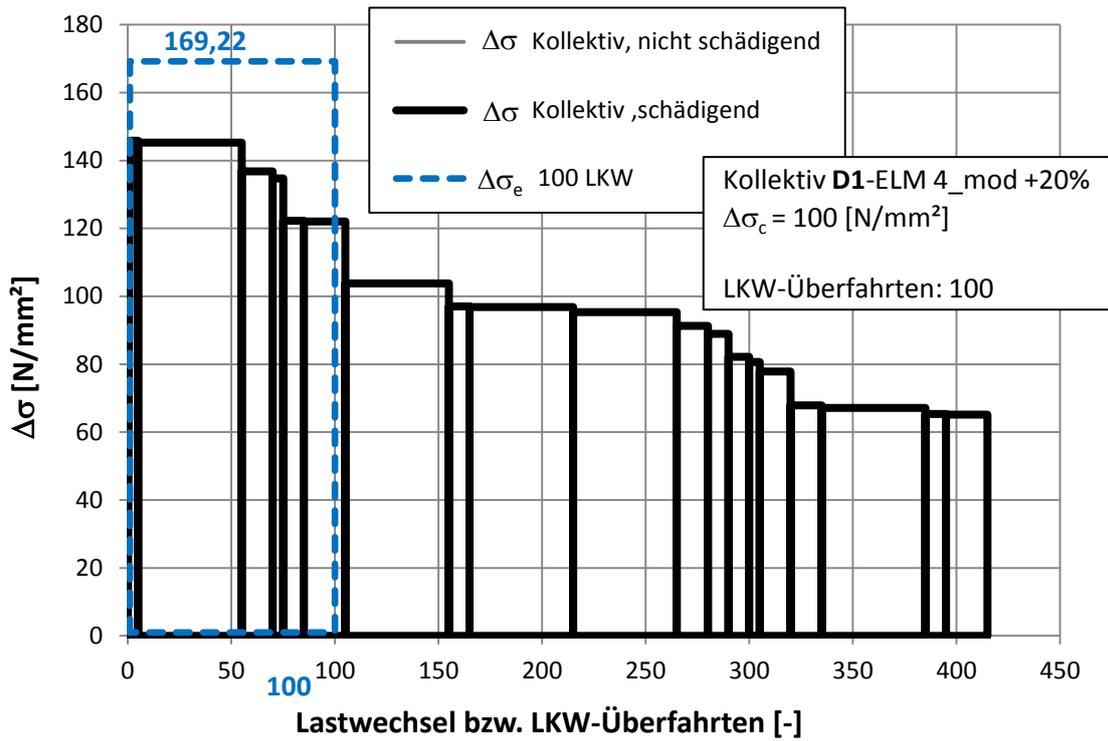


Abbildung 100: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod +20%

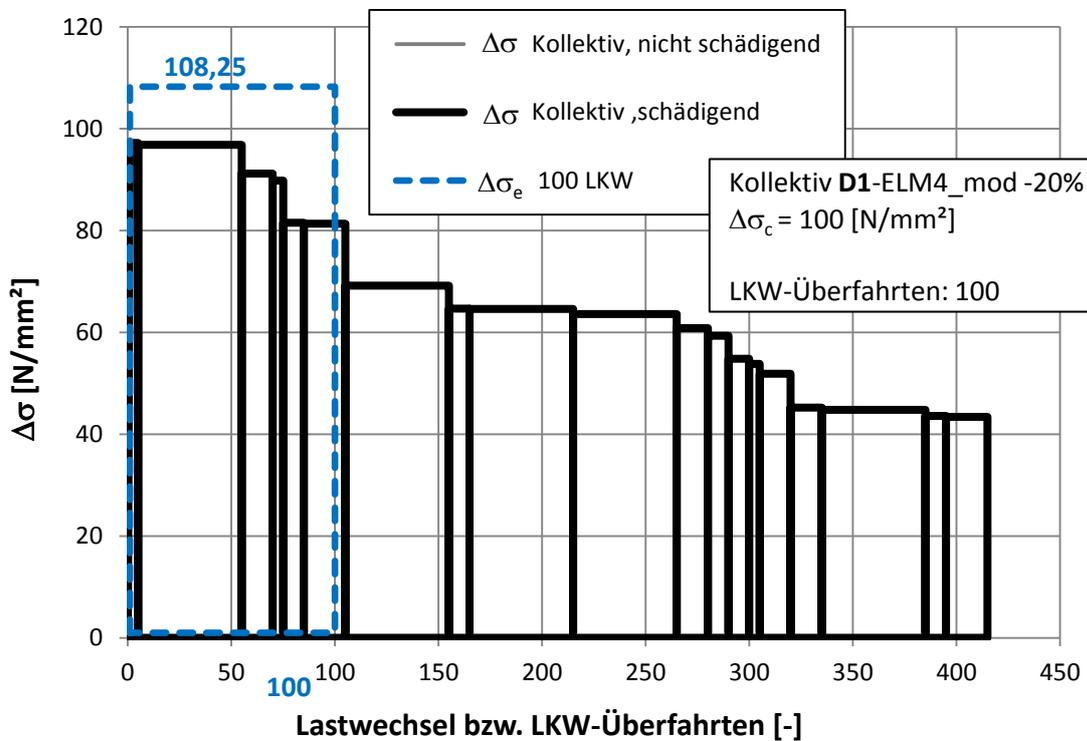


Abbildung 101: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod -20%

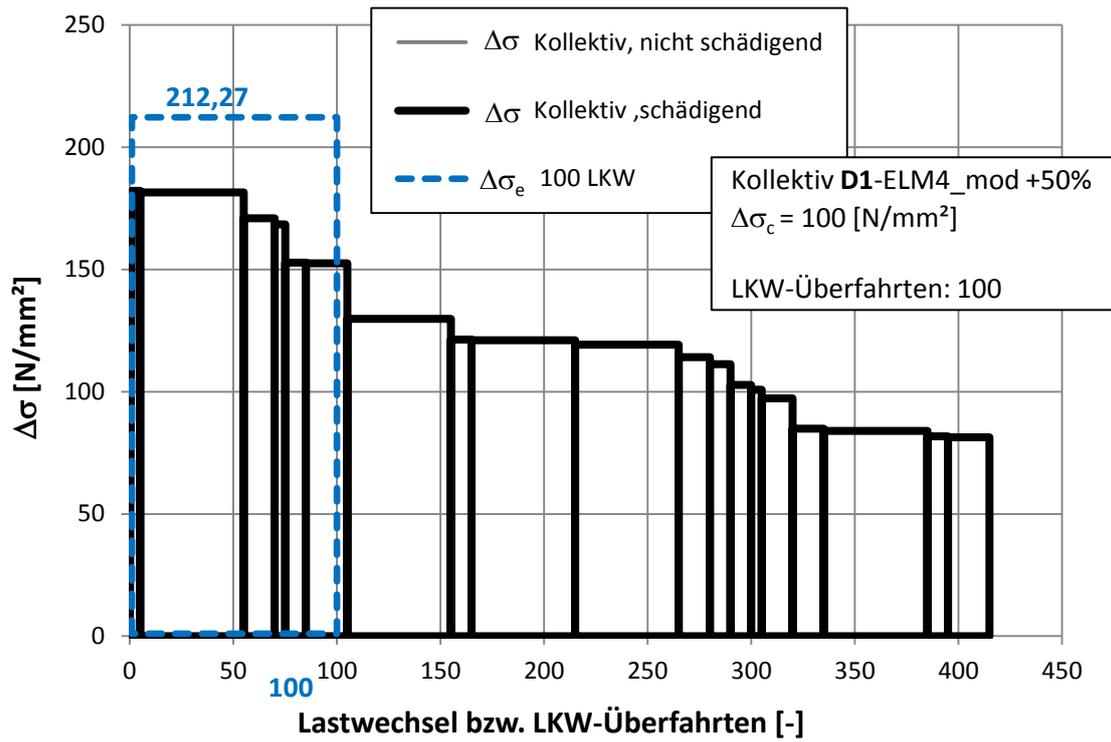


Abbildung 102: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod +50%

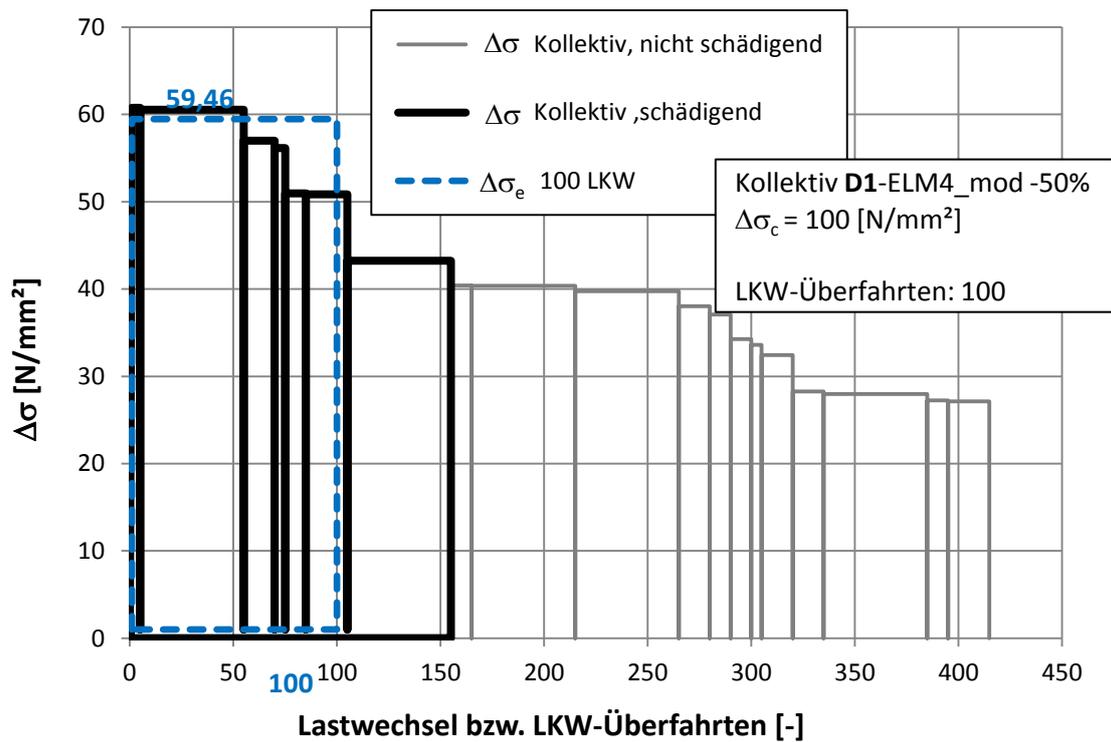


Abbildung 103: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod -50%

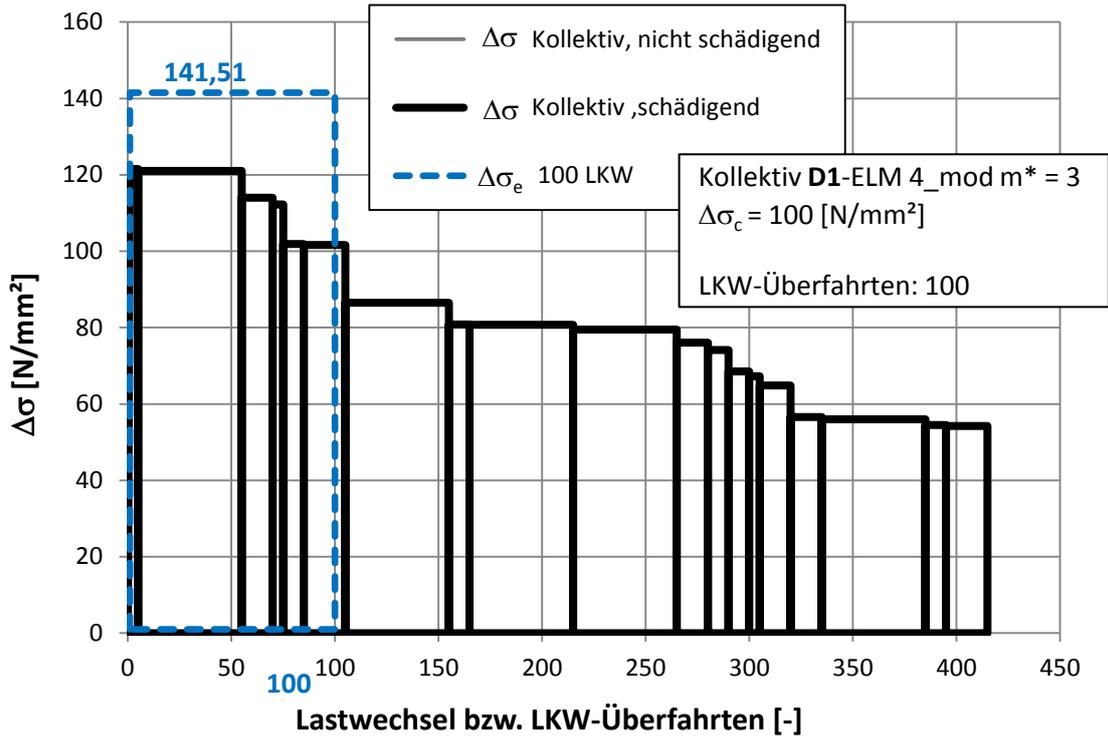


Abbildung 104: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod $m^* = 3$

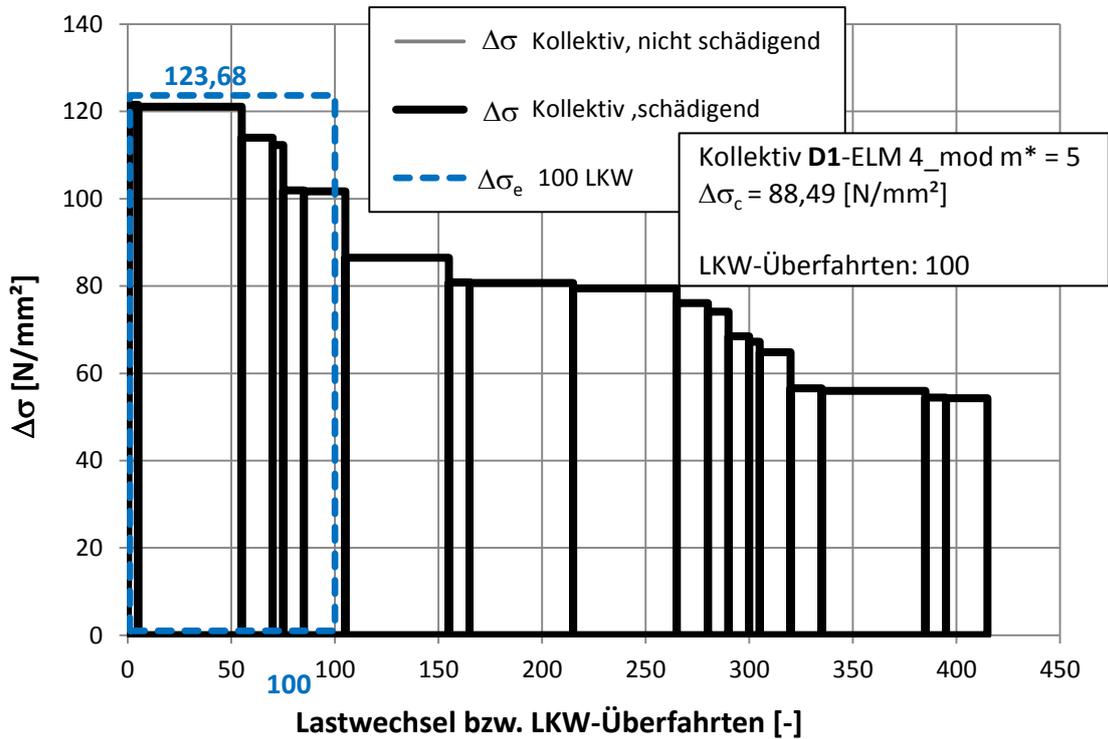


Abbildung 105: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod $m^* = 5$

A.4.5.3 Detail D2 - Lastkollektive aus ELM 4

In den Abbildungen 106 bis 112 folgt die Darstellung der Lastkollektive für die nach Abbildung 25 untersuchten 5 Lastniveaus, sowie der 2 Grenzfälle $m^* = 3$ und $m^* = 5$ (siehe Abschnitt 4).

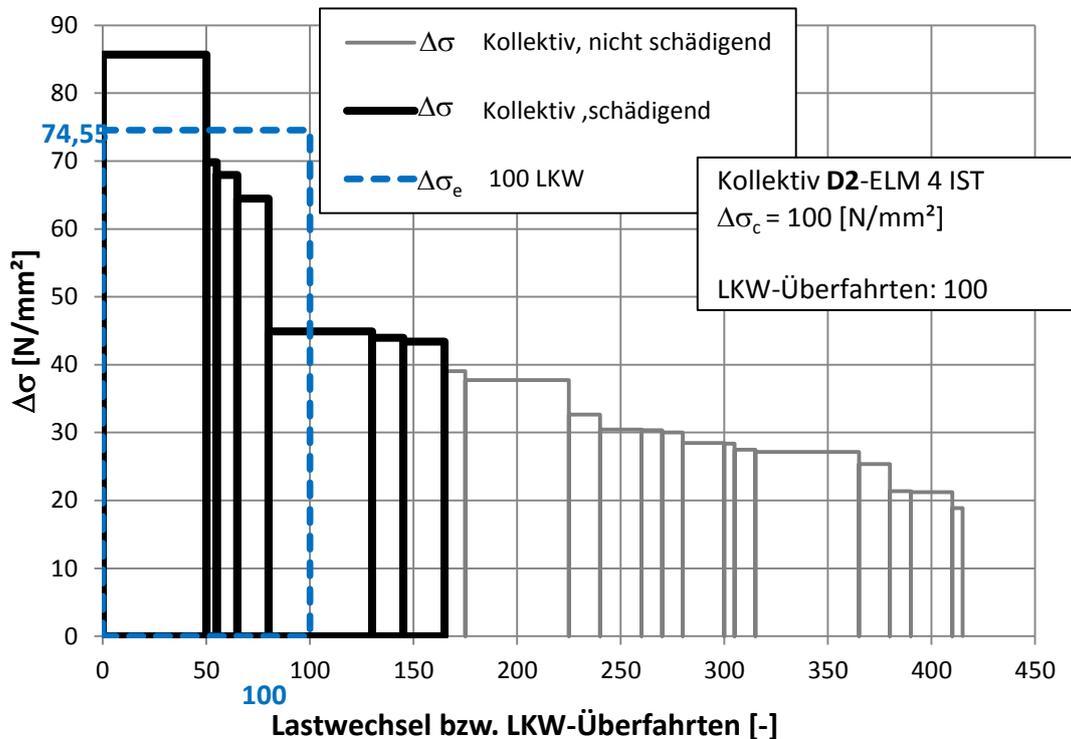


Abbildung 106: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4 IST

Im Gegensatz zu den Lastkollektiven des Detailpunktes D1 ergibt bei Detail D2 bereits eine Ermittlung der Kollektivteile mit Ermüdungslastmodell 4, dass die Spannungsschwingbreiten hier wesentlich kleiner sind und aufgrund dessen mehr als die Hälfte der Kollektivteile wegen ihrer nicht schädigenden Höhe keinen Einfluss auf die Ermüdung haben (siehe Abbildung 106). Bei einer Verminderung der Kollektivteile um 50% ist sogar nur mehr ein Anteil schädigend (siehe Abbildung 110).

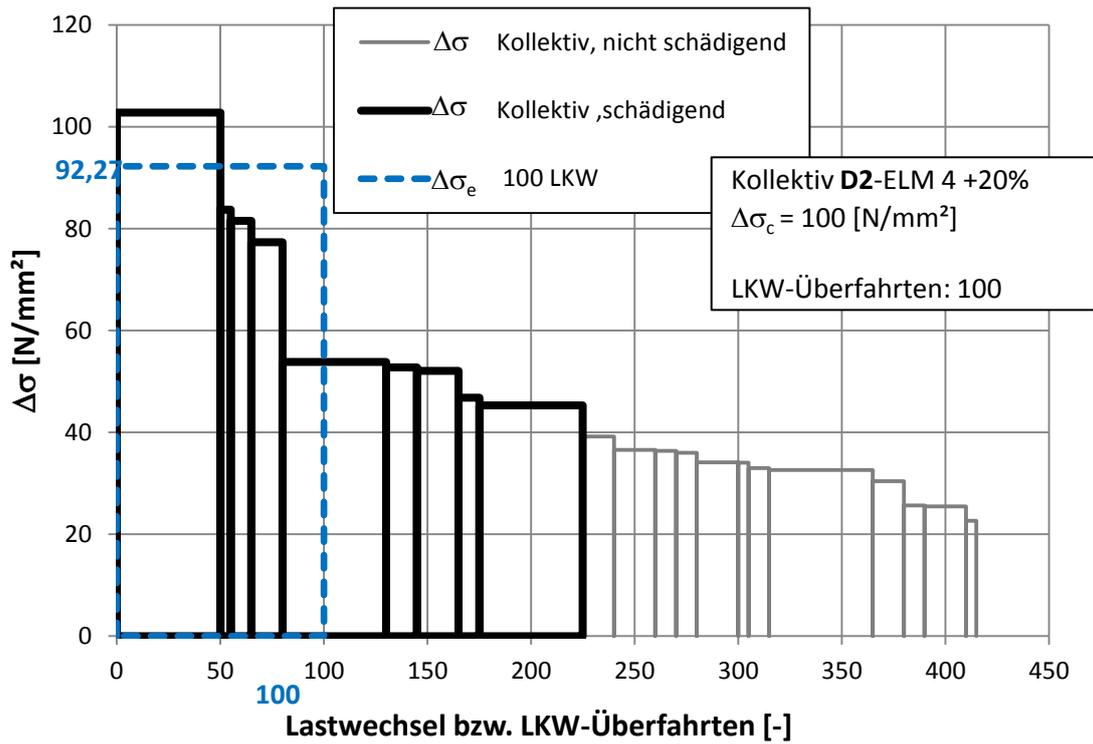


Abbildung 107: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4 +20%

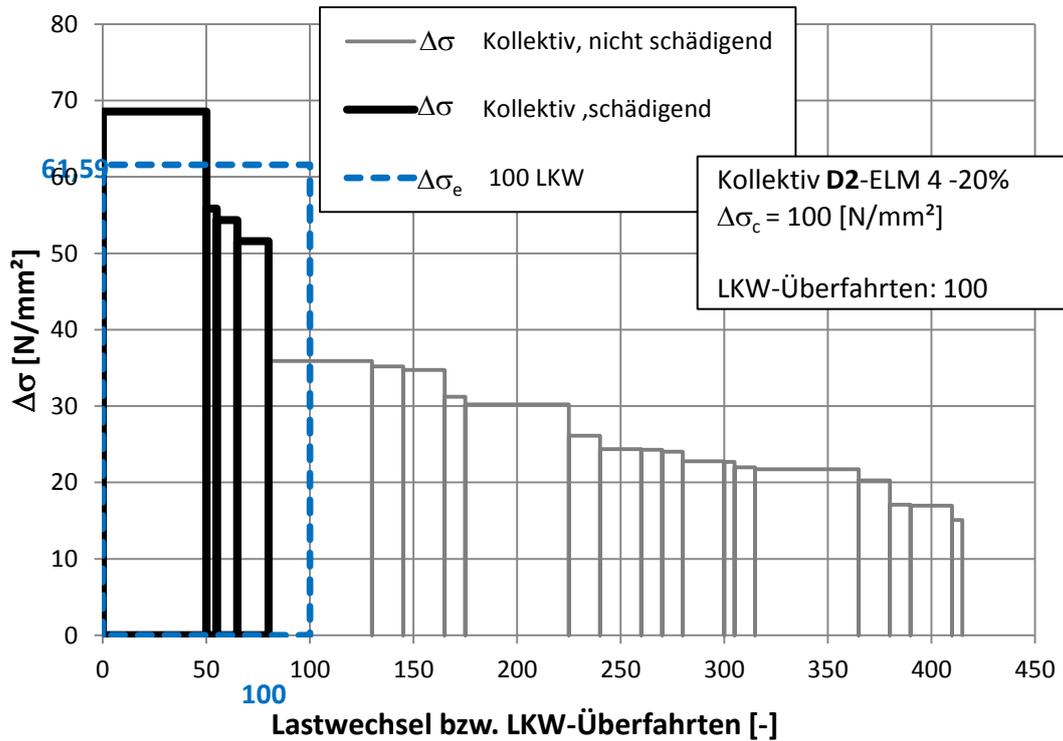


Abbildung 108: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4 -20%

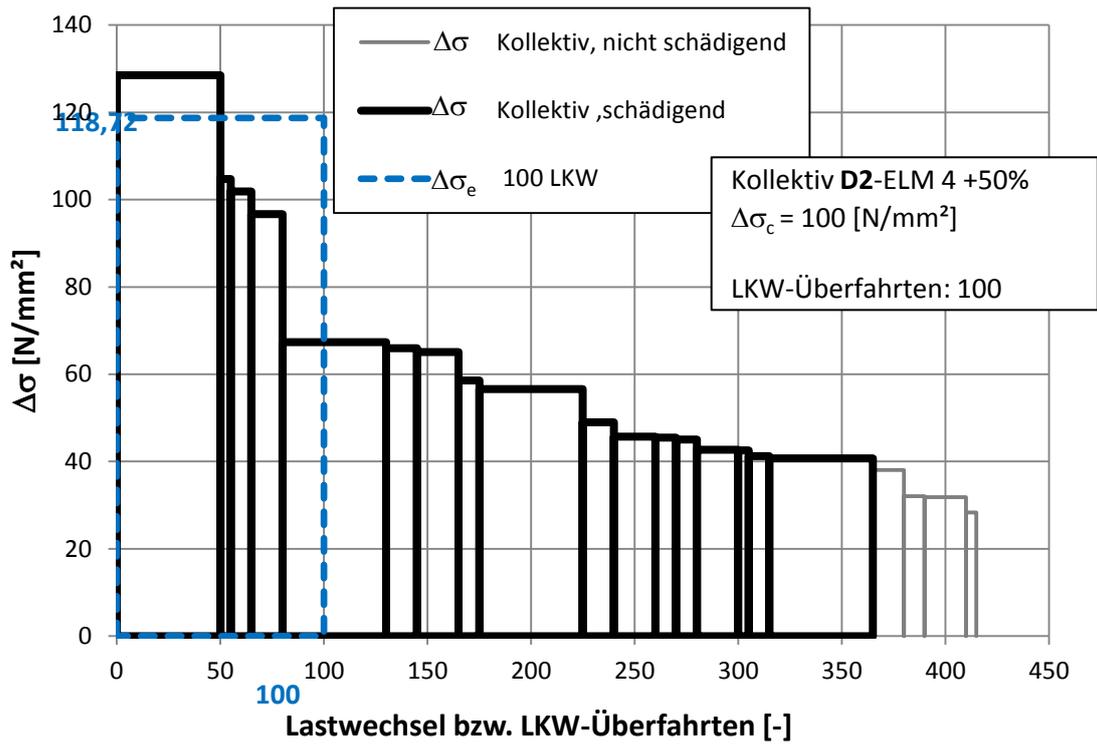


Abbildung 109: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4 +50%

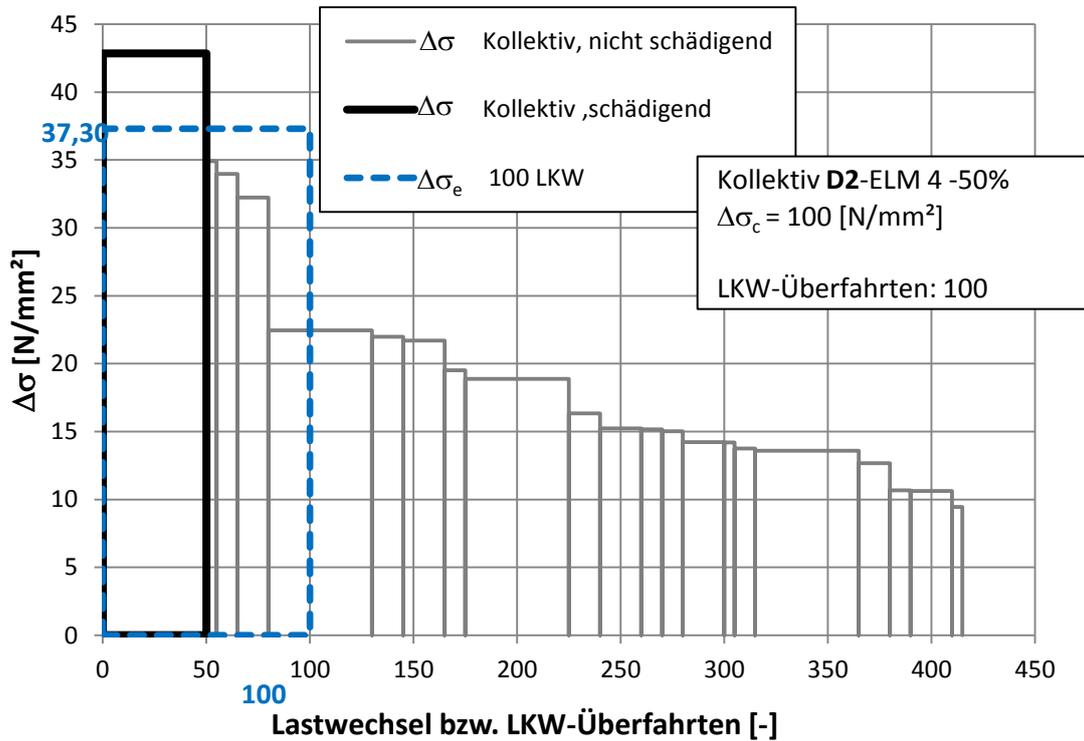


Abbildung 110: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4 -50%

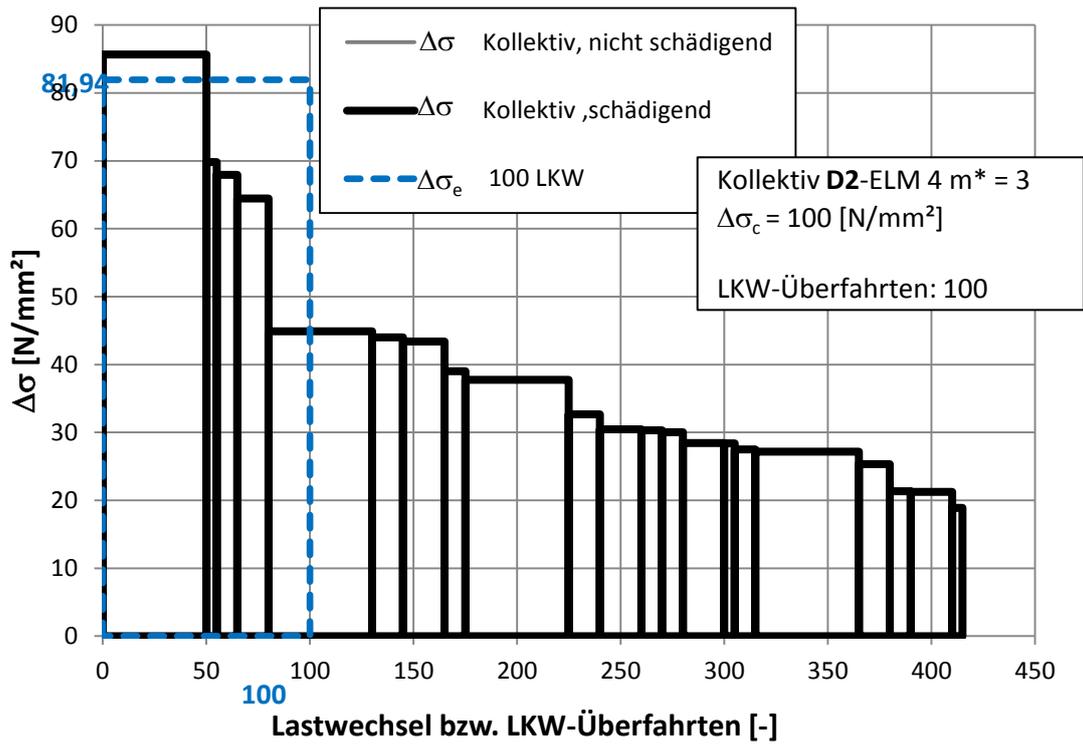


Abbildung 111: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4 m* = 3

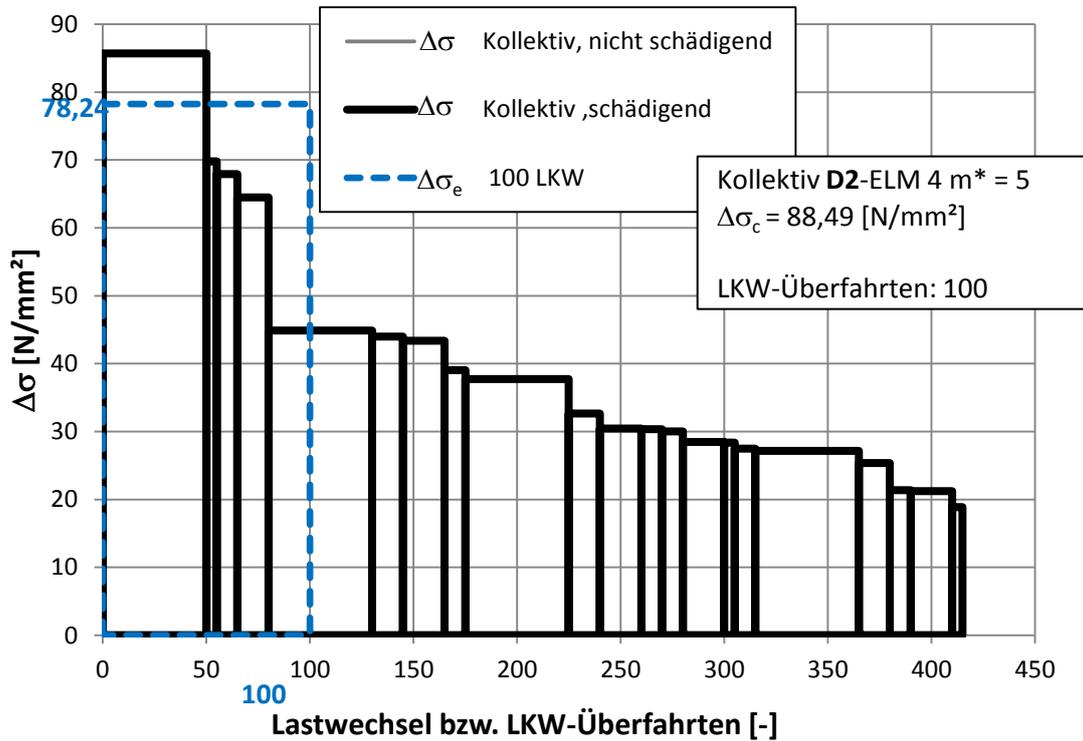


Abbildung 112: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4 m* = 5

A.4.5.4 Detail D2 - Lastkollektive aus ELM 4_mod

In den Abbildungen 113 bis 119 folgt die Darstellung der Lastkollektive für die nach Abbildung 25 untersuchten 5 Lastniveaus, sowie der 2 Grenzfälle $m^* = 3$ und $m^* = 5$ (siehe Abschnitt 4).

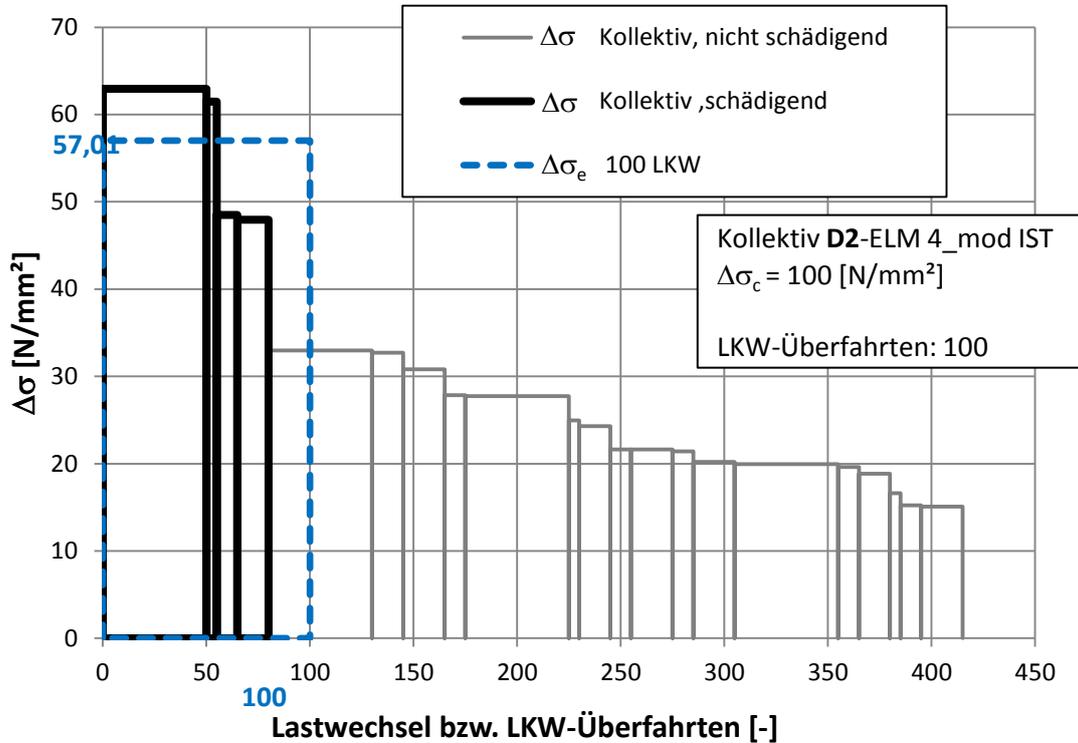


Abbildung 113: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod IST

Bei den Lastkollektiven für Detailpunkt D2 aus dem modifizierten Ermüdungslastmodell 4_mod kommt es aufgrund der geringen Achslasten zu noch kleineren Spannungsschwingbreiten und dadurch zu noch weniger schädigenden Lastwechseln (siehe Abbildung 113). Dadurch ergibt sich bei einer Verminderung der Kollektivteile um 50% überhaupt keine schädigende Wirkung mehr (siehe Abbildung 117).

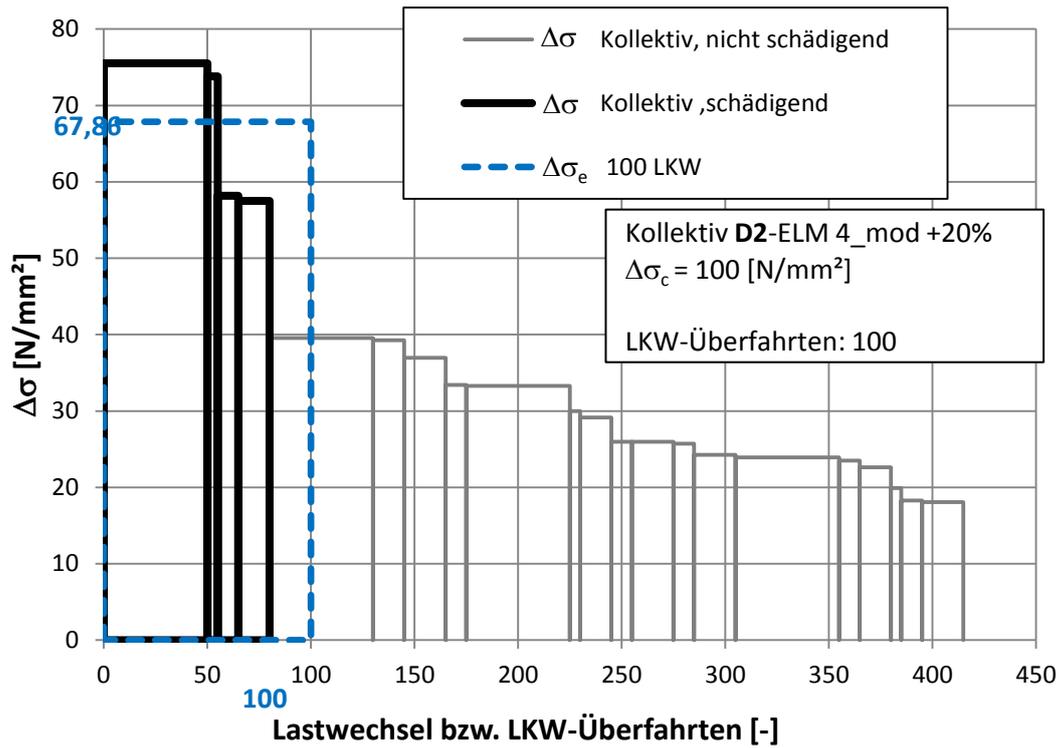


Abbildung 114: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod +20%

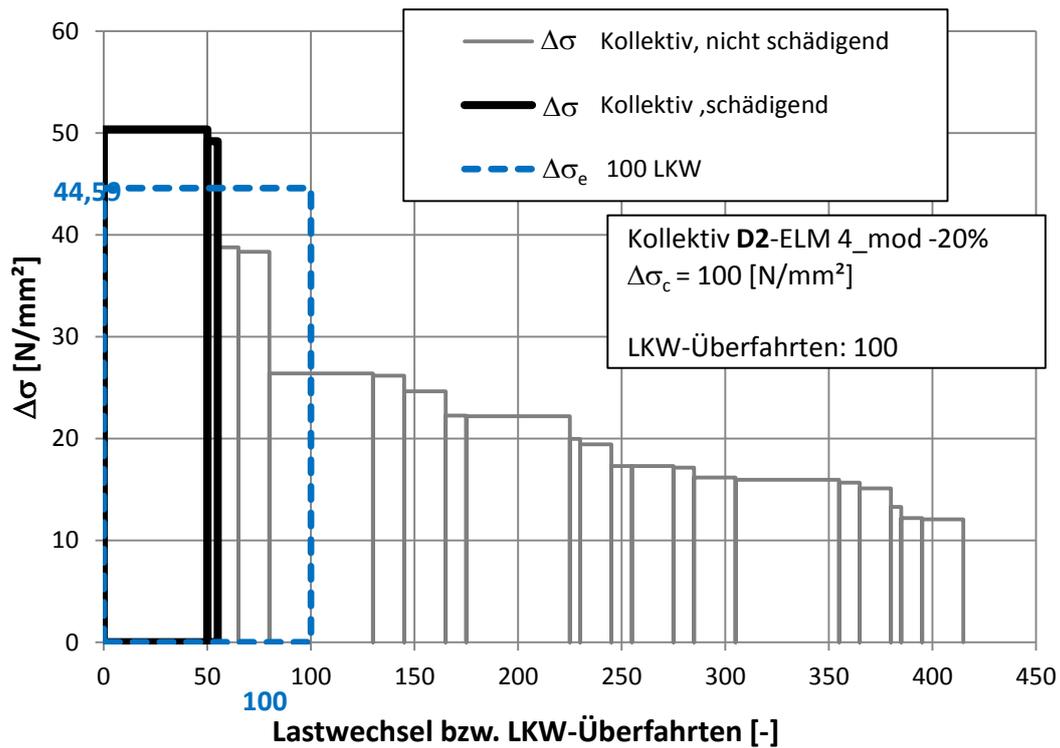


Abbildung 115: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod -20%

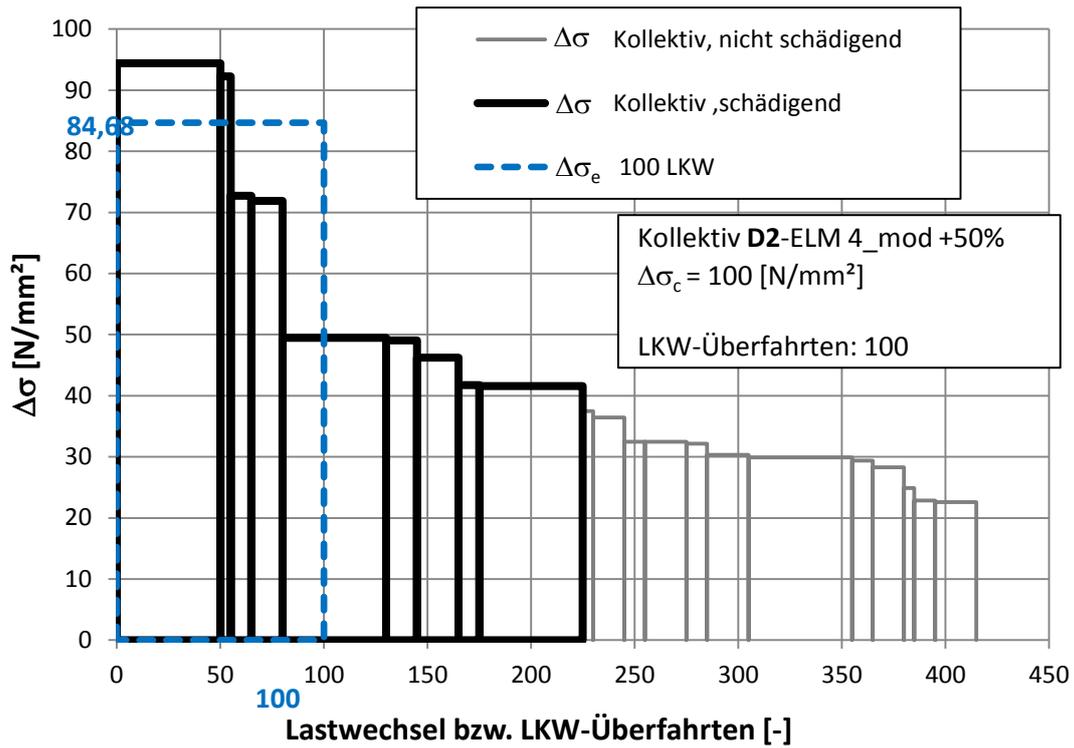


Abbildung 116: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod +50%

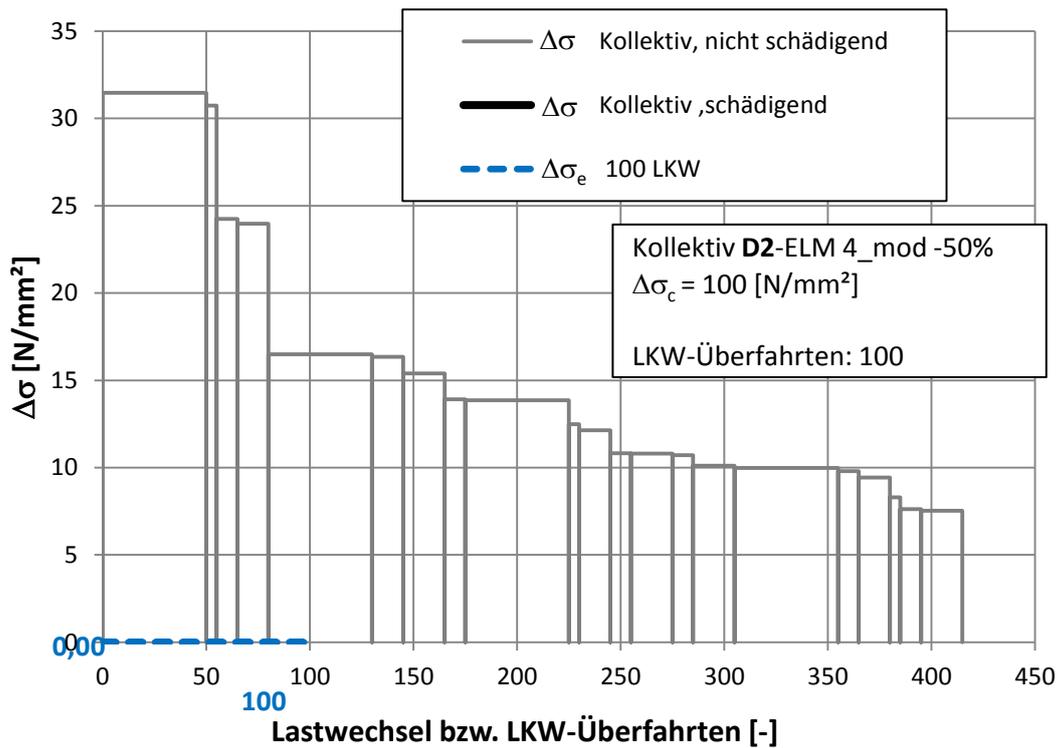


Abbildung 117: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod -50%

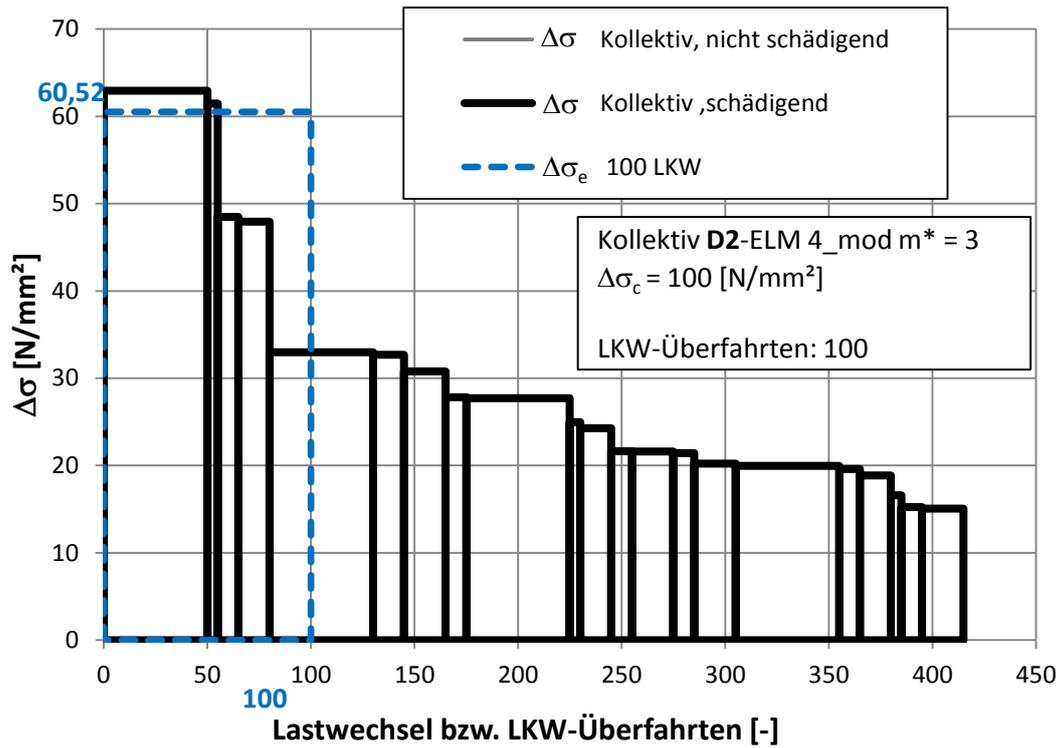


Abbildung 118: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod m* = 3

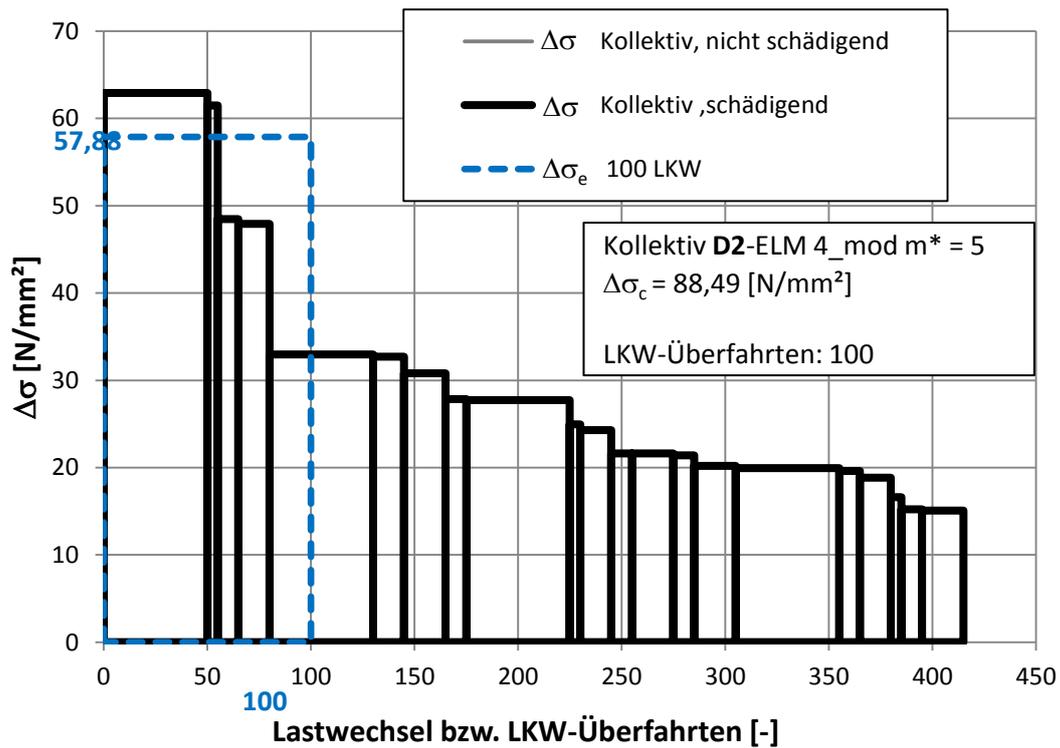


Abbildung 119: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod m* = 5

A.5 Beiwerte λ_1

Mit den ermittelten Lastkollektiven wurden nach Kapitel 4 die unterschiedlichen Beiwerte λ_1 für die Ermüdungslastmodelle ELM 4 und ELM 4_mod berechnet. Die Ergebnisse sind im Folgenden in den Abbildungen 120 bis 123 sowie in den Tabellen 31 bis 34. dargestellt. Der Lastfaktor $f_{Last} = \frac{\Delta\sigma_{ELM3}}{\Delta\sigma_c}$ gibt dabei das jeweilige Verhältnis der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{ELM3}$ zum Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c$ an.

A.5.1 Detail D1 – ermittelte Beiwerte λ_1

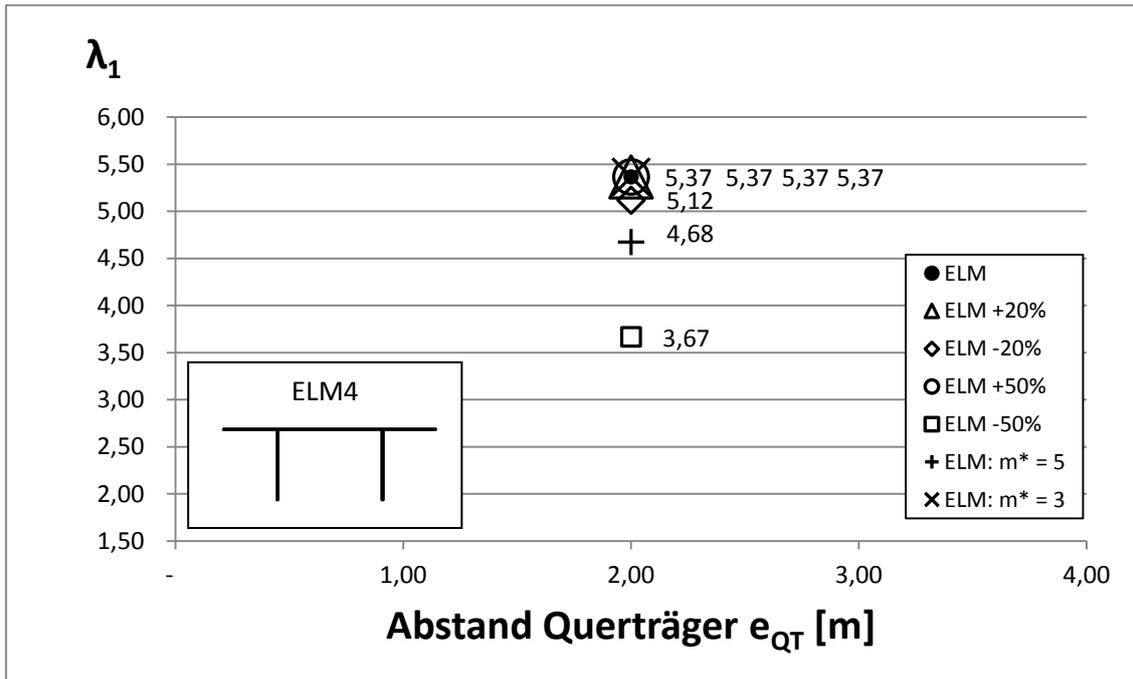


Abbildung 120: Detail D1_Beiwerte λ_1 – orthotrope Platte mit offenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM 4

ELM 4 - $e_{QT} = 2$ [m]		
Bezeichnung	Lastfaktor f_{Last}	λ_1
ELM	1,24	5,37
ELM +20%	1,49	5,37
ELM -20%	1,03	5,12
ELM +50%	1,86	5,37
ELM -50%	0,83	3,67
ELM: $m^* = 5$	1,40	4,68
ELM: $m^* = 3$	1,24	5,37

Tabelle 31: Detail D1 - Beiwerte λ_1 – orthotrope Platte mit offenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM 4

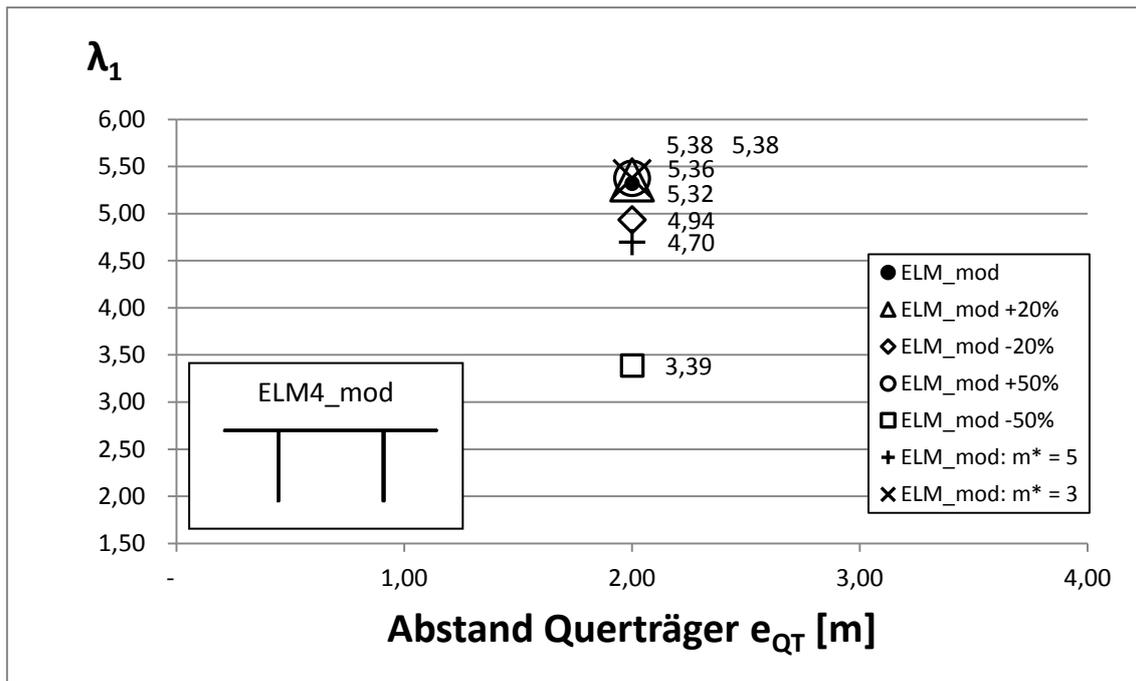
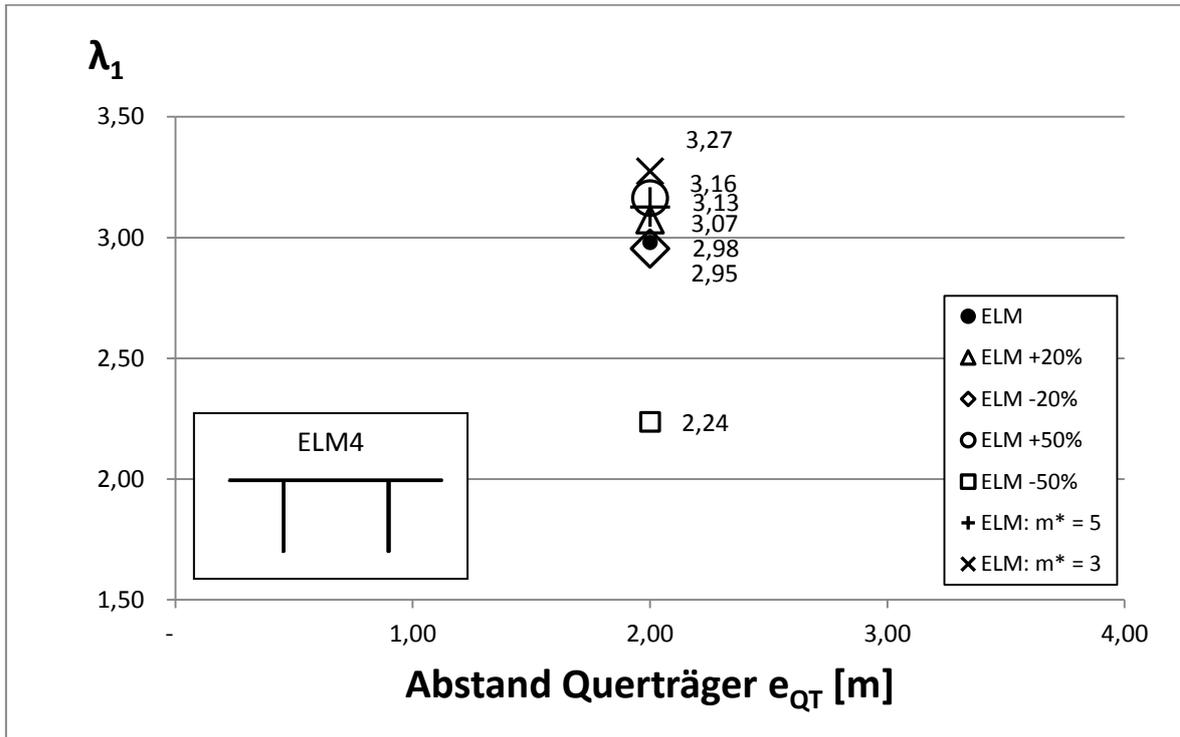


Abbildung 121: Detail D1_Beiwerte λ_1 – orthotrope Platte mit offenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM4_mod

ELM 4_mod - $e_{QT} = 2$ [m]		
Bezeichnung	Lastfaktor f_{Last}	λ_1
ELM_mod	1,24	5,32
ELM_mod +20%	1,49	5,36
ELM_mod -20%	1,03	4,94
ELM_mod +50%	1,86	5,38
ELM_mod -50%	0,83	3,39
ELM_mod: $m^* = 5$	1,40	4,70
ELM_mod: $m^* = 3$	1,24	5,38

Tabelle 32: Detail D1 - Beiwerte λ_1 – orthotrope Platte mit offenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM 4_mod

Für Detail D1 ergeben sich mit dem Ermüdungslastmodell 4 und 4_mod jeweils für den gleichen Lastfaktor geringfügig unterschiedliche Beiwerte λ_1 , da sich das verwendete Ermüdungslastmodell für die Simulation ändert und das Spannungsschwingenspiel $\Delta\sigma_{ELM3}$ aber gleich bleibt, wobei dies für das Detail D1 kaum einen Einfluss auf λ_1 hat, da bei diesem Detailpunkt durch jedes Lastmodell nur schädigende Lastkollektive erzeugt werden. Die λ_1 -Werte beider Lastmodelle liegen im Schnitt weniger als 1% auseinander.

A.5.2 Detail D2 – ermittelte Beiwerte λ_1

 Abbildung 122: Detail D2_Beiwerte λ_1 – orthotrope Platte mit offenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM4

ELM 4 - $e_{QT} = 2$ [m]		
Bezeichnung	Lastfaktor f_{Last}	λ_1
ELM	0,86	2,98
ELM +20%	1,04	3,07
ELM -20%	0,72	2,95
ELM +50%	1,30	3,16
ELM -50%	0,58	2,24
ELM: $m^* = 5$	0,98	3,13
ELM: $m^* = 3$	0,86	3,27

 Tabelle 33: Detail D2_Beiwerte λ_1 – orthotrope Platte mit offenen Längsrippen und dem Lastmodell _ELM 4

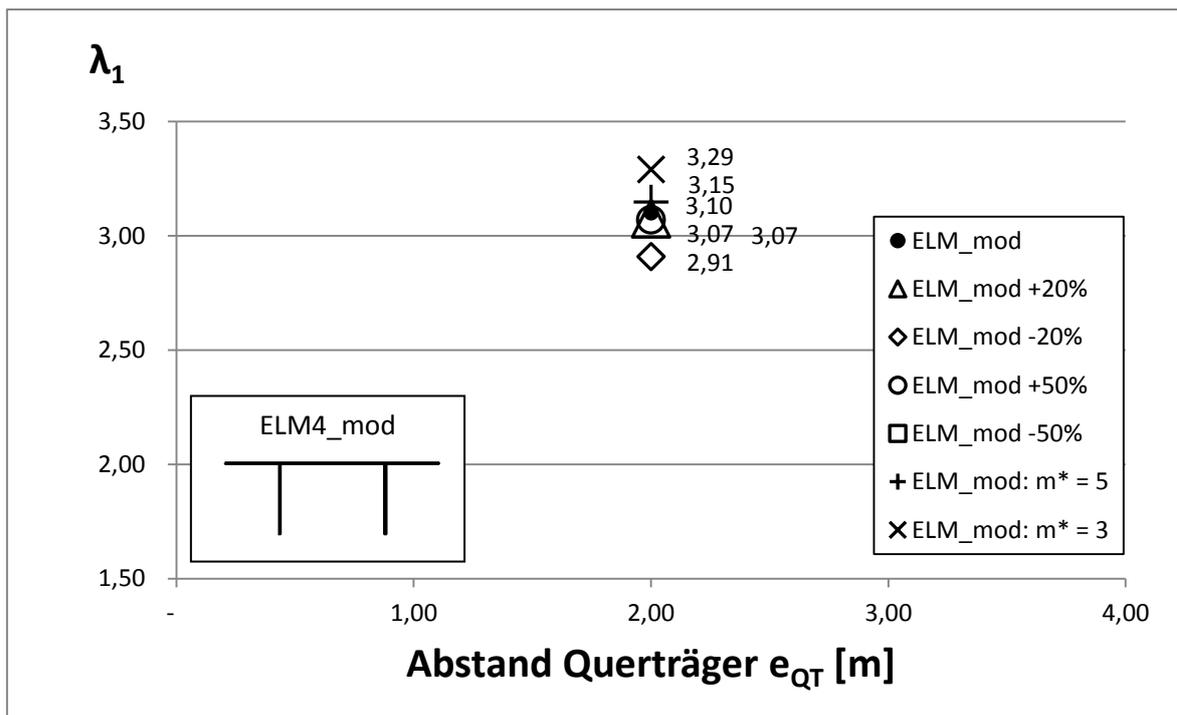


Abbildung 123: Detail D2_Beiwerte λ_1 – orthotrope Platte mit offenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM 4_mod

ELM 4_mod - $e_{QT} = 2$ [m]		
Bezeichnung	Lastfaktor f_{Last}	λ_1
ELM_mod	0,86	3,10
ELM_mod +20%	1,04	3,07
ELM_mod -20%	0,72	2,91
ELM_mod +50%	1,30	3,07
ELM_mod -50%	0,58	-
ELM_mod: $m^* = 5$	0,98	3,15
ELM_mod: $m^* = 3$	0,86	3,29

Tabelle 34: Detail D2_Beiwerte λ_1 – orthotrope Platte mit offenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM 4_mod

Für Detail D2 ergeben sich zwischen dem Ermüdungslastmodell 4 und 4_mod kaum Unterschiede in den Werten für den Beiwert λ_1 , bis auf jenen aus dem Ermüdungslastmodell 4_mod, welcher die um 50% verminderten Kollektivteile darstellt (siehe Abbildung 117). Dieser ergibt keinen Wert, da das Lastkollektiv keine schädigenden Lastwechsel beinhaltet (siehe Tabelle 34).

B Modell B: orthotrope Platte mit Trapezlängsrippen ($e_{QT} = 4 \text{ m}$)

Bei den Berechnungen der Modelle A, B und C wurden die Ermüdungslastmodelle aus Anhang D verwendet.

Dieses Modell basiert auf dem Berechnungsbeispiel aus dem Leitfaden zum DIN Fachbericht 103 Abschnitt C [2]. Wie beim Modell A bleibt die globale Tragwirkung der Brücke unberücksichtigt, da nur Spannungen aus der lokalen Tragwirkung maßgebend sind. Aus diesem Grund wurde hier ebenfalls ein Brückendeck zwischen zwei Hauptträgern modelliert.

B.1 Geometrie des betrachteten Brückendecks

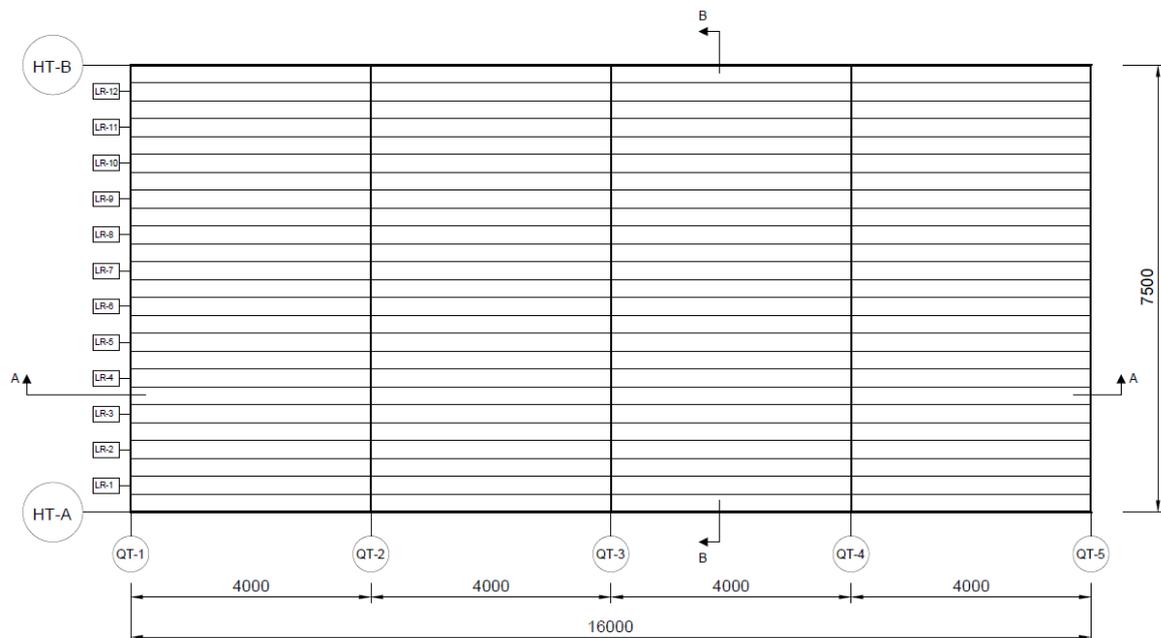


Abbildung 124: Modell B - Grundriss

Das betrachtete Brückendeck mit den Grenzabmessungen 16,0 m auf 7,50 m besteht im Grundriss aus 2 Hauptträgern, 5 Querträgern (in der Literatur auch Querrippen genannt) sowie den 12 Längsrippen (siehe Abbildung 124). Die Hauptträger und Längsrippen haben eine Länge von $l_{HT} = l_{LR} = 16 \text{ m}$ und die Querträger eine Länge von $l_{QT} = 7,50 \text{ m}$. Der Hauptträgerabstand beträgt $e_{HT} = 7,50 \text{ m}$, der Querträgerabstand beträgt $e_{QT} = 4 \text{ m}$ und der Längsrippenabstand $e_{LR} = 0,30 \text{ m}$.

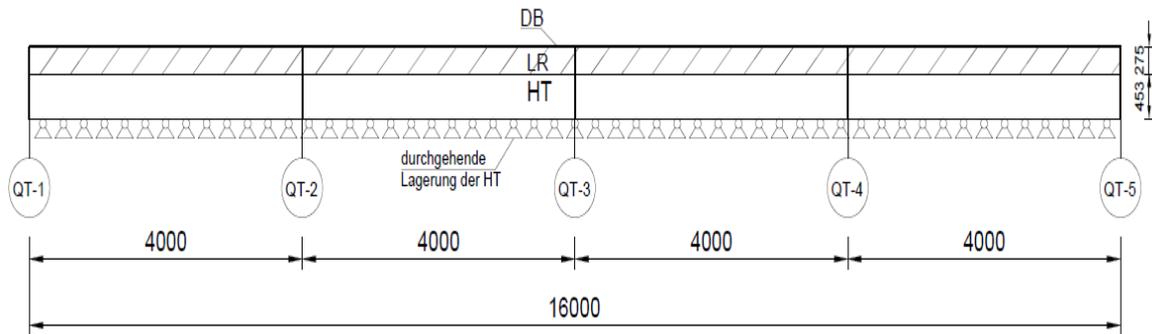


Abbildung 125: Modell B - Schnitt A-A

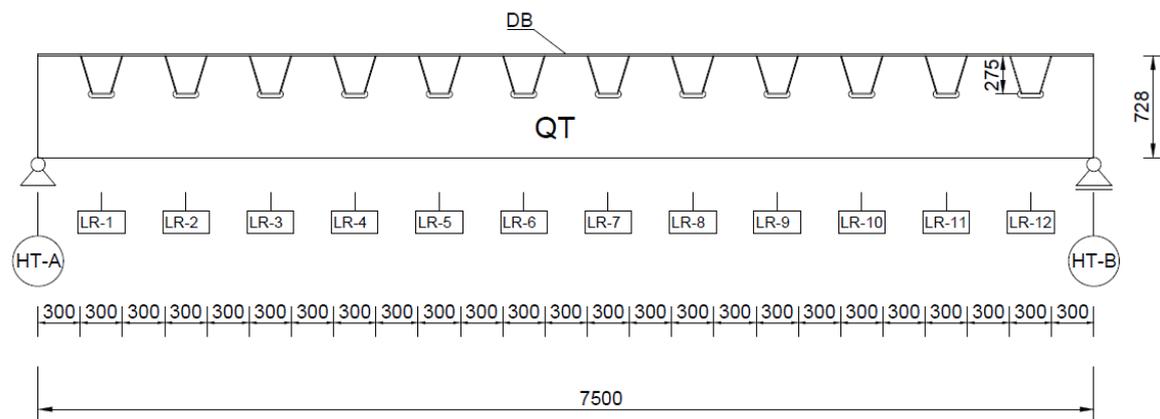


Abbildung 126: Modell B - Schnitt B-B

Die Höhe der Längsrippen beträgt $h_{LR} = 0,275 \text{ m}$ und die der Querträger $h_{QT} = 0,728 \text{ m}$. Die Hauptträgerstege wurden wie im Modell A bis zum Untergurt der Querträger modelliert und sind an ihrer Unterkante linienförmig gelagert. Die geschlossenen Längsrippen sind durchlaufend über die Länge des Brückendecks angeordnet und schließen an der äußeren Stegfläche an die Querträger an, welche an der Unterseite der Längsrippen eine Ausnehmung haben. (siehe Abbildungen 125 und 126)

Die Blechstärke der Längsrippen beträgt $t_{LR} = 6 \text{ mm}$, die der Hauptträger $t_{HT} = 12 \text{ mm}$ und die der Querträger $t_{QT} = 8 \text{ mm}$. Die Deckblechdicke beträgt $t_{DB} = 12 \text{ mm}$ und führt zu einer Deckblechschlankheit von $e_{LR}/t_{DB} = 25$. Die Norm EN 1993-2 empfiehlt in Anhang C, Punkt C.1.2.2 eine Deckblechschlankheit von $e/t \leq 25$. Diese Anforderung wird hier eingehalten.

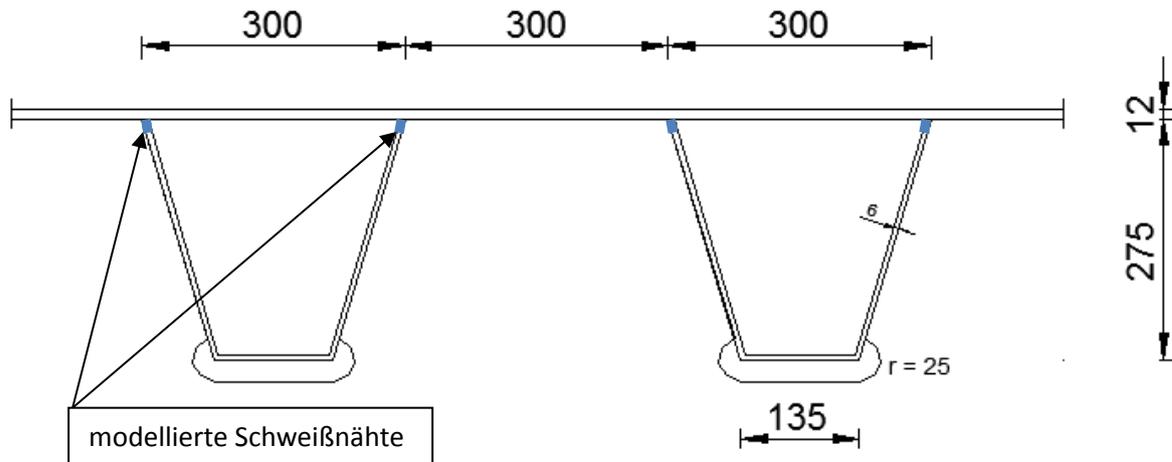


Abbildung 127: Modell B - Längsrippengeometrie

Die hier dargestellten geschlossenen Längsrippen sind mit den Querträgern und mit dem Deckblech über Schweißnähte verbunden (siehe Abbildung 127). Wobei die Schweißnahtgeometrie des Anschlusses an das Deckblech wie in nachfolgender Abbildung 128 modelliert wurde. Der Anschluss an den Querträger wird über Kopplungsbedingungen berücksichtigt.

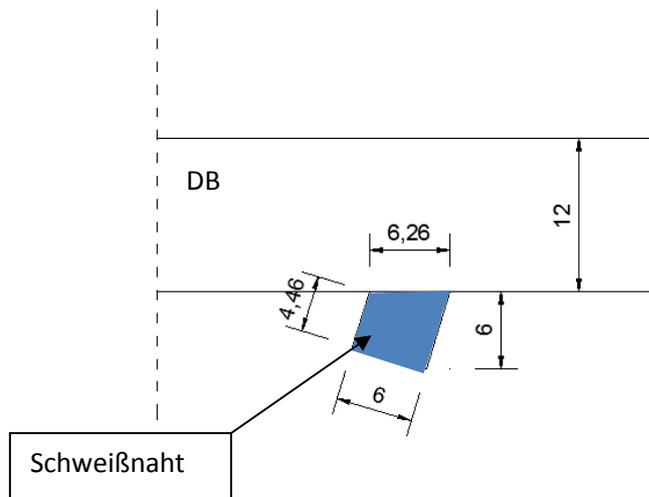


Abbildung 128: Modell B - Schweißnahtgeometrie

Da im weiteren Verlauf der Berechnung die Spannungen an der Schweißnaht nur miteinander verglichen werden, wurde auf eine exakte Ermittlung der Spannungen über Extrapolation wie in Abschnitt A.3 verzichtet. Daher wurde die Schweißnahtgeometrie wie in Abbildung 128 dargestellt vereinfacht angenommen.

B.2 Finite-Elemente-Modellierung

Die Modellierung und Berechnung wurde mit dem Finite-Elemente-Programm Abaqus (Version 6.10) [8] durchgeführt. Das Modell wurde wie oben erwähnt aus [2] abgeleitet. Die getroffenen Annahmen und Programmeingaben werden in diesem Abschnitt zusammengefasst.

B.2.1 Material

Das gesamte Brückendeck besteht aus Stahl mit folgenden für die Modellierung relevanten Eigenschaften lt. EN 1993-1-1, Abschnitt 3.2.6 (1)

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

B.2.2 Bauteile (Parts)

Für das betrachtete Brückendeck gibt es in Abaqus mehrere Möglichkeiten die einzelnen Bauteile zu modellieren. In diesem Modell wurden die Bauteile als Volumen-, Schalen- und Stabelemente modelliert. Die Modellierungsart, sowie die Blechstärken des einzelnen Bauteils können Tabelle 35 entnommen werden.

Bauteile	Dicke	Element
Hauptträger	$t_{HT} = 12 \text{ mm}$	Schale
Querträger	$t_{QT} = 8 \text{ mm}$	Schale
Querträger Untergurt	160x8	Stab
Längsrippen	$t_{LR} = 6 \text{ mm}$	Schale
Schweißnähte LR an DB	siehe Geometrie	Volumen
Deckblech	$t_{DB} = 12 \text{ mm}$	Volumen

Tabelle 35: Modell B - Bauteile

Überblicksmäßig sind die modellierten Schalenelemente Hauptträger, Querträger und Längsrippe in der Ansicht aus Abaqus in den Abbildungen 129 bis 134 dargestellt. Die genauen Abmessungen sind Abschnitt B.1 zu entnehmen.



Abbildung 129: Modell B - Hauptträger (shell) | = 16000 mm



Abbildung 130: Modell B - Querträger (shell) | = 7500 mm



Abbildung 131: Modell B - Längsrippe (shell) | = 16000 mm

Der Untergurt der Träger wurde als Stab-Element (Beam) modelliert. Hierfür war die Geometrieingabe der Länge sowie des gewünschten Profils erforderlich (siehe Abbildung 132). Das verwendete Querschnittsprofil ist ein Rechteck mit den Abmessungen 160x8.

Abbildung 132: Modell B - Querträger Untergurt (beam) l = 7500 mm

Das Deckblech und die Schweißnähte für den Anschluss der Längsrippen an das Deckblech wurden als Volumen-Elemente (Solid) modelliert (siehe Abbildungen 133 und 134), um die lokale Deckblechbiegung gut abbilden zu können und in weiterer Folge die Spannungen an der Schweißnaht abzulesen. (siehe Abschnitt B.2.6)

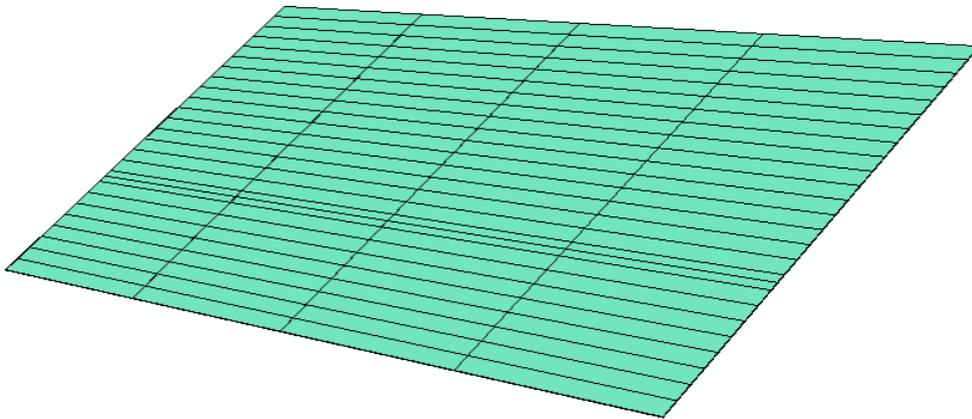


Abbildung 133: Modell B - Deckblech (solid) lxb = 16000 x 7500 mm

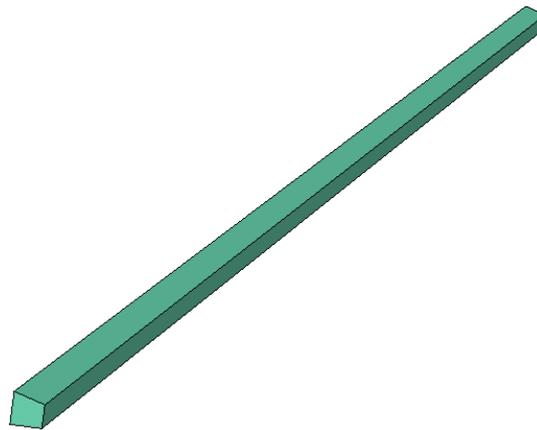


Abbildung 134: Modell B - Schweißnaht (solid) l = 16000 mm

Die Schweißnähte als Verbindung zwischen Deckblech und Längsrippen wurden für alle Längsrippen über die gesamte Brückenlänge modelliert. Für den Anschluss des Querträgers an das Deckblech wurden keine Schweißnähte modelliert, da an diesen keine Spannungen abgelesen werden. Diese wurden durch Kopplungsbedingungen in Abaqus berücksichtigt (siehe Abschnitt B.2.4).

B.2.3 Netzgenerierung

Das Deckblech wurde in 2 Bereiche aufgeteilt. Bereich 1 (Deckblech außen) besteht aus einem größeren Netz (vorgegebene Elementgröße 100 mm), Bereich 2 (Deckblech innen) aus einem feineren (vorgegebene Elementgröße 20 mm). Die Netzgenerierung erfolgte in Abaqus mit der Einstellung "structured", um möglichst gleichmäßige Elemente zu erhalten. Die tatsächliche Elementgröße variiert aufgrund der automatischen Verteilung und der nachträglich gemachten Verfeinerungen zur Einhaltung einer optimalen Elementgeometrie. Das generierte Netz-Modell ist nachfolgend in Abbildung 135 mit den Elementgrößen je Bauteil dargestellt.

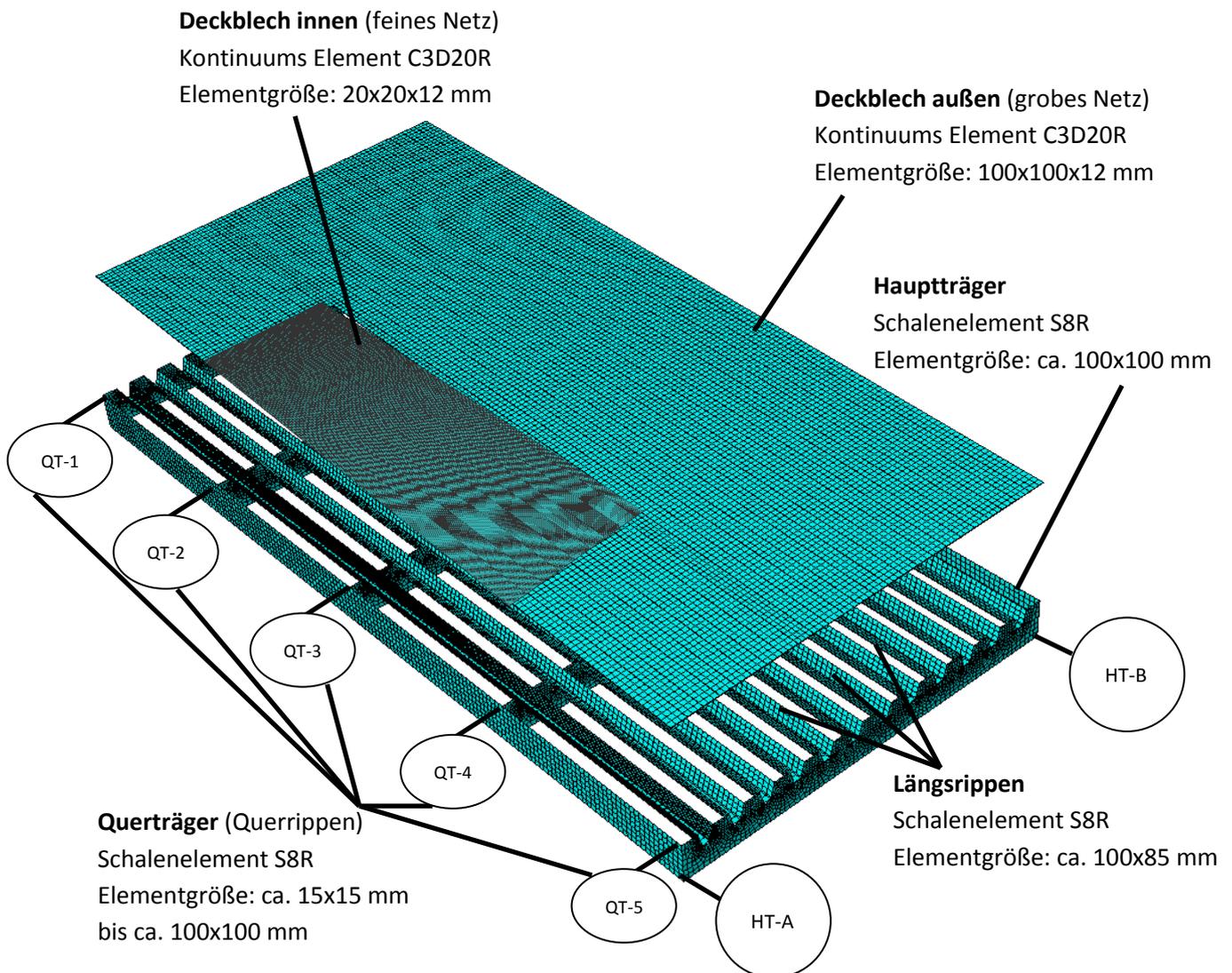


Abbildung 135: Modell B - Ansicht FEM-Modell Elementgrößen

Darüber hinaus wurde zusätzlich die Netzfeinheit der ersten Längsrippe (LR-1) auf eine Elementgröße von 25x100 festgelegt.

Abbildung 136 zeigt den Schnitt durch Querträger 3 sowie die zur automatischen FE-Netzgenerierung gemachten Netzverfeinerungen.

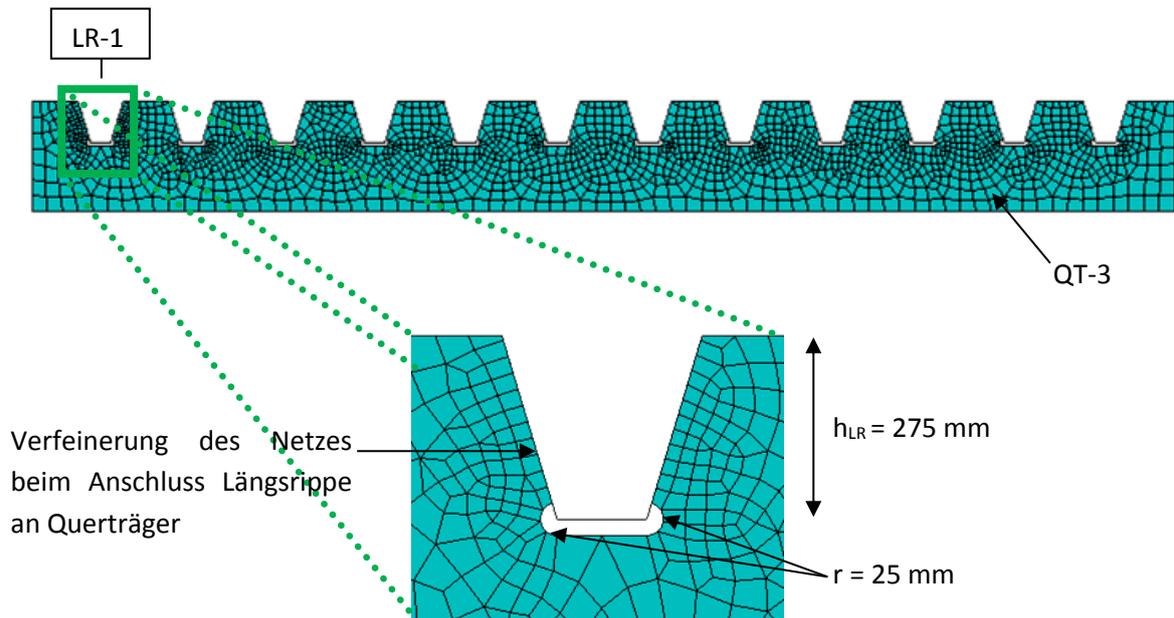


Abbildung 136: Modell B - Netzgenerierung, Schnitt durch Querträger 3

Um ein möglichst gleichmäßiges FE-Netz zu erhalten, musste im Anschlussbereich der Längsrippe an die Querrippe sowie teilweise im Bereich des runden Ausschnitts am Querträger das Netz durch Erhöhung der Knotendichte und damit verbundenen Elementverfeinerung verdichtet werden (siehe Abbildung 136). Des Weiteren war es aufgrund der Querträgergeometrie notwendig, für diesen besonders im Anschlussbereich an das Deckblech eine Verfeinerung durchzuführen. (siehe Abbildung 135)

B.2.4 Kopplungen

Um ein zusammenhängendes Modell zu generieren, mit welchem die Berechnungen durchgeführt werden können, ist es in Abaqus notwendig, Bauteile miteinander über Kopplungsbedingungen zu verbinden, um Verschiebungen und Verdrehungen der Anschlussknoten übergeben zu können. Des Weiteren werden durch die Kopplung auch die nicht modellierten Schweißverbindungen berücksichtigt (vgl. Tabelle 36).

Die Kopplung der Schalen-Elemente, Hauptträger, Querträger und Längsrippen, erfolgte in Abaqus mit dem Befehl "Merge", wodurch diese Einzelteile zu einem zusammenhängenden Teil verbunden wurden und die Bauteile dadurch starr miteinander verbunden sind. Ebenfalls wurden die Volumen-Elemente, Deckblech und Schweißnähte mit dem Befehl "Merge" zu einem Teil verbunden. Die beiden Deckblechteile wurden als "Tie" (starre Verbindung) verbunden. Weiters wurde nun das Deckblech (Solid-Element) mit den Rippen (Shell-Elemente) mit der Bedingung "Shell-to-solid coupling" verbunden. Zuletzt wurden noch die Untergurte mit den zugehörigen Querträgern als "Tie" verbunden. Eine Auflistung der miteinander gekoppelten Bauteile sowie die verwendete Methode ist in Tabelle 36 zusammengefasst.

Teil 1	Teil 2	Kopplungsmethode
HT	QT, LR	Merge
Deckblech innen	Schweißnähte	Merge
Deckblech innen	Deckblech außen	Tie
Rippen (HT,QT,LR)	Deckblech	Shell-to-solid coupling
Querträger	Querträger-Untergurt	Tie

Tabelle 36: Modell B - Kopplungsmethoden

B.2.5 Lagerung

Die Hauptträger wurden, wie in den Abbildungen 137 und 138 ersichtlich, als durchgehend gelenkig gelagert modelliert. Die gesperrten Freiheitsgrade sind für den Hauptträger A: $U_x = U_y = U_z = Rot_z = 0$ und für den Hauptträger B: $U_x = U_y = Rot_z = 0$.

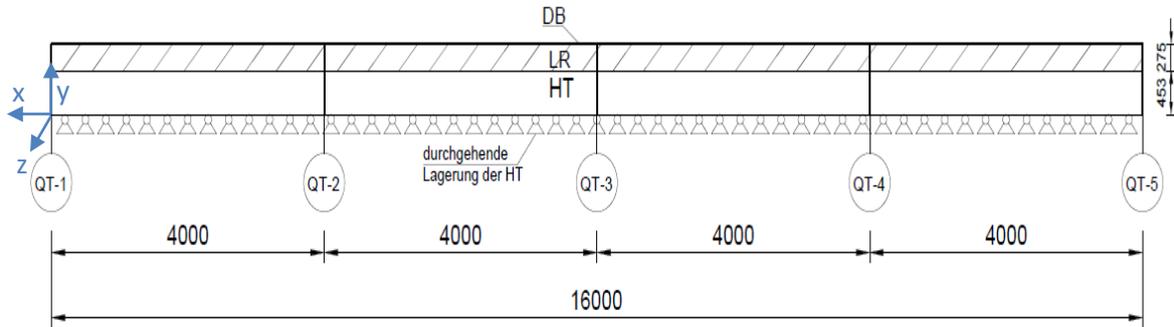


Abbildung 137: Modell B - Lagerung der Hauptträger

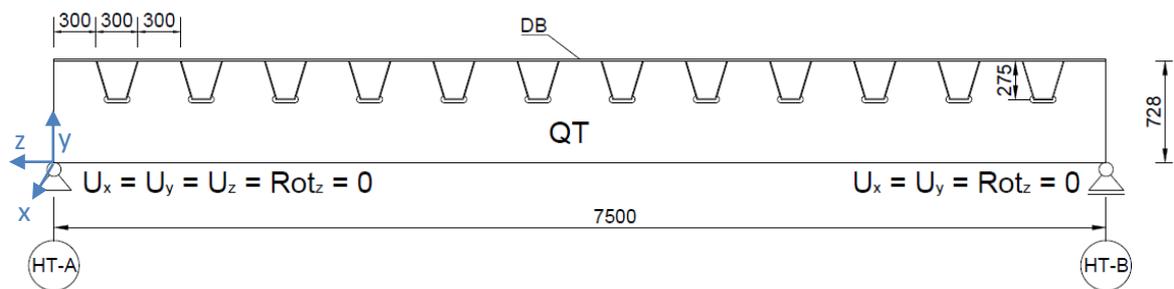


Abbildung 138: Modell B - Lagerung der Querträger

B.2.6 Betrachtete Detailpunkte

Im Rahmen der Berechnungen wurden zwei Detailpunkte im Hinblick auf ihre Ermüdungsbelastung gesondert betrachtet. Beide Punkte befinden sich im Bereich der ersten Längsrippe (LR-1), wobei Detailpunkt D2 direkt bei Querträger 3 (QT-3) liegt und Detailpunkt D1 in einem Abstand von $e_{LR} = 300 \text{ mm}$ zum QT-3 (siehe Abbildung 140).

Detail D1 betrachtet den Anschlusspunkt der Schweißnaht an das Deckblech (siehe Abbildungen 139 und 140). Für diesen Detailpunkt liegt aus der EN 1993-1-9, Anhang B, Tabelle B.1 ein Kerbfall 100 ($\Delta\sigma_c = 100 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$) vor.

Detail D2 betrachtet den maßgebenden Anschlusspunkt der Längsrippe an den Querträger (siehe Abbildungen 139 und 140). Für diesen Detailpunkt liegt aus der EN 1993-1-9, Anhang B, Tabelle B.1 ein Kerbfall 100 ($\Delta\sigma_c = 100 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$) vor.

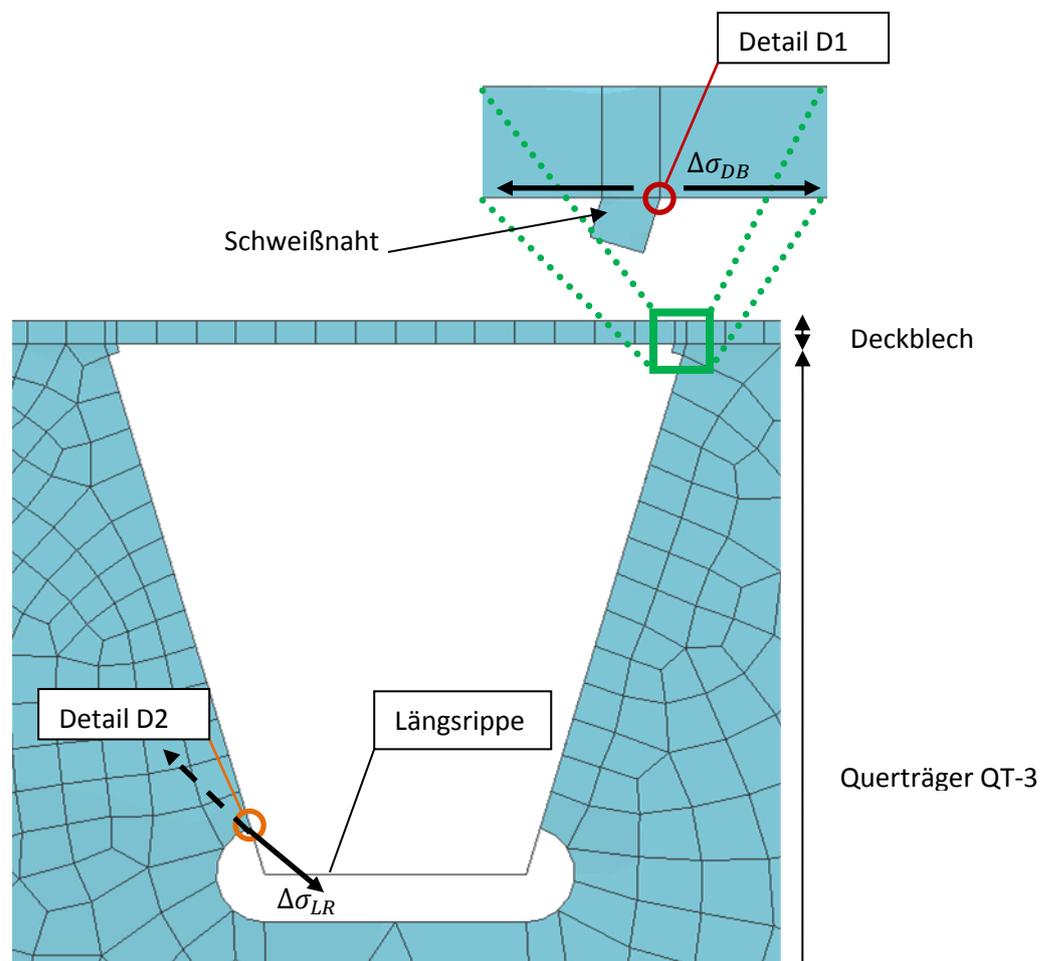


Abbildung 139: Modell B - Betrachtete Detailpunkte

Zur besseren Erläuterung, wo sich die Detailpunkte im Grundriss befinden, soll nachfolgende Abbildung 140 dienen.

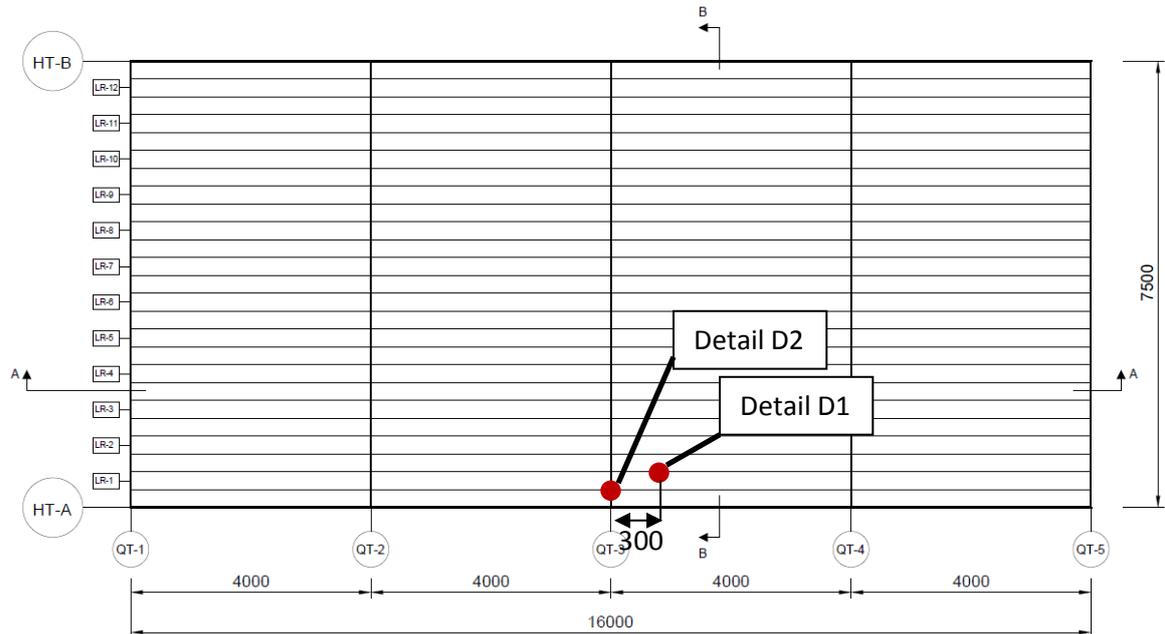


Abbildung 140: Modell B - Lage im Grundriss von Detail D1 und D2

Detailpunkt D1 liegt nicht auf derselben Seite der Längsrippe wie Punkt D2, da beim Aufstellen der Radlast mittig über D1 aufgrund der breiten Doppelbereifung des Reifentyps B diese sonst über das betrachtete Brückendeck hinaus stehen würde (siehe Abbildungen 139 und 140).

B.2.7 Lastaufstellung

Zur Berechnung der schädigenden Spannungsspiele wurden das Ermüdungslastmodell 3 (ELM 3) sowie das Ermüdungslastmodell 4 (ELM 4) lt. ÖNORM EN 1991-2, Abschnitt 4.6.4 und Abschnitt 4.6.5 angewendet. Weiters wurde ein modifiziertes Ermüdungslastmodell 4 (ELM 4-mod) aus [6] angesetzt. Die einzelnen Lastmodelle werden in Anhang D näher beschrieben.

Mit den einzelnen Einheitsflächenlasten eines Reifens je Schwerfahrzeugstyp aus Anhang D.3 wurde ein Lastzug über das Brückendeck erzeugt, wobei der Schwerpunkt der Lastfläche für Detail D1 mittig über der Schweißnaht der Längsrippe 1 (LR-1) auf der Seite der LR-2 liegt. Für Detail D2 liegt der Schwerpunkt der Lastfläche mittig über der LR-1. Dies führt nun im Detailpunkt D1 und D2 zum größten Spannungsspiel. Aufgrund des vernachlässigten Einflusses von Nebenfahrstreifen wurde nur die Radlast über der ersten Längsrippe angesetzt. (siehe Abbildung 141)

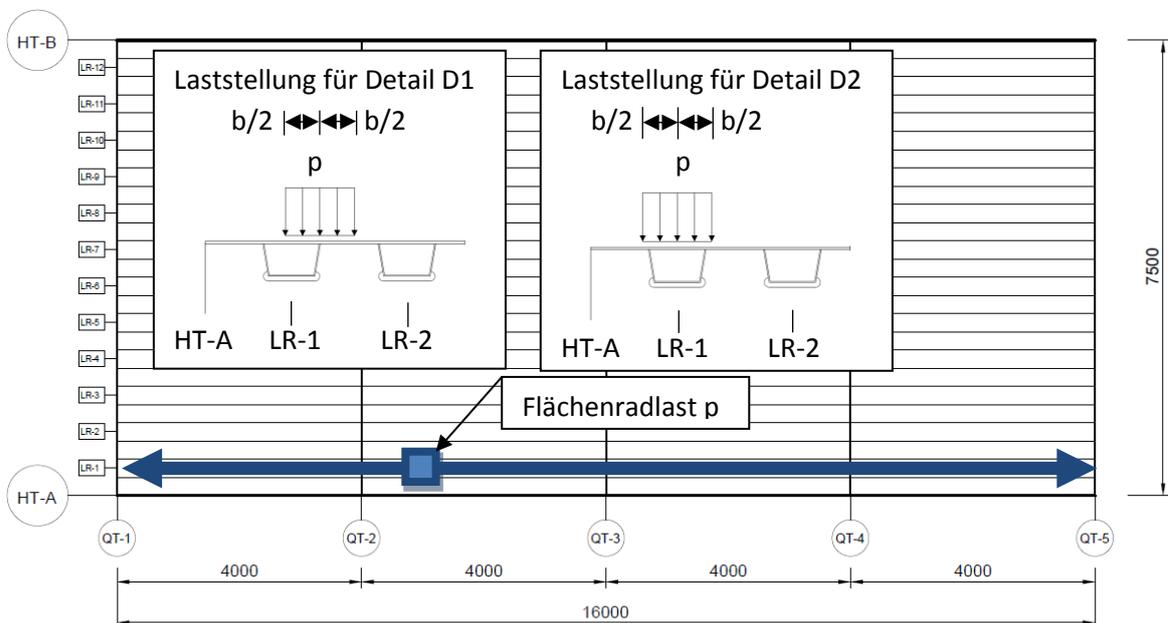


Abbildung 141: Modell B - Lastzug für größtes Spannungsspiel in Detail D1 und D2

In weiterer Folge wurden die Spannungen ausgelesen und damit im Programm Microsoft Excel die Einflusslinien je Detailpunkt erstellt.

B.3 Ermittelte Einflusslinien

B.3.1 Detail D1 - Spannungseinflusslinien

Den Einflusslinien für das Detail D1 geht die Annahme voraus, dass diese ident sind wie jene des Modell A in Abschnitt A.3. Daher wurden Umrechnungsfaktoren für jede Achse bestimmt, mit welchen die Lastkollektivteile $\Delta\sigma_i$ aus Modell A entsprechend skaliert wurden.

Die Umrechnungsfaktoren errechnen sich wie folgt:

$$\text{Achse A: } f_A = \frac{\sigma_{\min,A,Modell B}}{\sigma_{\min,A,Modell A}} = \frac{-57,97 \left[\frac{N}{mm^2}\right]}{-110,94 \left[\frac{N}{mm^2}\right]} = 0,52$$

$$\text{Achse B: } f_B = \frac{\sigma_{\min,B,Modell B}}{\sigma_{\min,B,Modell A}} = \frac{-42,61 \left[\frac{N}{mm^2}\right]}{-103,78 \left[\frac{N}{mm^2}\right]} = 0,41$$

$$\text{Achse C: } f_C = \frac{\sigma_{\min,C,Modell B}}{\sigma_{\min,C,Modell A}} = \frac{-57,89 \left[\frac{N}{mm^2}\right]}{-115,70 \left[\frac{N}{mm^2}\right]} = 0,50$$

Die Umrechnung der Lastkollektive des Modell A auf jene de des Modell B erfolgte mit

$$\Delta\sigma_{i,Modell B} = \Delta\sigma_{i,Modell A} * f_i$$

Da es sich um dieselben Einflusslinien wie bei dem Modell A handelt, werden diese hier nicht nochmals dargestellt.

Zur Ermittlung von $\Delta\sigma_{ELM3,D1}$ wurde wie für das Modell A die Radlast aus dem Ermüdungslastmodell 3 direkt über dem Detailpunkt D1 angesetzt. Dadurch ergab sich

$$\Delta\sigma_{ELM3,D1} = 54,13 \left[\frac{N}{mm^2}\right]$$

B.3.2 Detail D2 – Spannungseinflusslinien aus Einheitsachslasten

Die Einflusslinien für Detail D2 wurden mit den aus dem Berechnungsmodell ausgelesenen Spannungen am Detailpunkt erstellt. Aus ihnen erkennt man in den Abbildungen 142 bis 144 die beiden Spannungsspiele welche jeweils ein Maximum im Detailpunkt hervorrufen, wenn das betreffende Rad der Achse in einem Abstand von 160 cm zum Detailpunkt mittig über der Längsrippe steht. In den nachfolgenden Abbildungen 142 bis 144 sind darüber hinaus die Querträger durch dickere vertikale Linien bei $x = -400$ und 400 cm gekennzeichnet.

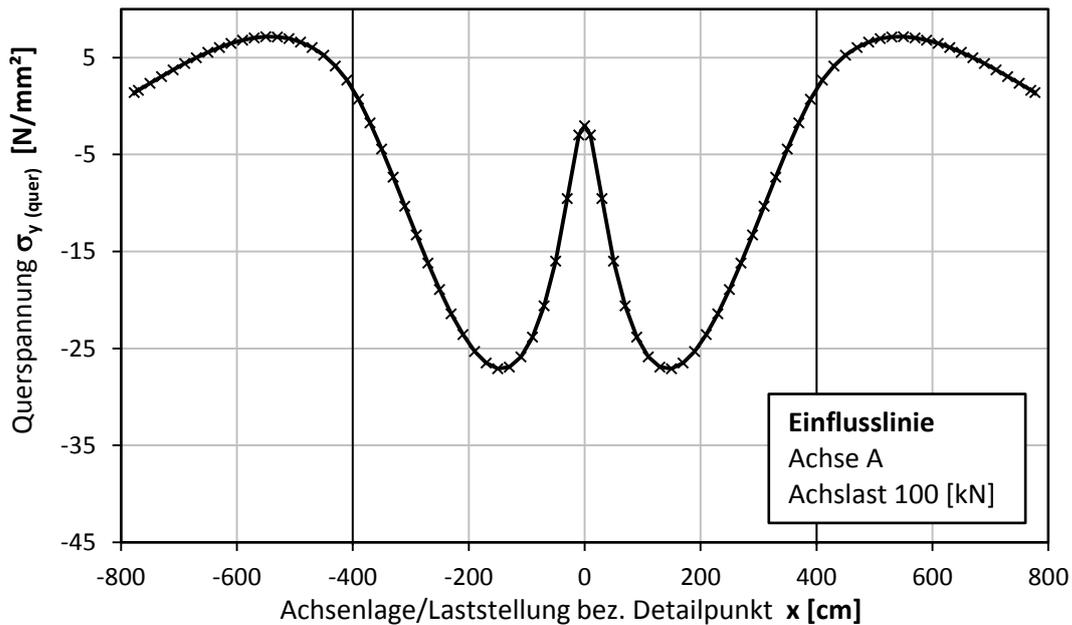


Abbildung 142: Detail D2 - Spannungseinflusslinie aus Achse A

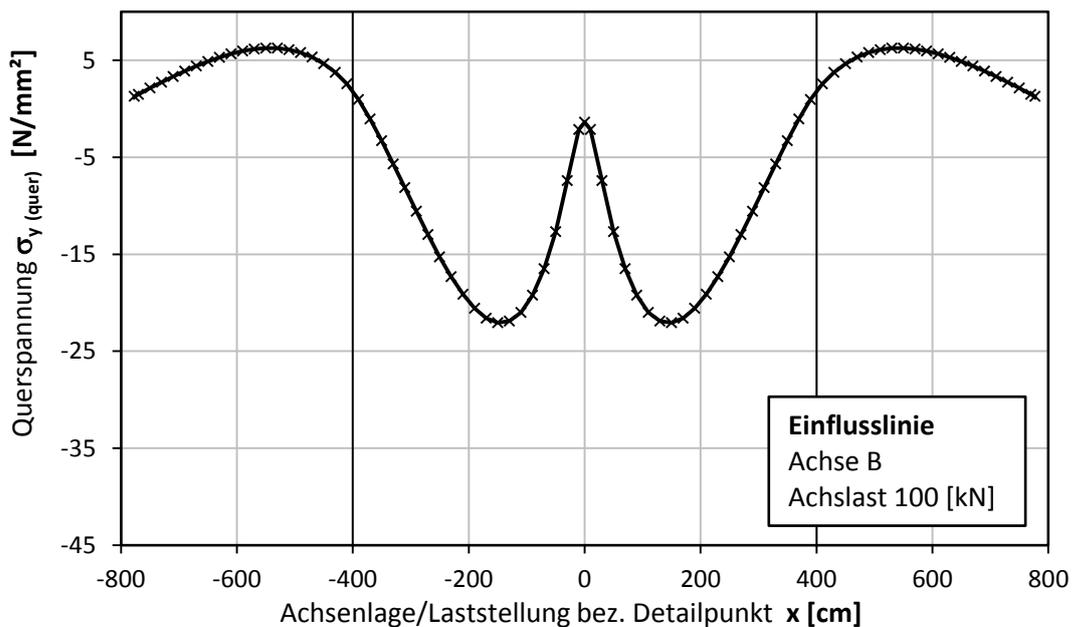


Abbildung 143: Detail D2 - Spannungseinflusslinie aus Achse B

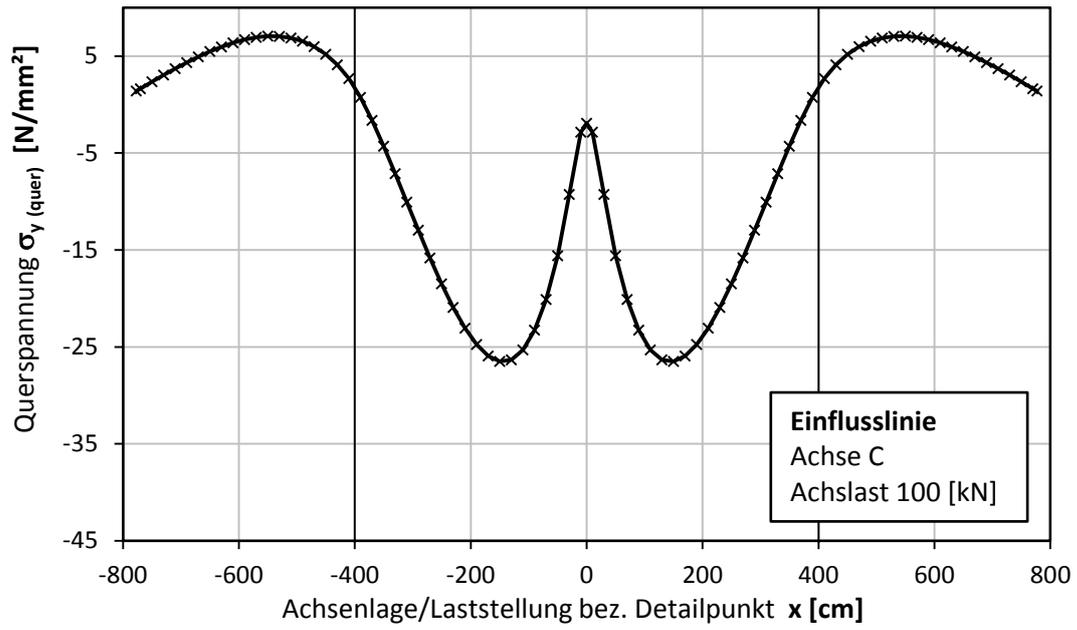


Abbildung 144: Detail D2 - Spannungseinflusslinie aus Achse C

B.4 Ermittlung der Lastkollektive

B.4.1 Detail D1 – Lastspiele aus ELM 4

Die Spannungsspiele $\Delta\sigma_i$ für Detail D1 wurden wie in Abschnitt B.3.1 gezeigt, aus jenen von Modell A errechnet und sind in den nachfolgenden Tabellen 37 bis 46 zusammengefasst. (vgl. Tabellen 11 bis 15)

B.4.1.1 Schwerfahrzeug Typ T1

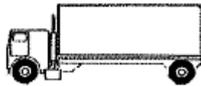
		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{[mm^2]}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	74,83	20
$\Delta\sigma_2$	34,89	20

Tabelle 37: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T1

B.4.1.2 Schwerfahrzeug Typ T2

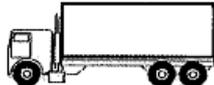
		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{[mm^2]}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	72,08	5
$\Delta\sigma_2$	52,34	5
$\Delta\sigma_3$	31,37	5

Tabelle 38: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T2

B.4.1.3 Schwerfahrzeug Typ T3

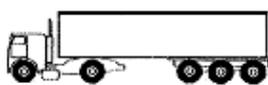
		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{[mm^2]}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	86,10	50
$\Delta\sigma_2$	54,99	50
$\Delta\sigma_3$	54,14	50
$\Delta\sigma_4$	48,36	50
$\Delta\sigma_5$	38,14	50

Tabelle 39: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T3

B.4.1.4 Schwerfahrzeug Typ T4

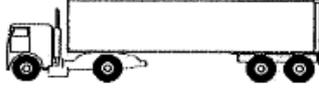
		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	62,96	15
$\Delta\sigma_2$	51,11	15
$\Delta\sigma_3$	38,86	15
$\Delta\sigma_4$	31,19	15

Tabelle 40: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T4

B.4.1.5 Schwerfahrzeug Typ T5

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	74,68	10
$\Delta\sigma_2$	51,97	10
$\Delta\sigma_3$	48,02	10
$\Delta\sigma_4$	46,54	10
$\Delta\sigma_5$	38,24	10

Tabelle 41: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T5

B.4.2 Detail D1 – Lastspiele aus ELM 4_mod

Für das Ermüdungslastmodell 4_mod sind in den Tabellen 42 bis 46 die ermittelten Lastspiele dargestellt (vgl. Tabellen 16 bis 20).

B.4.2.1 Schwerfahrzeug Typ T1

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	41,75	20
$\Delta\sigma_2$	28,36	20

Tabelle 42: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T1

B.4.2.2 Schwerfahrzeug Typ T2

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	63,49	5
$\Delta\sigma_2$	46,10	5
$\Delta\sigma_3$	27,61	5

Tabelle 43: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T2

B.4.2.3 Schwerfahrzeug Typ T3

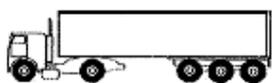
		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	63,25	50
$\Delta\sigma_2$	40,38	50
$\Delta\sigma_3$	39,76	50
$\Delta\sigma_4$	35,52	50
$\Delta\sigma_5$	28,01	50

Tabelle 44: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T3

B.4.2.4 Schwerfahrzeug Typ T4

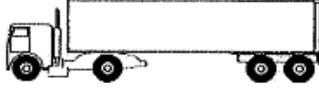
		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	46,80	15
$\Delta\sigma_2$	39,76	15
$\Delta\sigma_3$	26,62	15
$\Delta\sigma_4$	23,22	15

Tabelle 45: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T4

B.4.2.5 Schwerfahrzeug Typ T5

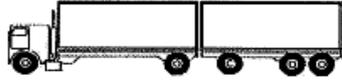
		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	53,25	10
$\Delta\sigma_2$	37,10	10
$\Delta\sigma_3$	34,28	10
$\Delta\sigma_4$	33,20	10
$\Delta\sigma_5$	27,26	10

Tabelle 46: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T5

B.4.3 Detail D2 – Spannungsverläufe und Lastspiele aus ELM 4

Für Detail D2 wurden die Spannungsschwingspiele $\Delta\sigma$ mit Hilfe der Reservoirmethode laut EN 1993-1-9, Bild A.1 c) ausgezählt. Die Einflusslinien der einzelnen Schwerfahrzeuge sind analog wie jene in Abschnitt A.4.3 zu bestimmen.

B.4.3.1 Schwerfahrzeug Typ T1

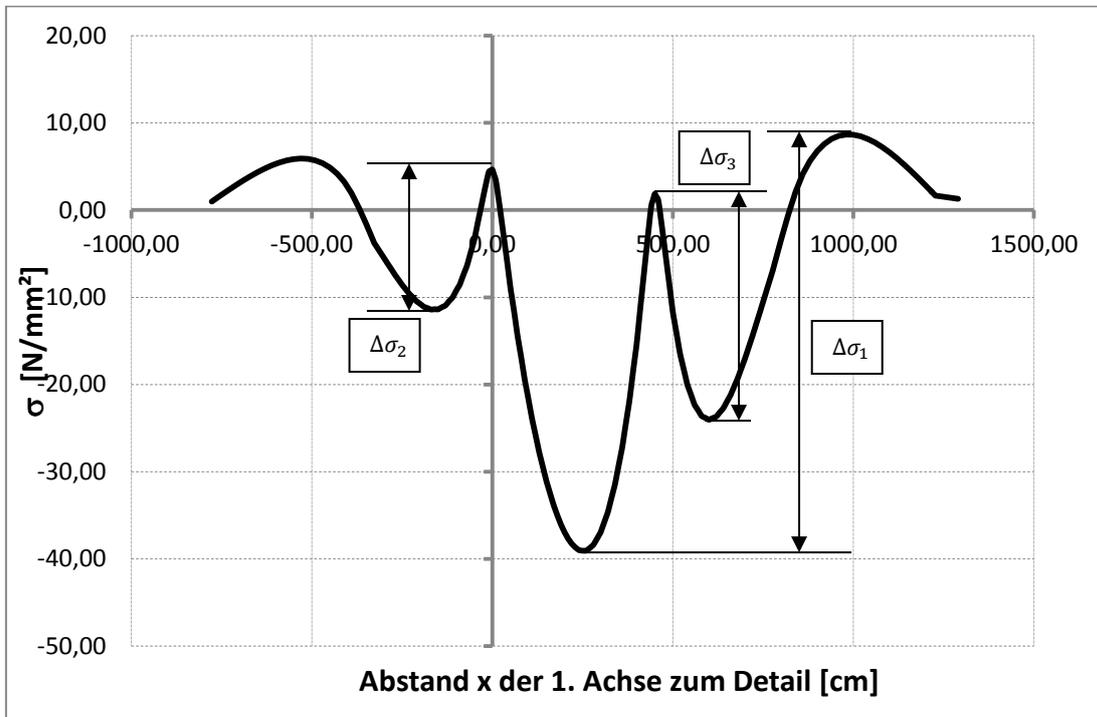


Abbildung 145: Detail D2 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T1

Für den Fahrzeugtyp können nun die Spannungsspiele $\Delta\sigma_i$ aus dem Diagramm der Einflusslinie abgelesen werden, wobei die sehr kleinen Spannungsspiele nicht berücksichtigt wurden. Die Auszählung der Spannungsspiele erfolgt für sämtliche Einflusslinien analog (siehe Abbildungen 145 bis 155 sowie Tabellen 47 bis 56). Für den Fahrzeugtyp T1 sind sie in Tabelle 47 zusammengefasst.

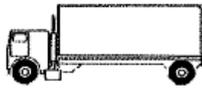
		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	47,73	20
$\Delta\sigma_2$	16,05	20
$\Delta\sigma_3$	25,91	20

Tabelle 47: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T1

B.4.3.2 Schwerfahrzeug Typ T2

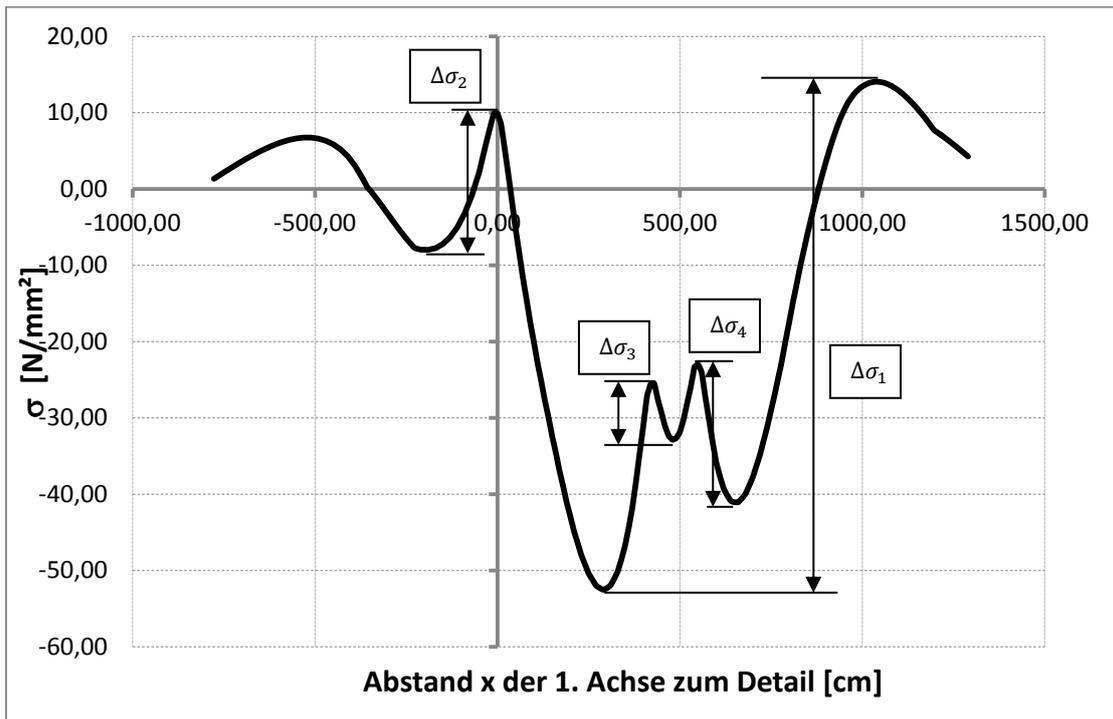


Abbildung 146: Detail D2 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T2

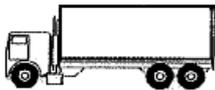
		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{\text{mm}^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	66,59	5
$\Delta\sigma_2$	17,90	5
$\Delta\sigma_3$	7,43	5
$\Delta\sigma_4$	18,07	5

Tabelle 48: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T2

B.4.3.3 Schwerfahrzeug Typ T3

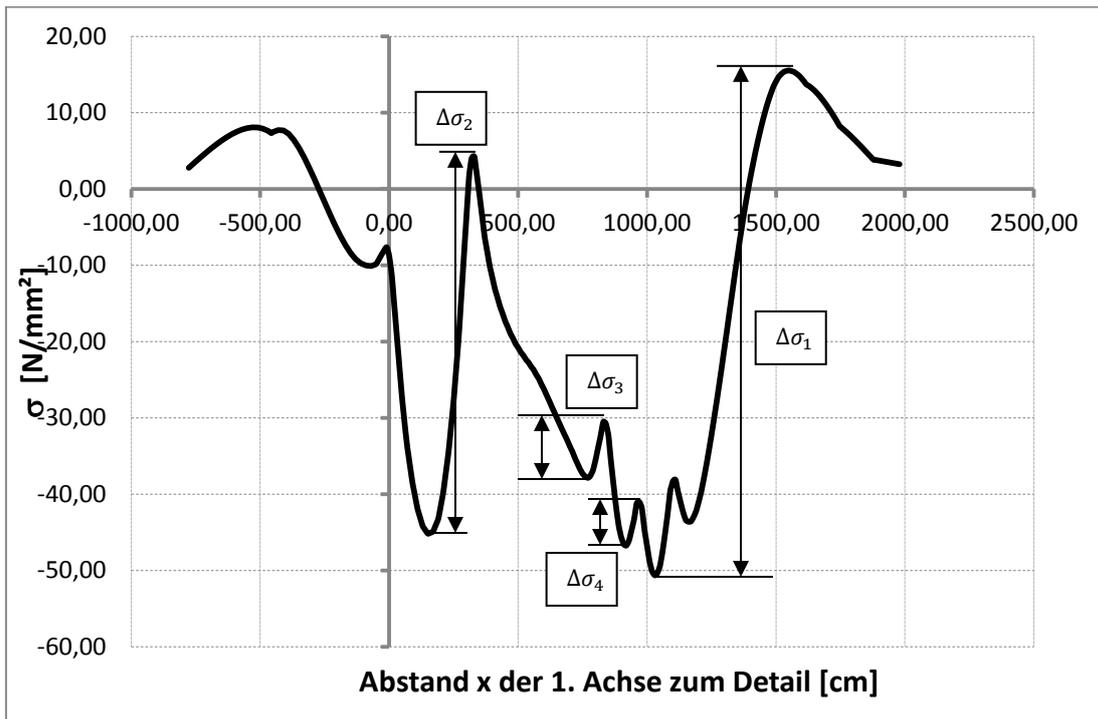


Abbildung 147: Detail D2 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T3

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	66,18	50
$\Delta\sigma_2$	49,51	50
$\Delta\sigma_3$	7,37	50
$\Delta\sigma_4$	5,75	50

Tabelle 49: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T3

B.4.3.4 Schwerfahrzeug Typ T4

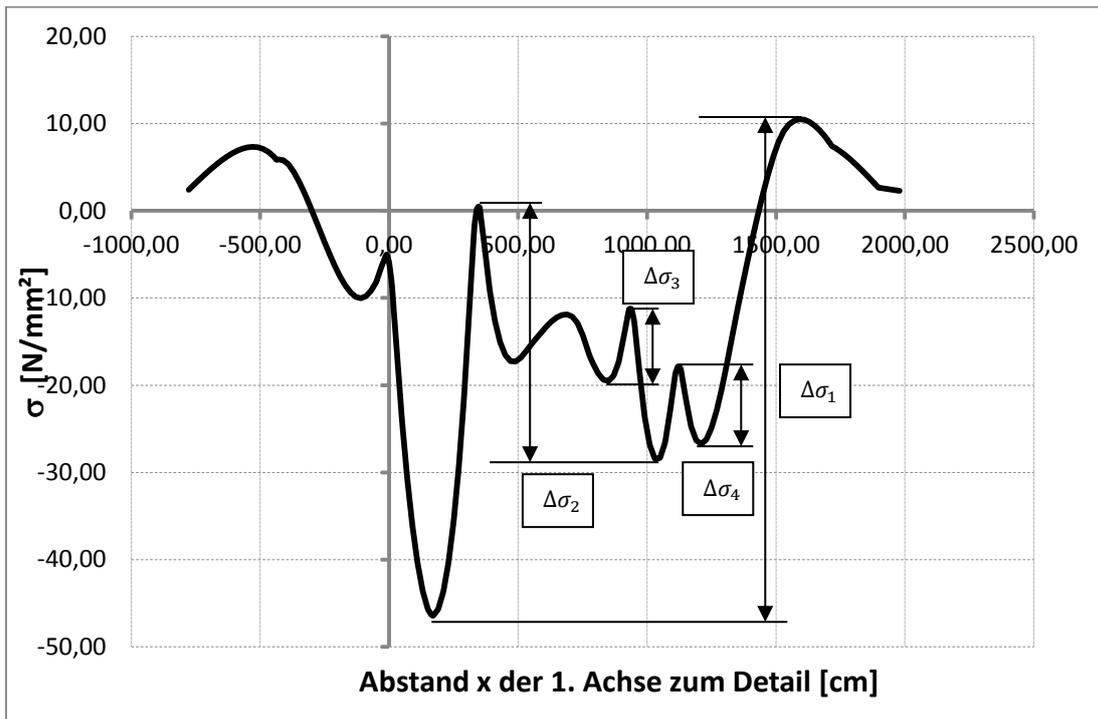


Abbildung 148: Detail D2 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T4

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	56,93	15
$\Delta\sigma_2$	28,93	15
$\Delta\sigma_3$	8,25	15
$\Delta\sigma_4$	8,88	15

Tabelle 50: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T4

B.4.3.5 Schwerfahrzeug Typ T5

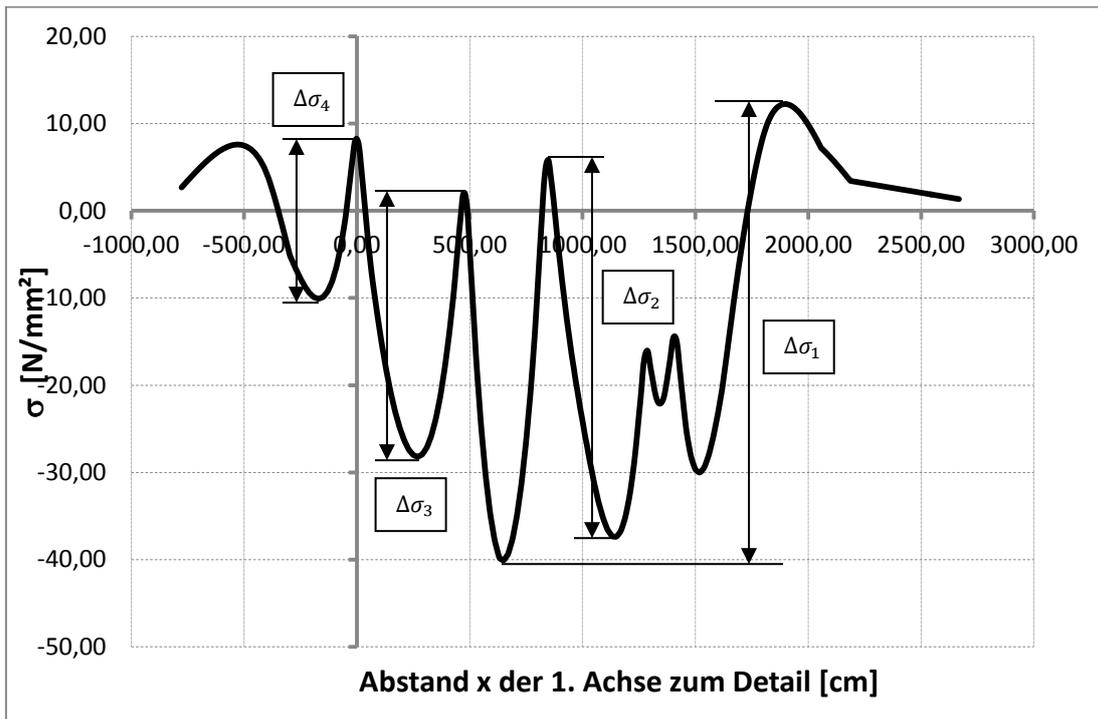


Abbildung 149: Detail D2 - Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T5

$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	52,34	10
$\Delta\sigma_2$	43,21	10
$\Delta\sigma_3$	30,23	10
$\Delta\sigma_4$	18,35	10

Tabelle 51: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T5

B.4.4 Detail D2 – Spannungsverläufe und Lastspiele aus ELM 4_mod

Für das Ermüdungslastmodell 4_mod sind in den Abbildungen 150 bis 154 die Spannungsverläufe je Fahrzeugstyp und zugehörig in den Tabellen 52 bis 56 die ermittelten Lastspiele dargestellt (vgl. Tabellen 26 bis 30).

B.4.4.1 Schwerfahrzeug Typ T1

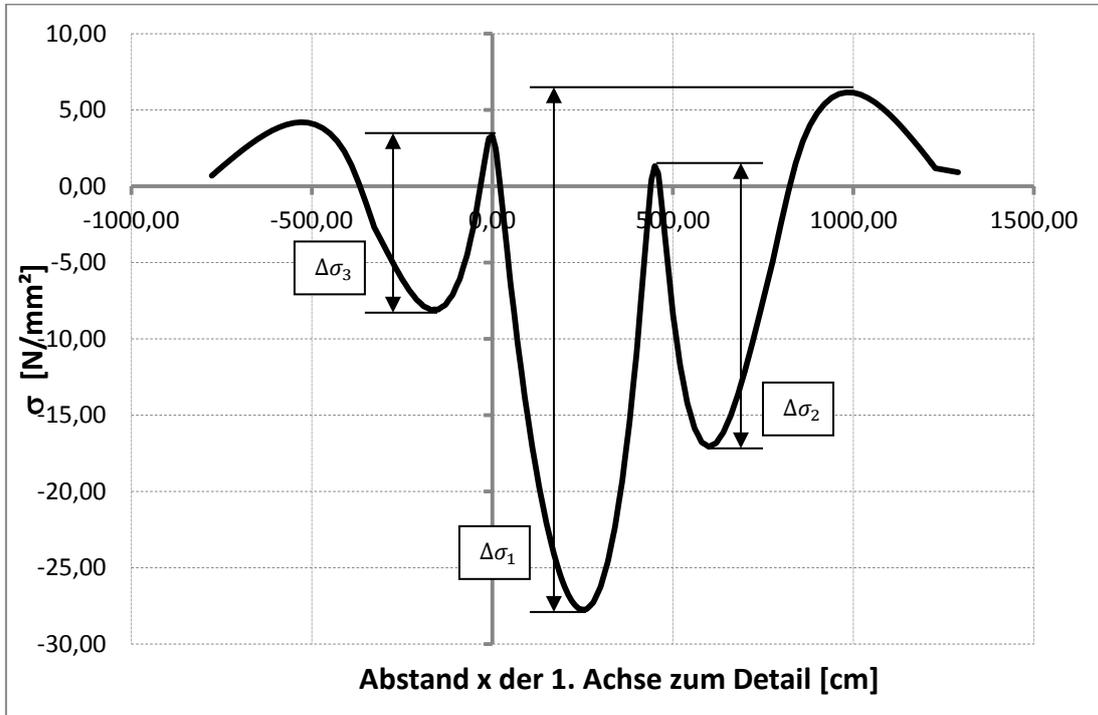


Abbildung 150: Detail D2 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T1

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	33,89	20
$\Delta\sigma_2$	18,40	20
$\Delta\sigma_3$	11,39	20

Tabelle 52: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T1

B.4.4.2 Schwerfahrzeug Typ T2

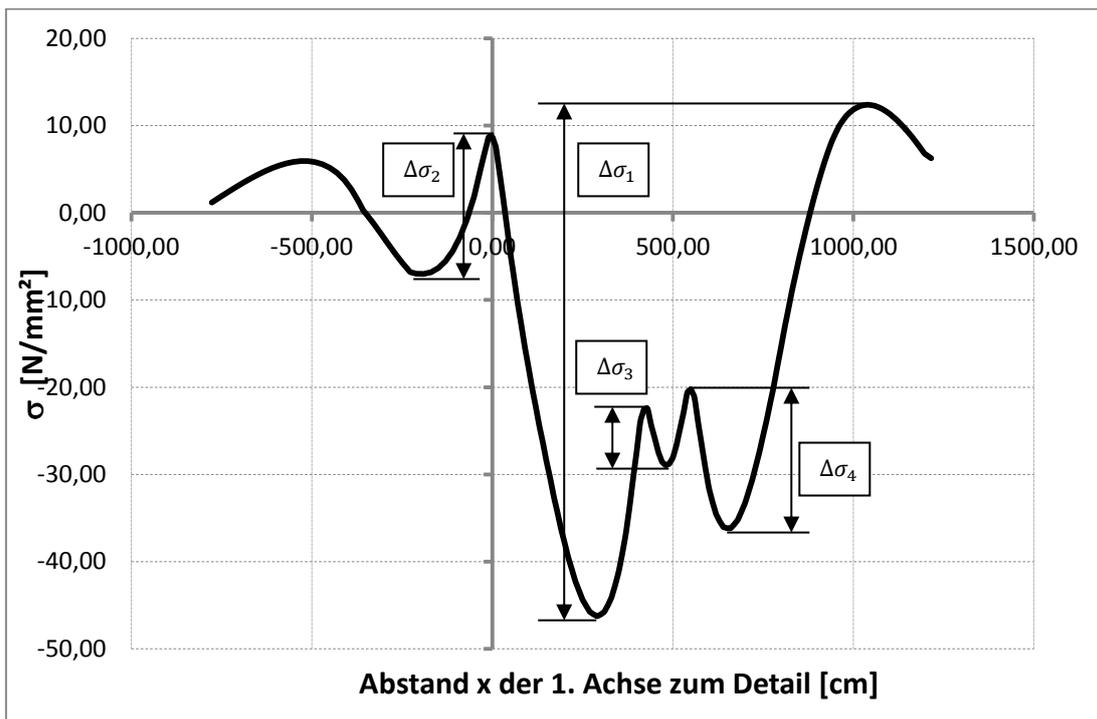


Abbildung 151: Detail D2 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T2

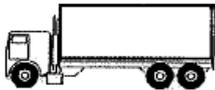
		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	58,66	5
$\Delta\sigma_2$	15,75	5
$\Delta\sigma_3$	6,53	5
$\Delta\sigma_4$	15,92	5

Tabelle 53: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T2

B.4.4.3 Schwerfahrzeug Typ T3

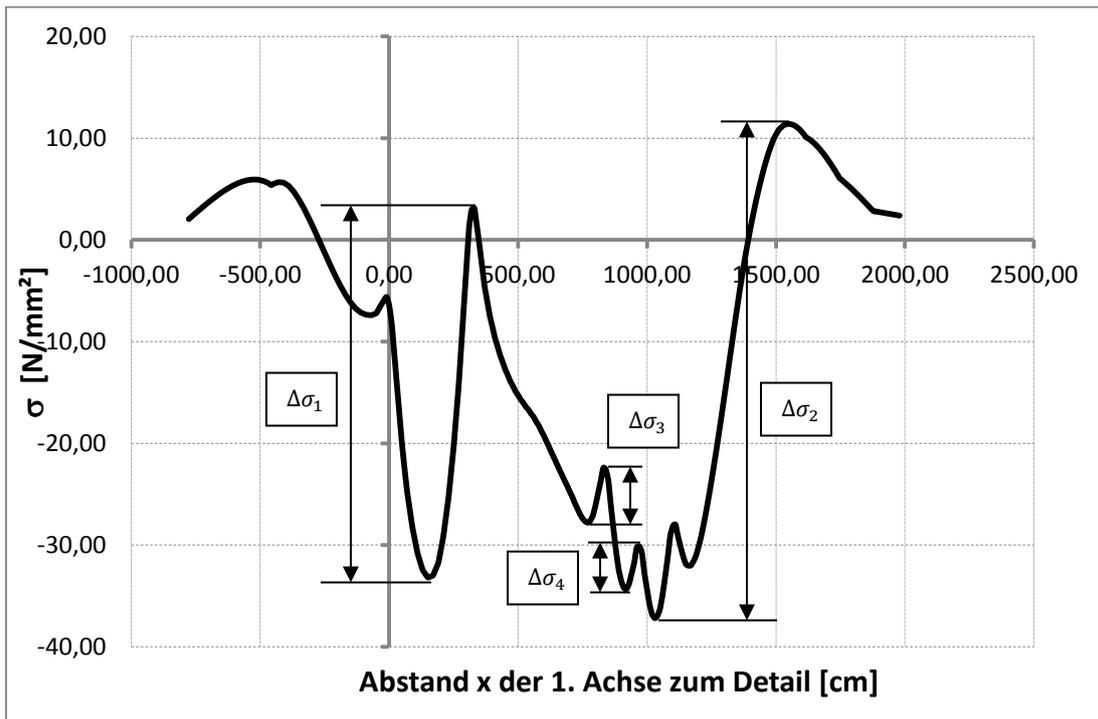


Abbildung 152: Detail D2 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T3

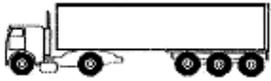
		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{\text{mm}^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	36,37	50
$\Delta\sigma_2$	48,60	50
$\Delta\sigma_3$	5,41	50
$\Delta\sigma_4$	4,22	50

Tabelle 54: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T3

B.4.4.4 Schwerfahrzeug Typ T4

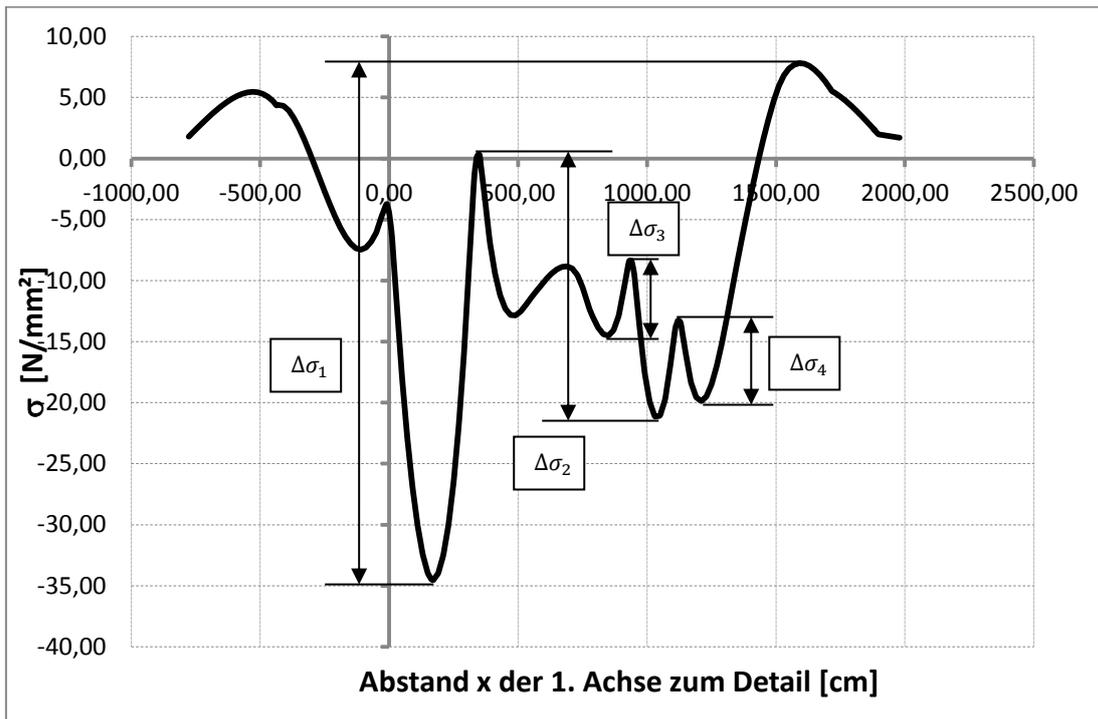


Abbildung 153: Detail D2 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T4

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	42,34	15
$\Delta\sigma_2$	21,50	15
$\Delta\sigma_3$	6,13	15
$\Delta\sigma_4$	6,60	15

Tabelle 55: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T4

B.4.4.5 Schwerfahrzeug Typ T5

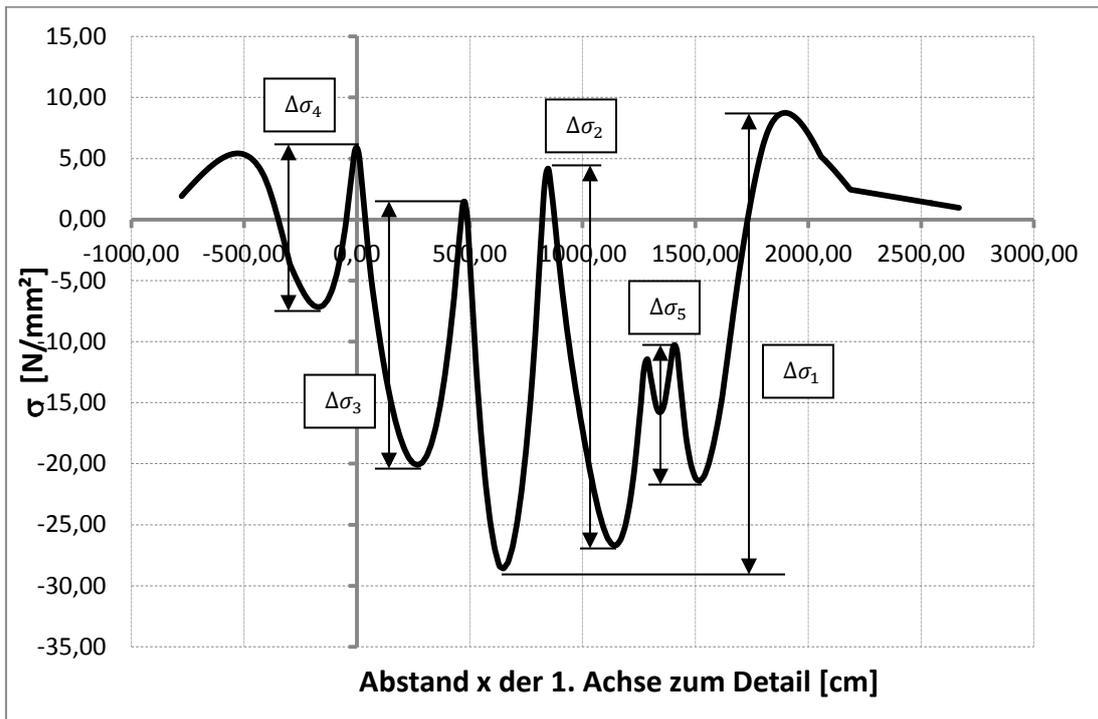


Abbildung 154: Detail D2 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T5

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{\text{mm}^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	37,33	10
$\Delta\sigma_2$	30,84	10
$\Delta\sigma_3$	21,54	10
$\Delta\sigma_4$	13,08	10
$\Delta\sigma_5$	11,16	10

Tabelle 56: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T5

B.4.4.6 Fahrzeug Typ ELM3

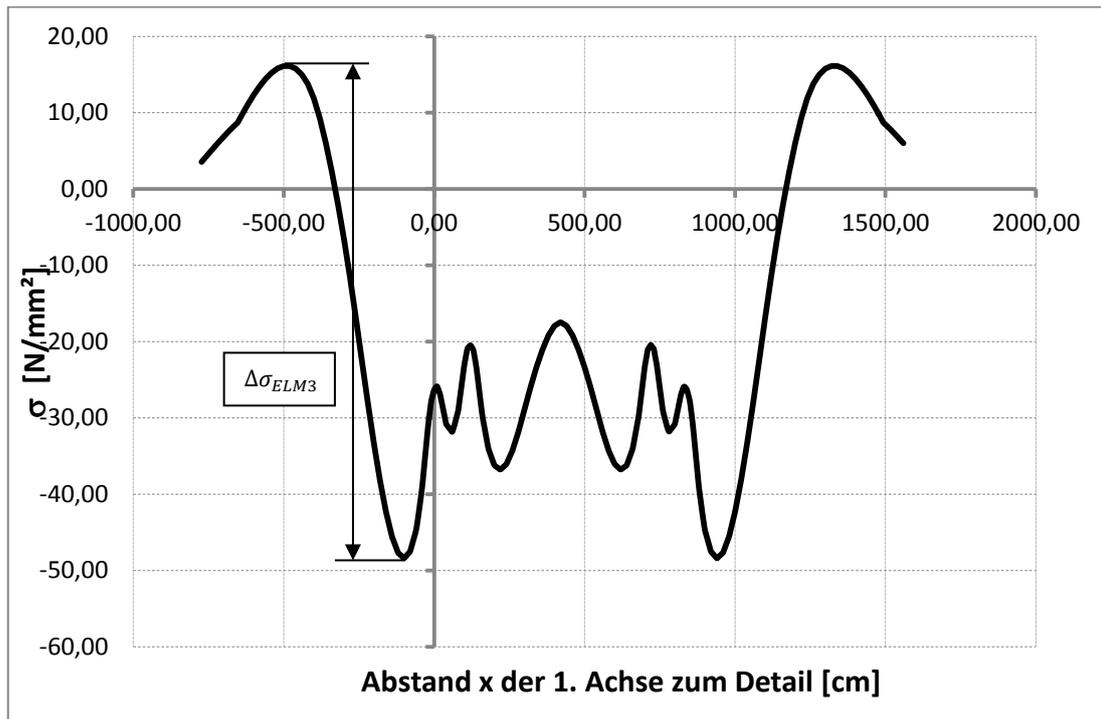


Abbildung 155: Detail D2 – Lastspiel für das Fahrzeug aus ELM3

Für das Ermüdungslastmodell 3 ist nur das maximale Spannungsspiel für die weitere Berechnung maßgebend. Hier ergibt sich $\Delta\sigma_{ELM3,D2} = 64,52 \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$ (siehe Abbildung 155)

B.4.5 Lastkollektiv - Einstufenkollektiv

Wie bei Modell A in Abschnitt A.4.5 werden hier nun in den Abbildungen 156 bis 183 die Lastkollektive mit ihren schädigungsäquivalenten Einstufenkollektiven $\Delta\sigma_e$ für die nach Abbildung 25 untersuchten 5 Lastniveaus, sowie der 2 Grenzfälle $m^* = 3$ und $m^* = 5$ dargestellt (siehe Abschnitt 4).

B.4.5.1 Detail D1 - Lastkollektive aus ELM 4

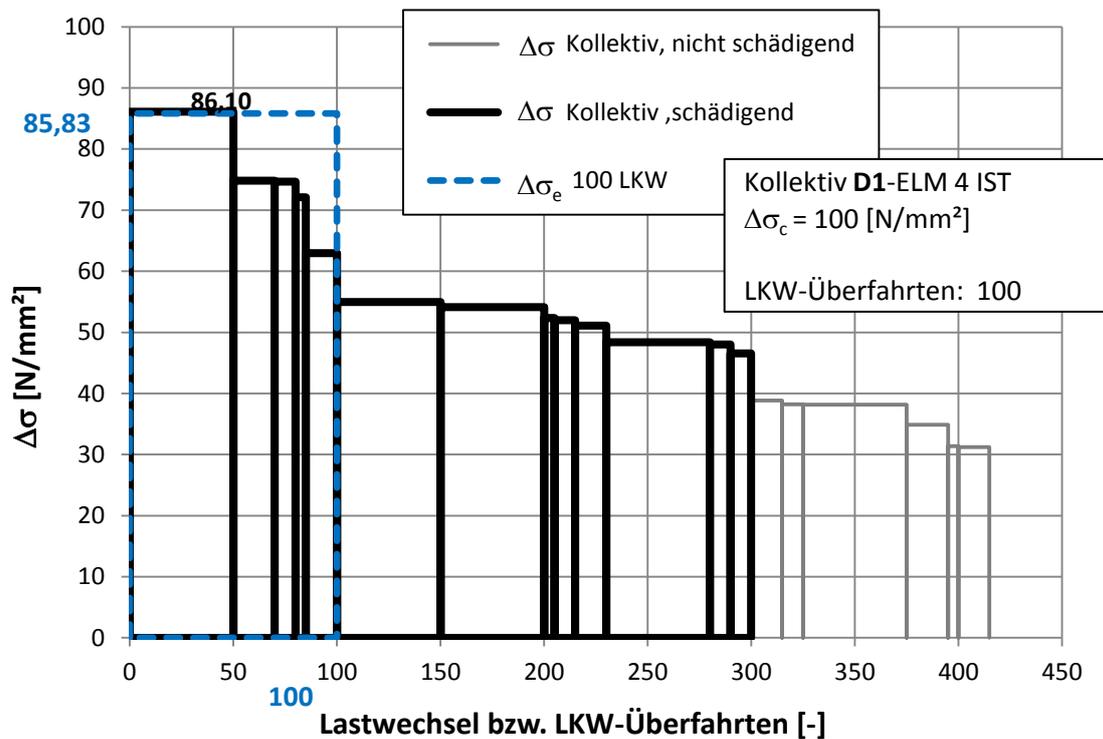


Abbildung 156: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4 IST

Aus dem Lastkollektiv in Abbildung 156 für Detail D1 mit der Belastung aus Ermüdungslastmodell 4 ist erkennbar, dass bezogen auf eine Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c = 100 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$ bereits ein paar Kollektivteile als nicht schädigend wegfallen. Dieser Effekt verstärkt sich noch bei der Verminderung der Kollektivteile um 20% bzw. 50%, wobei bei einer Verminderung um 50% genau noch ein schädigender Kollektivteil vorhanden ist (siehe Abbildungen 158 und 160). Die nicht schädigenden Kollektivteile sind mit grauen Linien dargestellt.

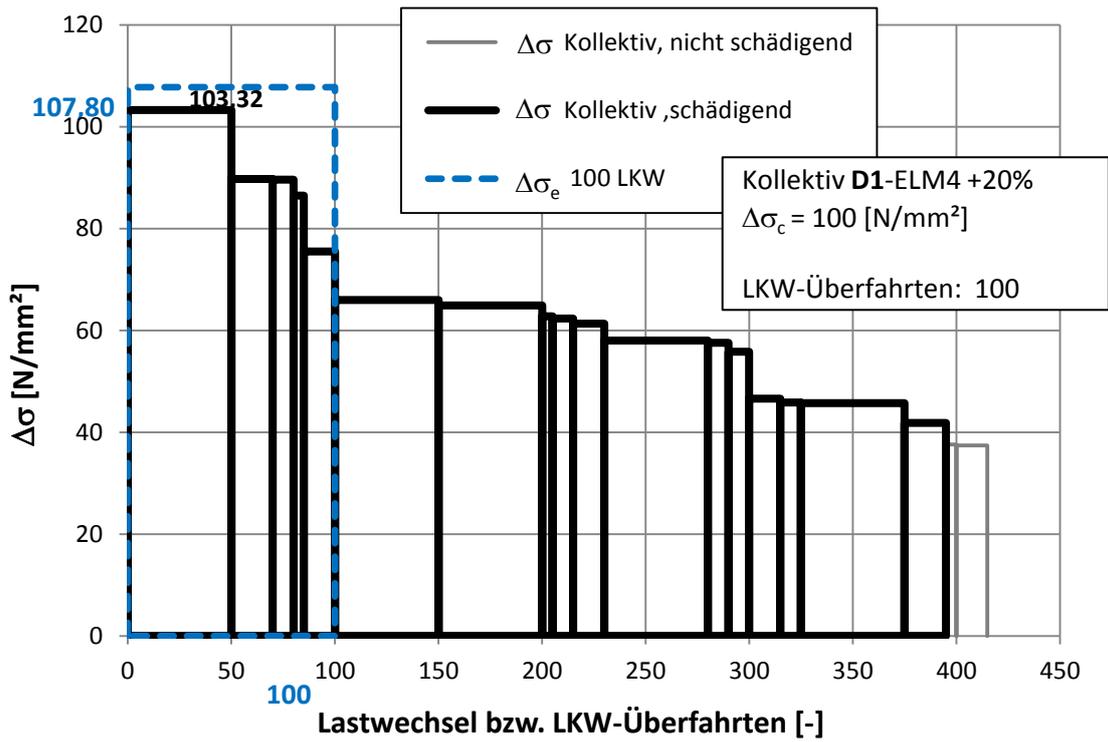


Abbildung 157: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4 +20%

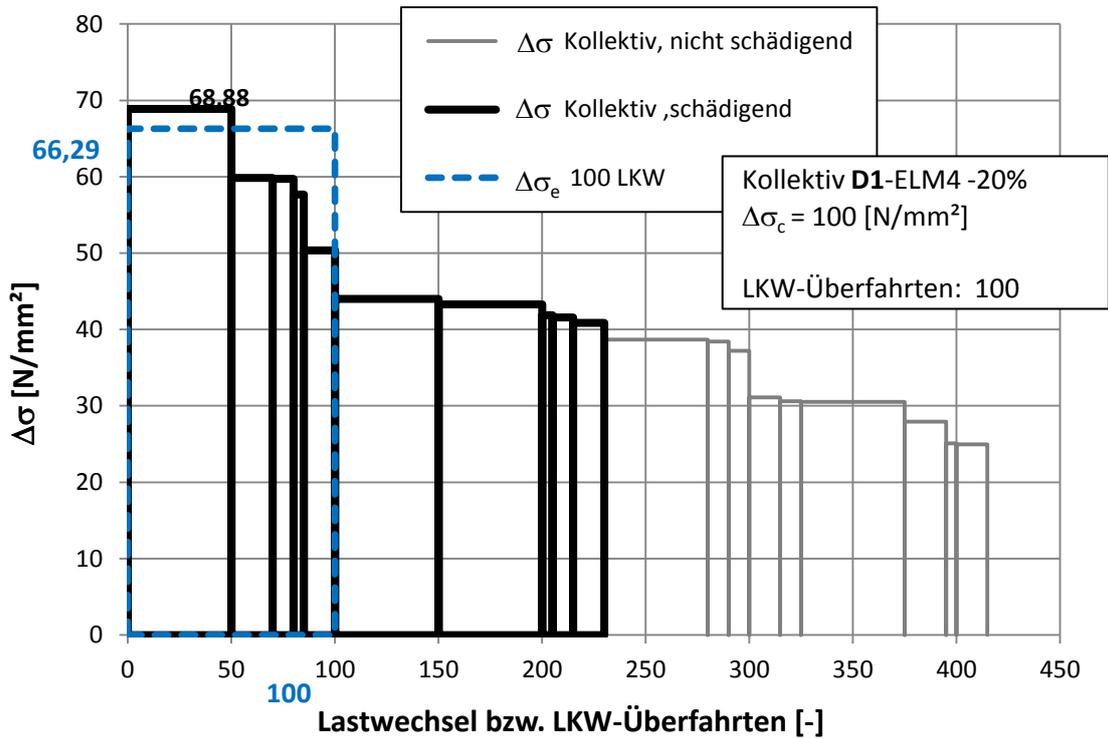


Abbildung 158: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4 -20%

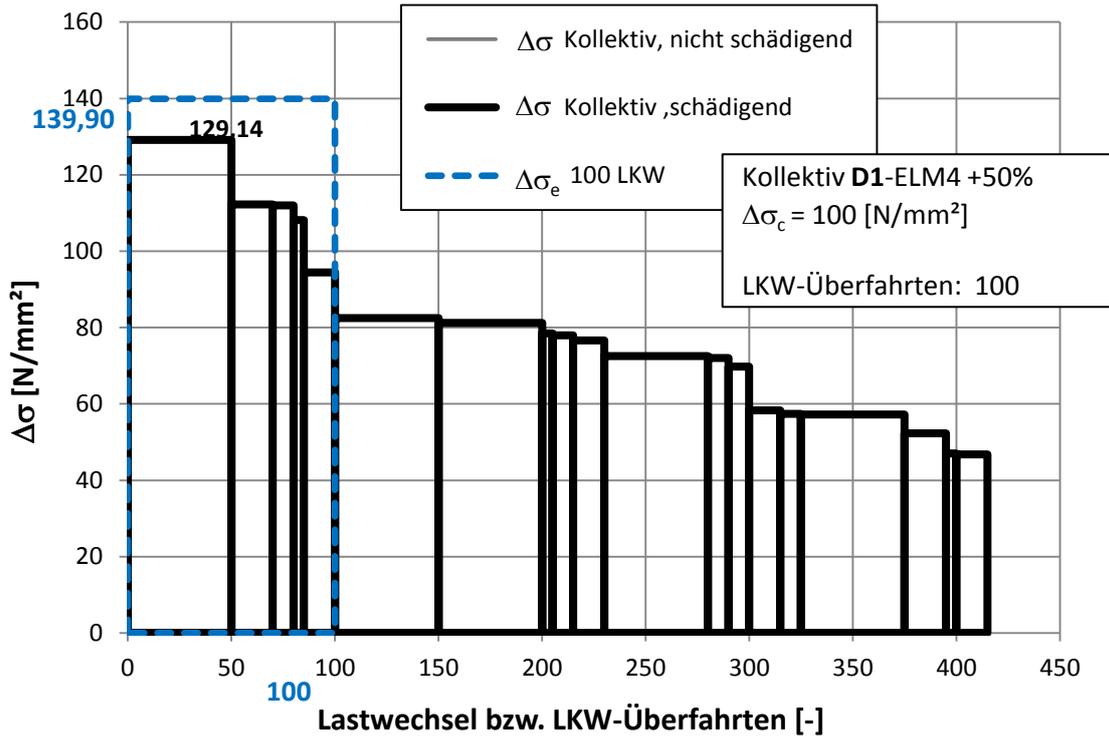


Abbildung 159: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4 +50%

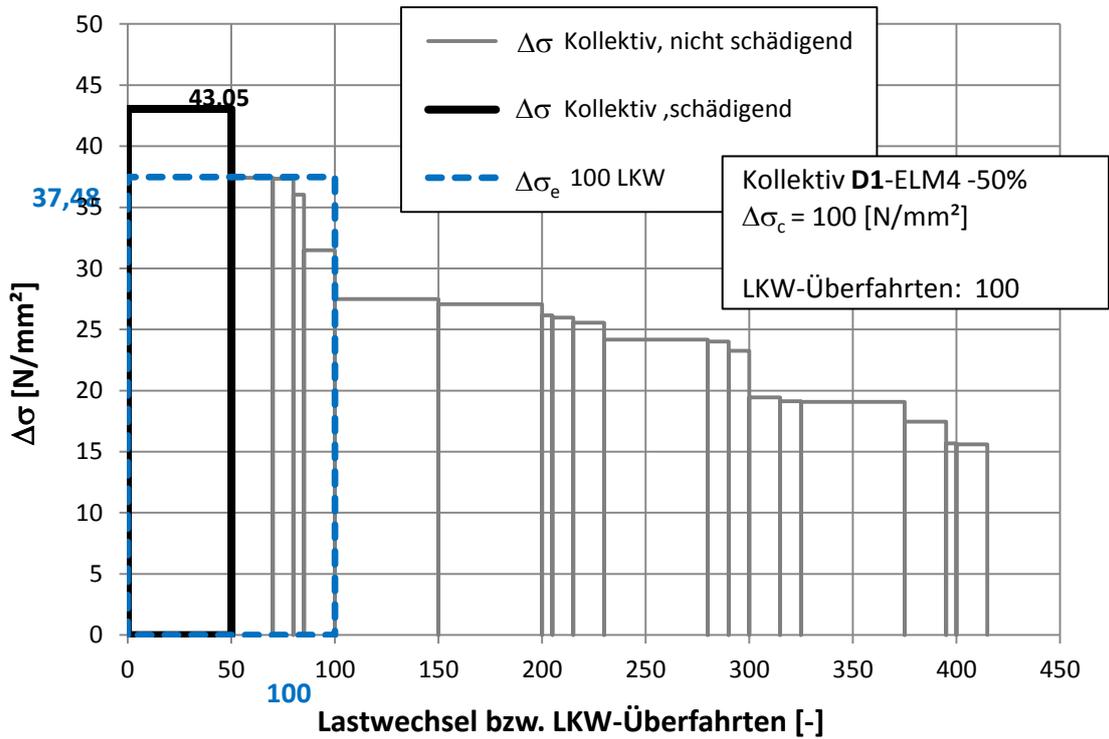


Abbildung 160: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4 -50%

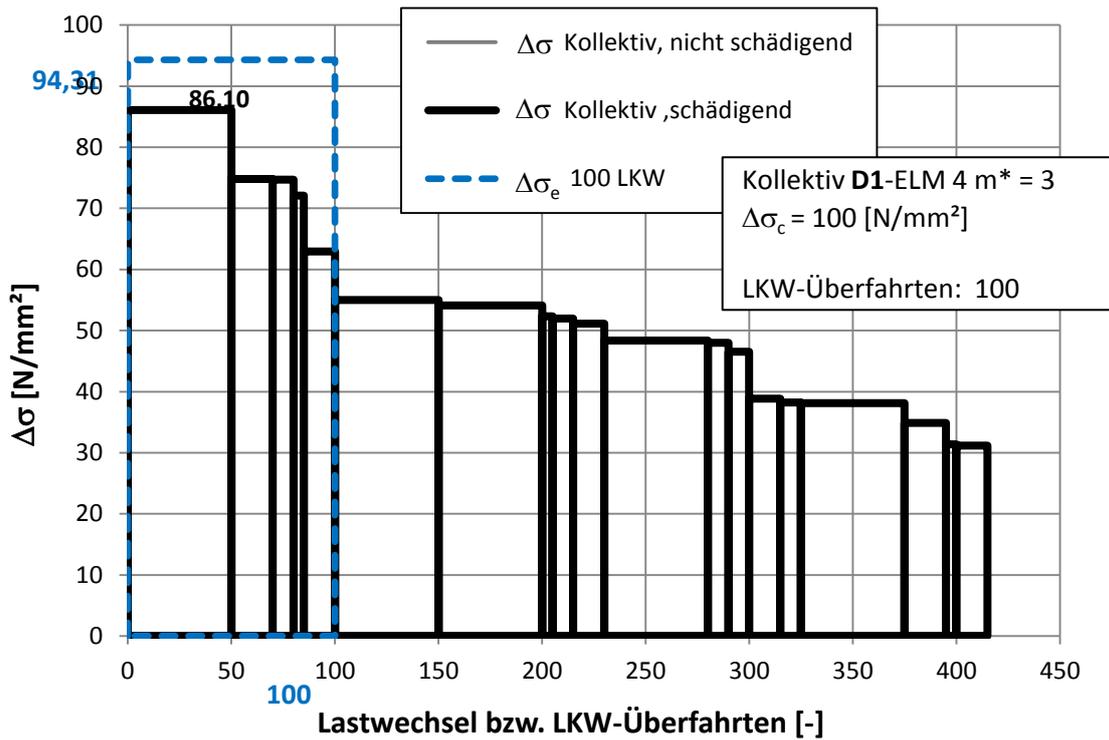


Abbildung 161: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4 m* = 3

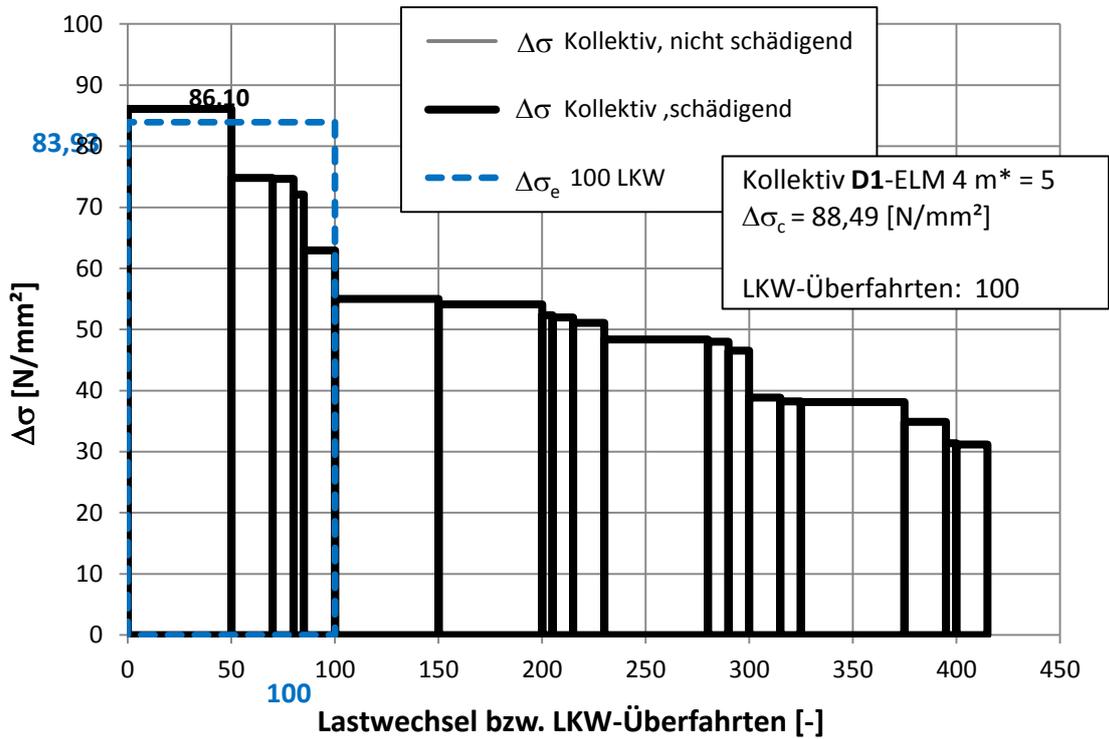


Abbildung 162: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4 m* = 5

B.4.5.2 Detail D1 - Lastkollektive aus ELM 4_mod

In den Abbildungen 163 bis 169 folgt die Darstellung der Lastkollektive für die nach Abbildung 25 untersuchten 5 Lastniveaus, sowie der 2 Grenzfälle $m^* = 3$ und $m^* = 5$ (siehe Abschnitt 4).

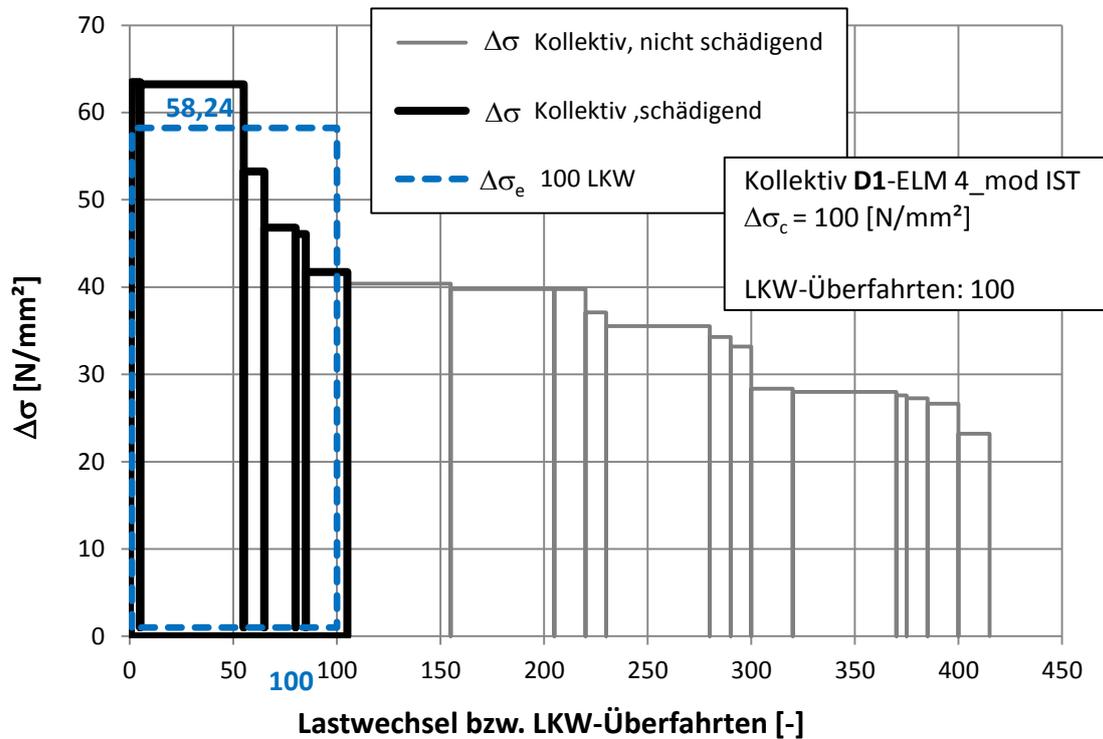


Abbildung 163: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod IST

Im Vergleich zum Lastkollektiv aus Ermüdungslastmodell 4 kommt es beim Ermüdungslastmodell 4_mod aufgrund der Nicht-Linearität der Ermüdungsfestigkeitskurve und der geringeren Belastung durch die Fahrzeuge dieses Lastmodells zu einem nicht schädigenden Einfluss beim Großteil der Kollektivteile (siehe Abbildung 163). Bei einer Verminderung der Kollektivteile um 50% gibt es keinen schädigenden Anteil mehr (siehe Abbildung 167).

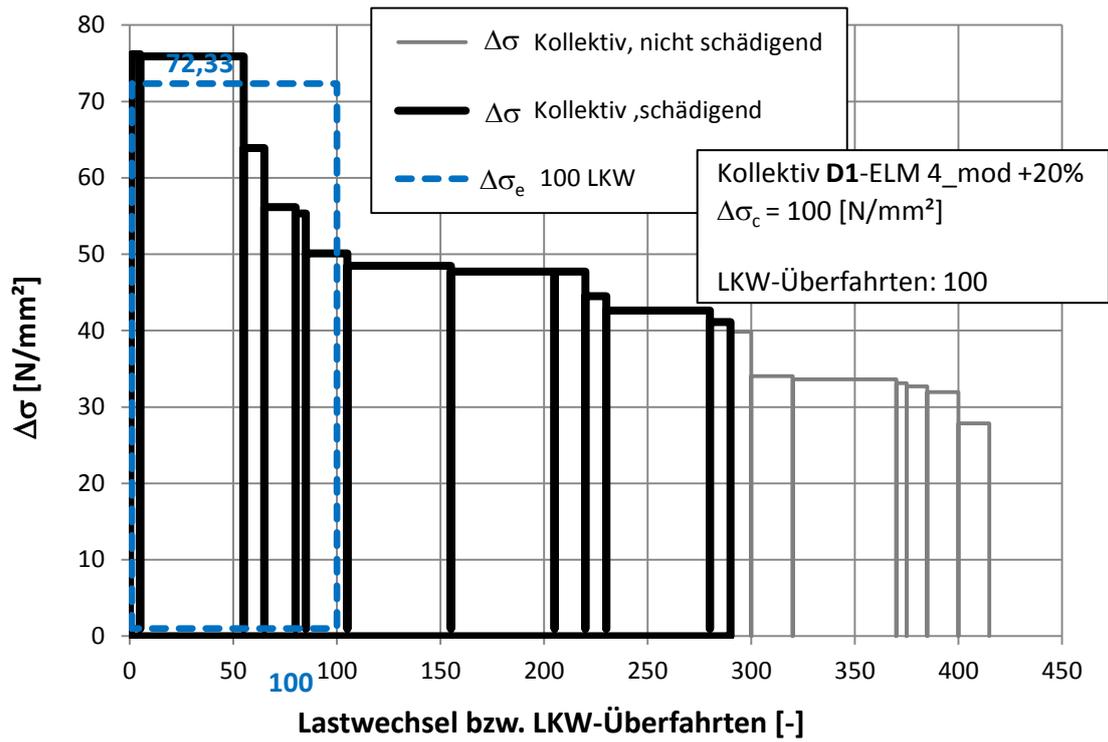


Abbildung 164: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod +20%

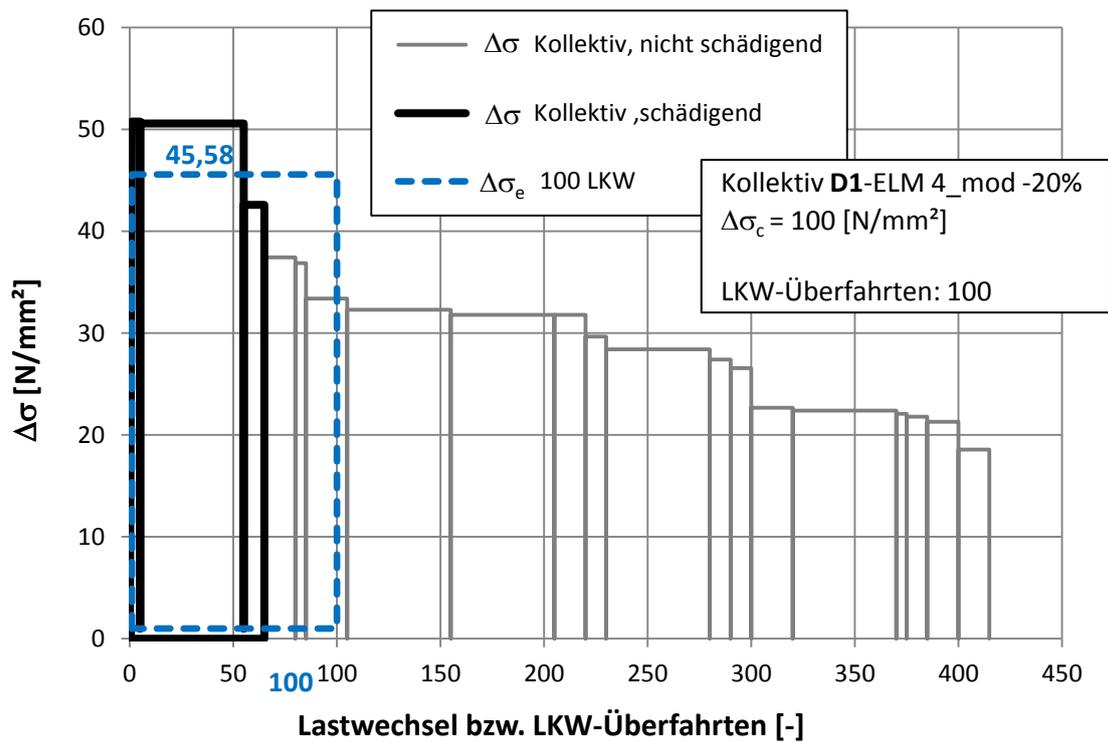


Abbildung 165: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod -20%

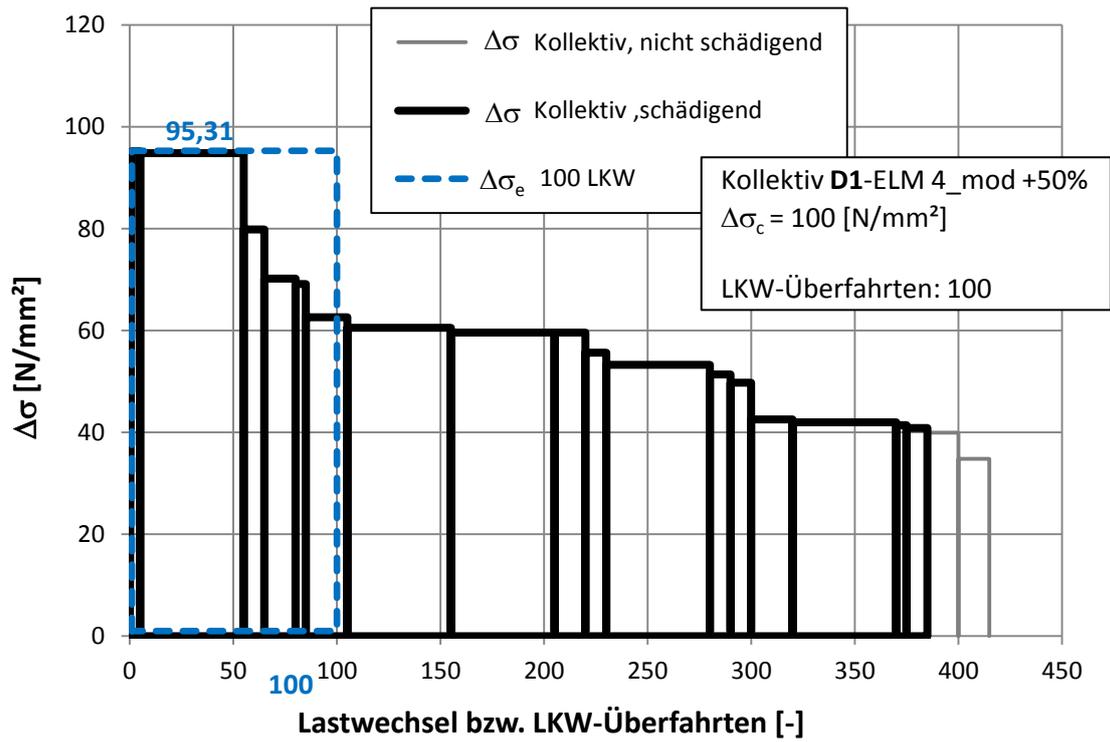


Abbildung 166: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod +50%

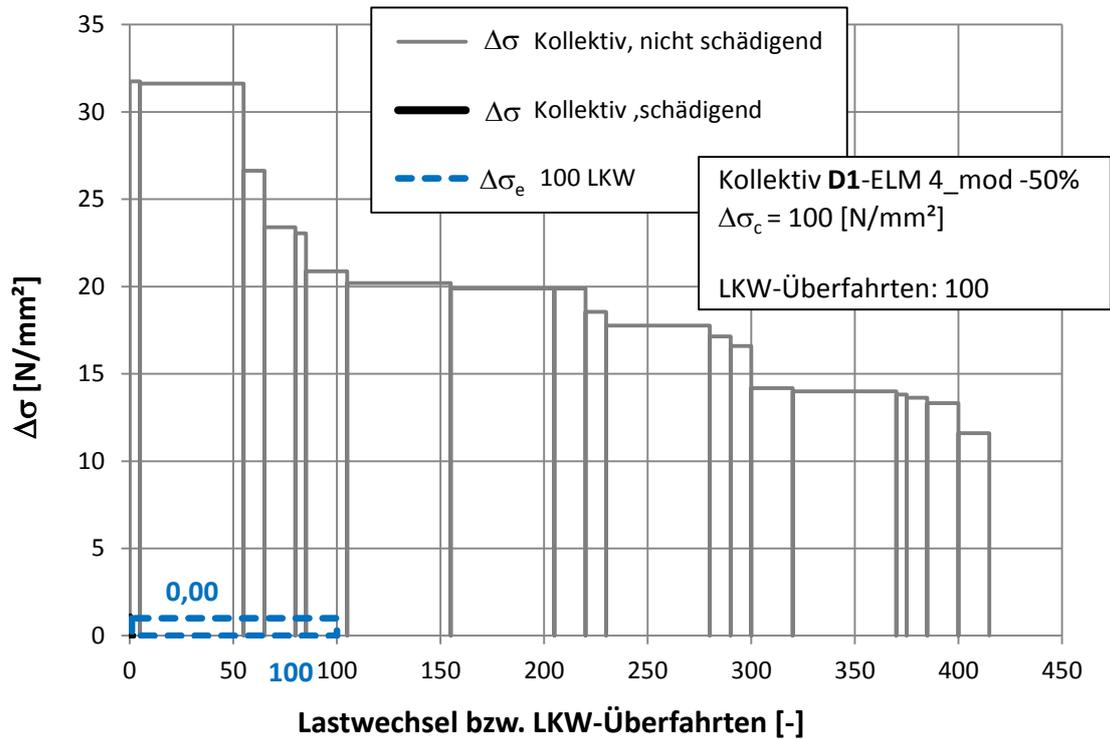


Abbildung 167: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod -50%

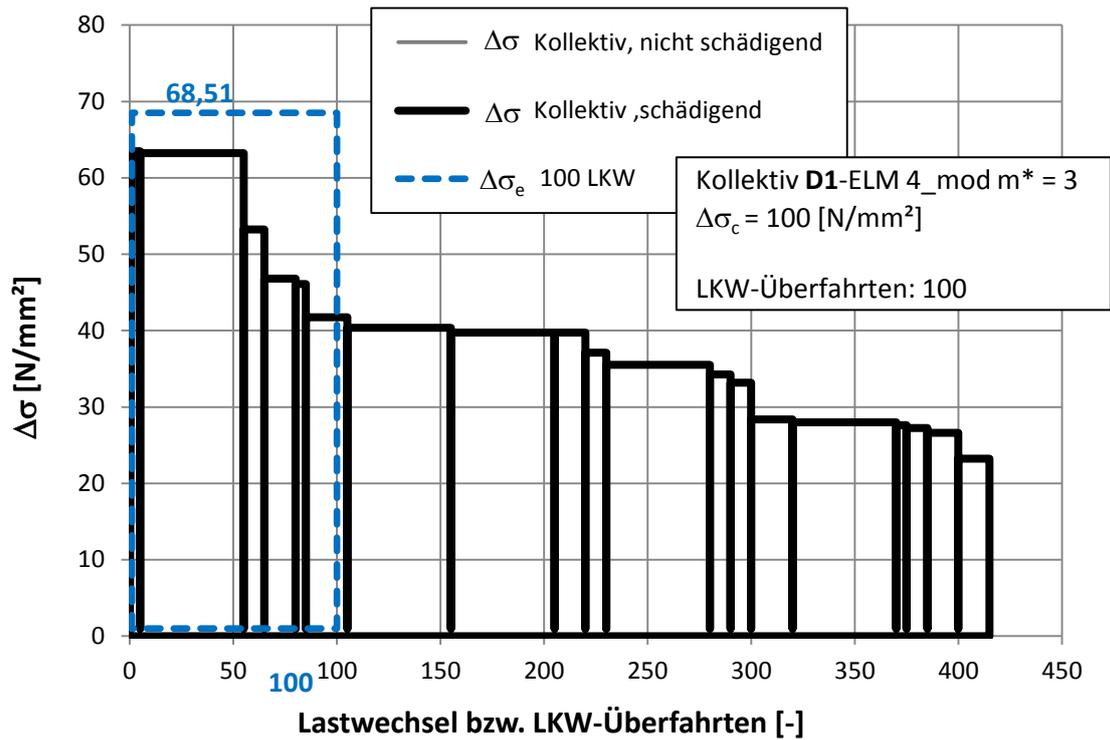


Abbildung 168: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod $m^* = 3$

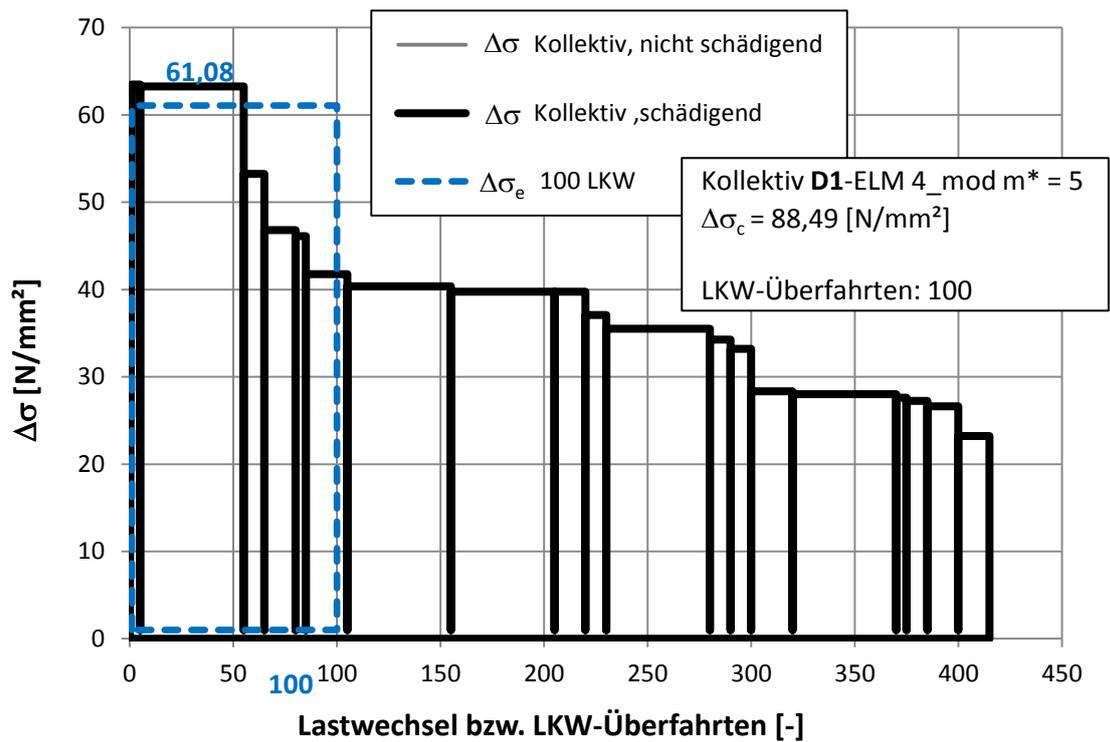


Abbildung 169: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod $m^* = 5$

B.4.5.3 Detail D2 - Lastkollektive aus ELM 4

In den Abbildungen 170 bis 176 folgt die Darstellung der Lastkollektive für die nach Abbildung 25 untersuchten 5 Lastniveaus, sowie der 2 Grenzfälle $m^* = 3$ und $m^* = 5$ (siehe Abschnitt 4).

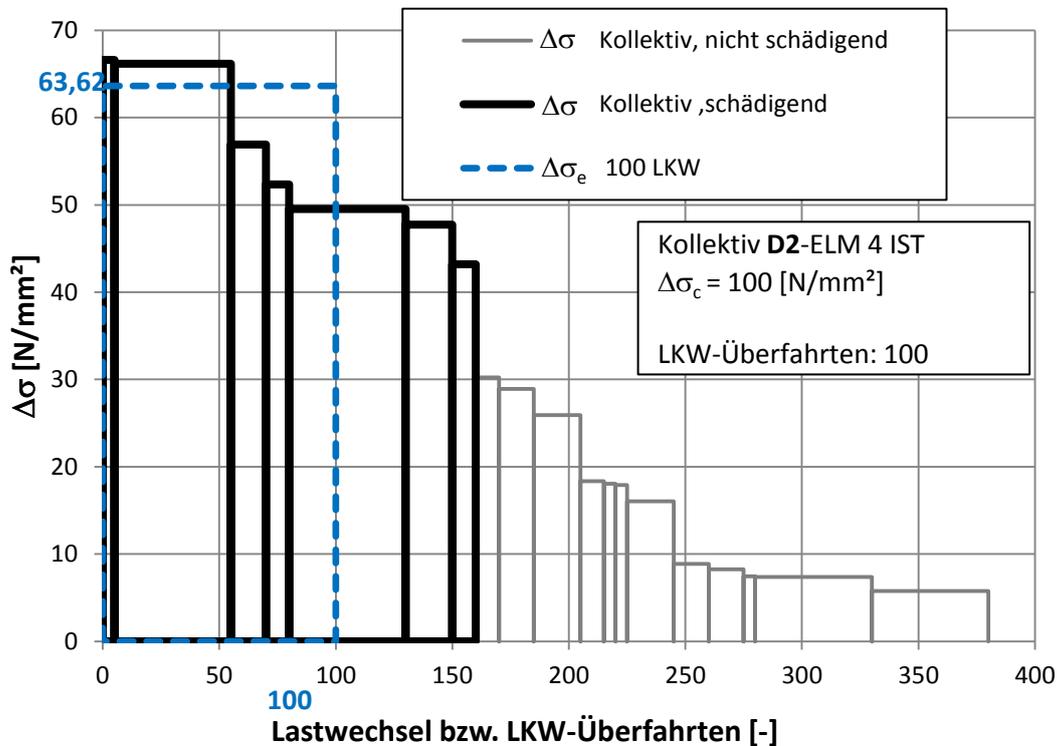


Abbildung 170: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4 IST

Bei den Lastkollektiven in Abbildung 170 von Detail D2 fällt zunächst ein Block aus den großen schädigenden Kollektivteilen und ein schnell abfallender nicht schädigender Bereich kleinerer Kollektivteile auf, wobei durch Verminderung des Kollektivs um 50% keine schädigenden Anteile mehr vorhanden sind (siehe Abbildung 174). Bei einer Erhöhung um 20% der Kollektivteile bleibt der Anteil an schädigenden Kollektivteilen gleich (siehe Abbildung 171). Selbst bei einer Erhöhung um 50% kommen nur zwei kleinere Kollektivteile zu den schädigenden dazu (siehe Abbildung 173).

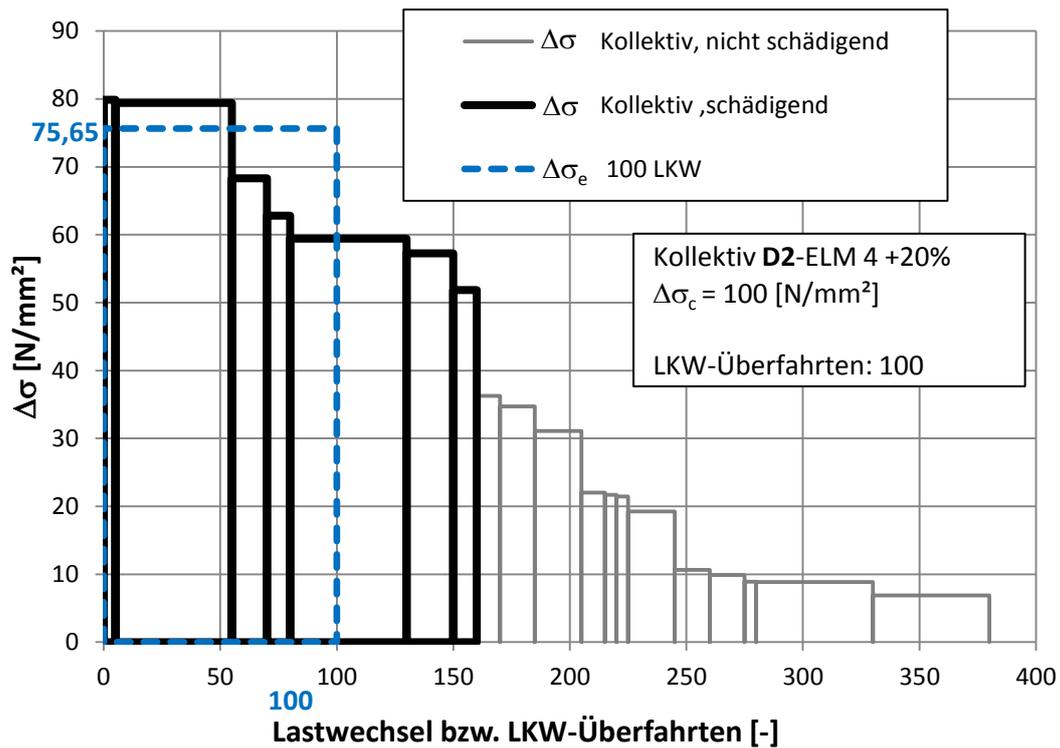


Abbildung 171: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4 +20%

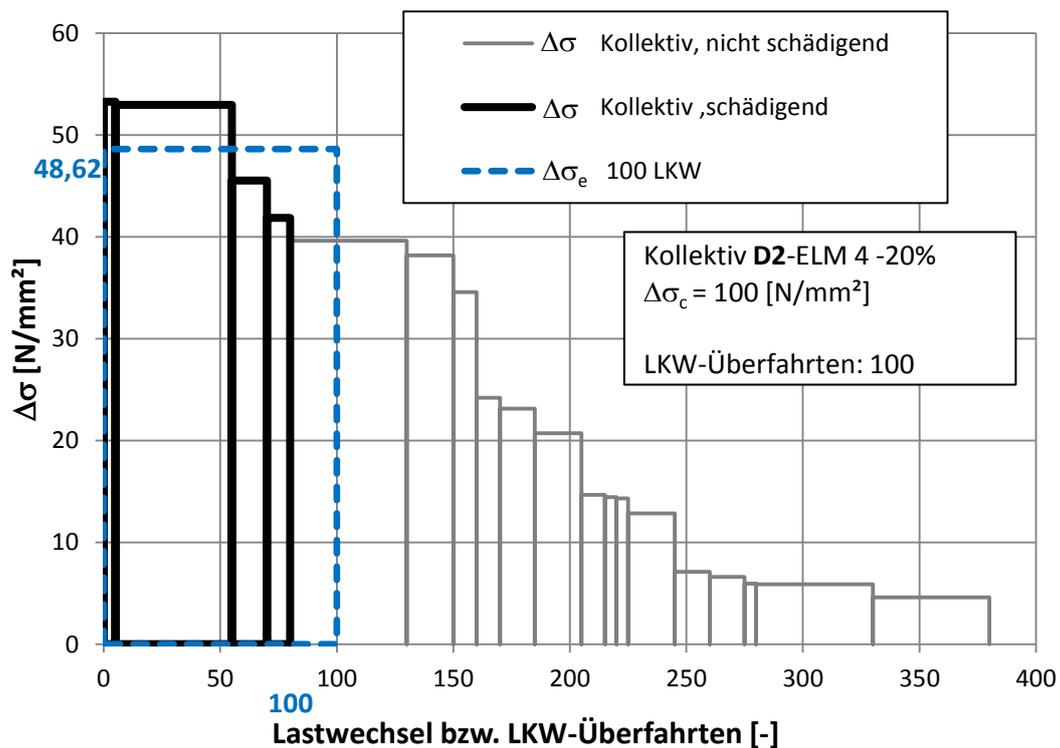


Abbildung 172: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4 -20%

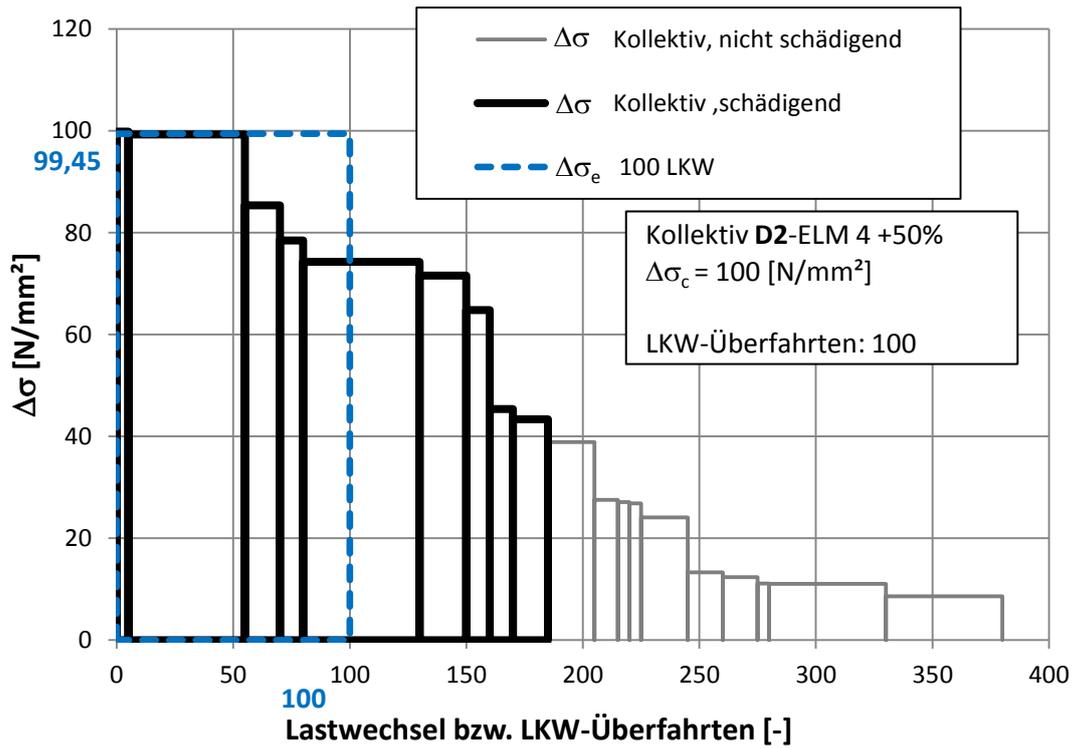


Abbildung 173: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4 +50%

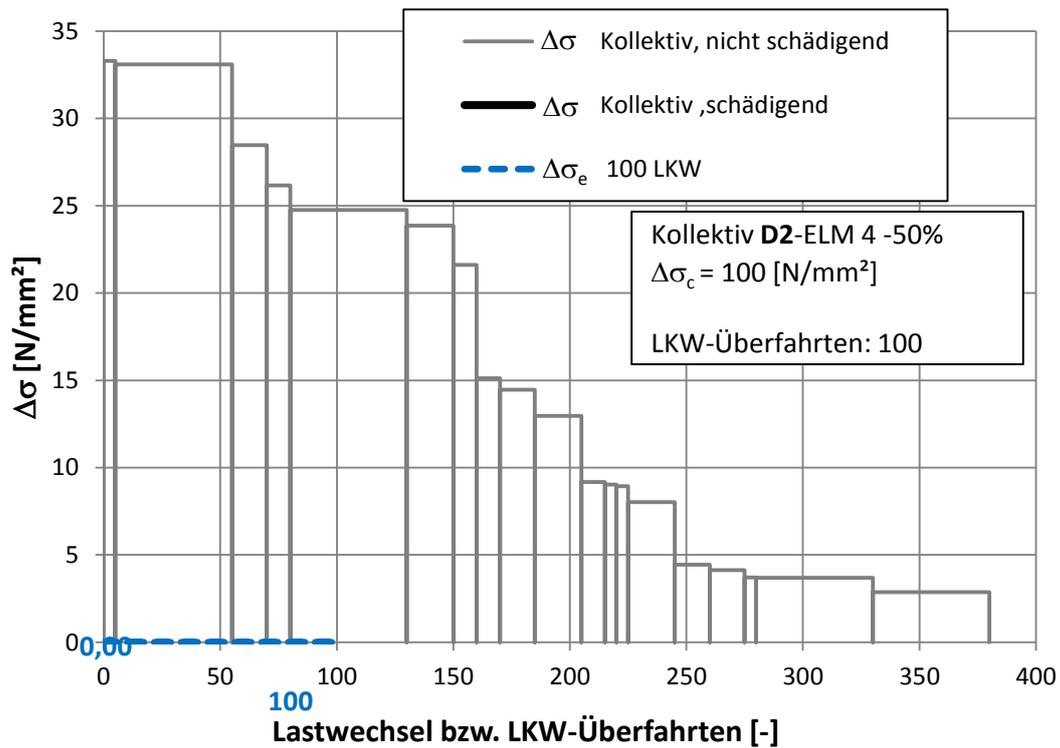


Abbildung 174: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4 -50%

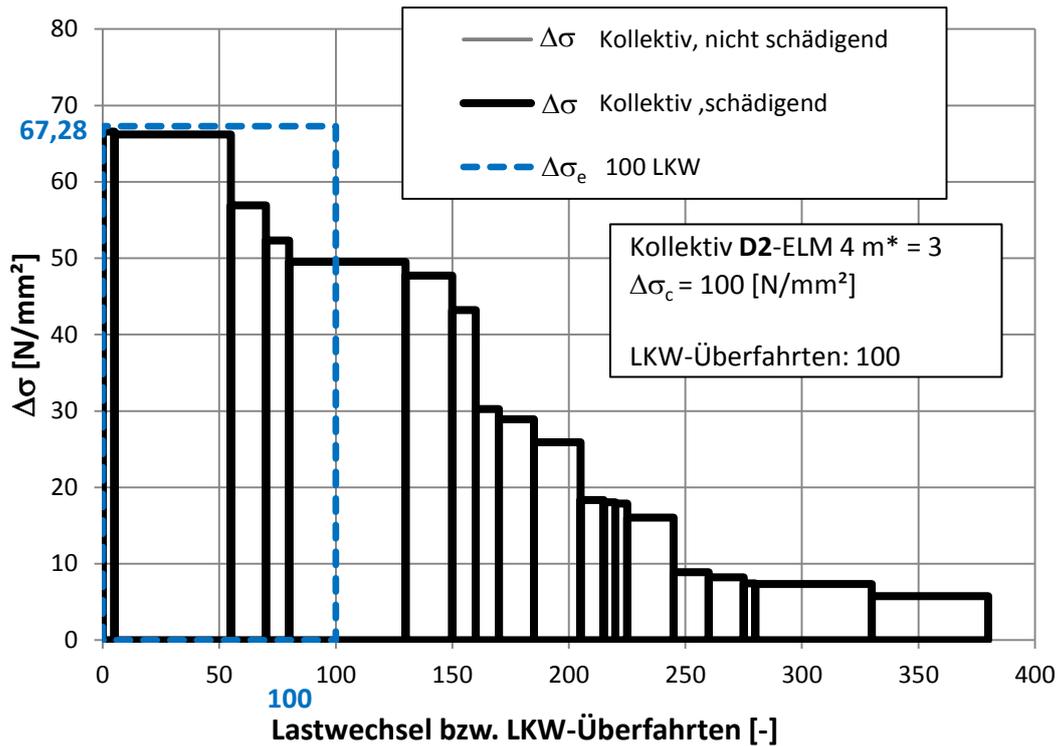


Abbildung 175: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4 m* = 3

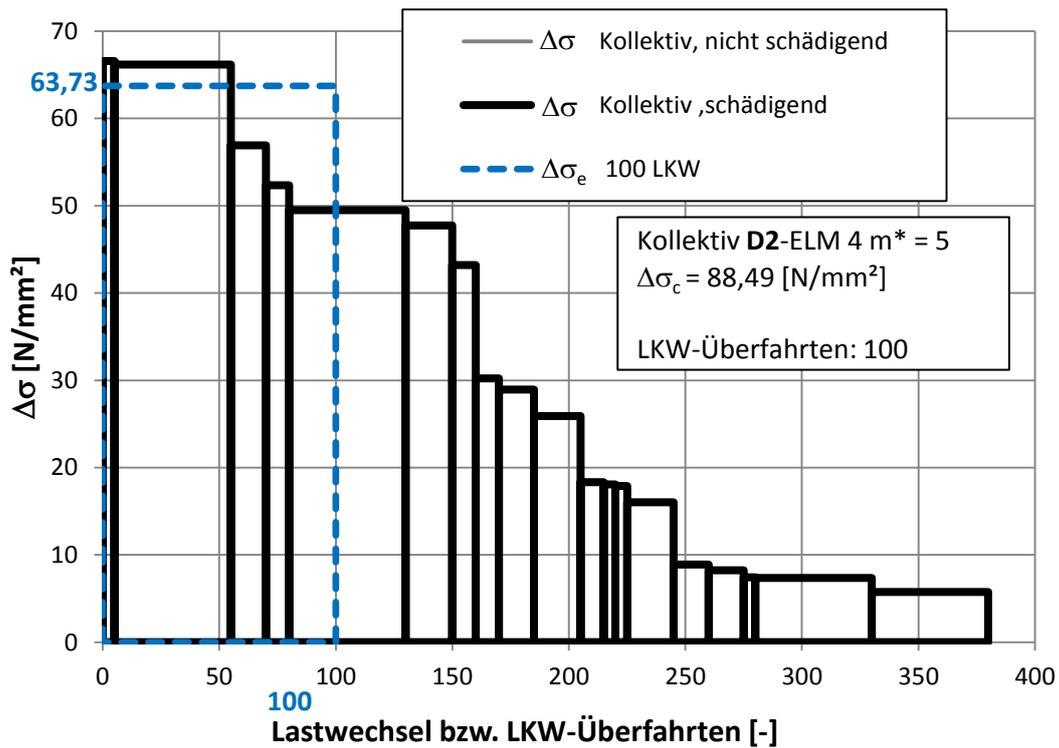


Abbildung 176: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4 m* = 5

B.4.5.4 Detail D2 - Lastkollektive aus ELM 4_mod

In den Abbildungen 177 bis 183 folgt die Darstellung der Lastkollektive für die nach Abbildung 25 untersuchten 5 Lastniveaus, sowie der 2 Grenzfälle $m^* = 3$ und $m^* = 5$ (siehe Abschnitt 4).

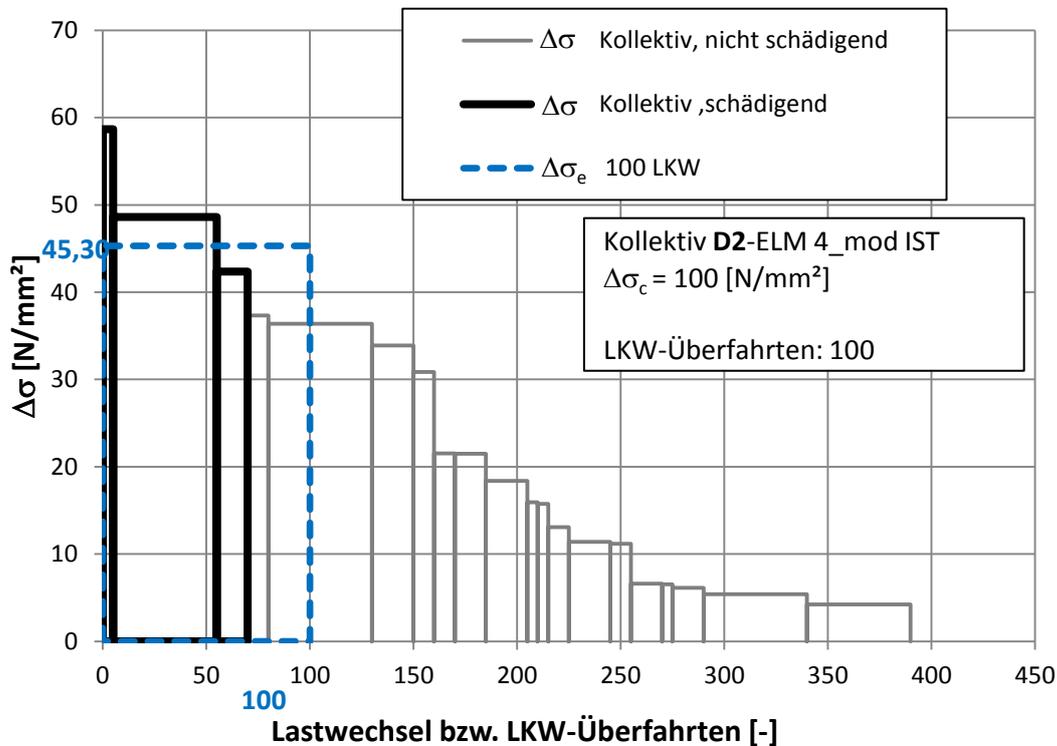


Abbildung 177: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod IST

Bei den Lastkollektiven in Abbildung 177 für Detailpunkt D2 aus dem modifizierten Ermüdungslastmodell 4_mod kommt es aufgrund der geringeren Achslasten zu noch kleineren Spannungsschwingbreiten und dadurch zu noch weniger schädigenden Lastwechseln. Dadurch ergibt sich bei einer Verminderung der Kollektivteile um 50% überhaupt keine schädigende Wirkung mehr (siehe Abbildung 181). Bereits bei einer Verminderung um 20% ist nur mehr ein schädigender Anteil vorhanden (siehe Abbildung 179).

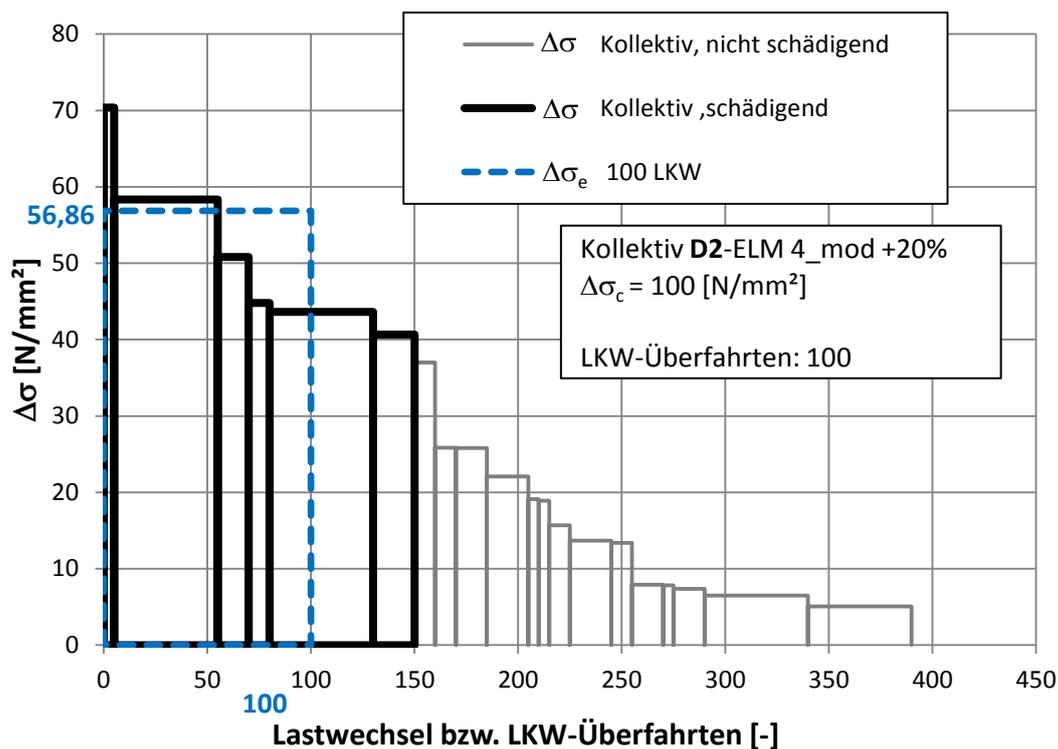


Abbildung 178: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod +20%

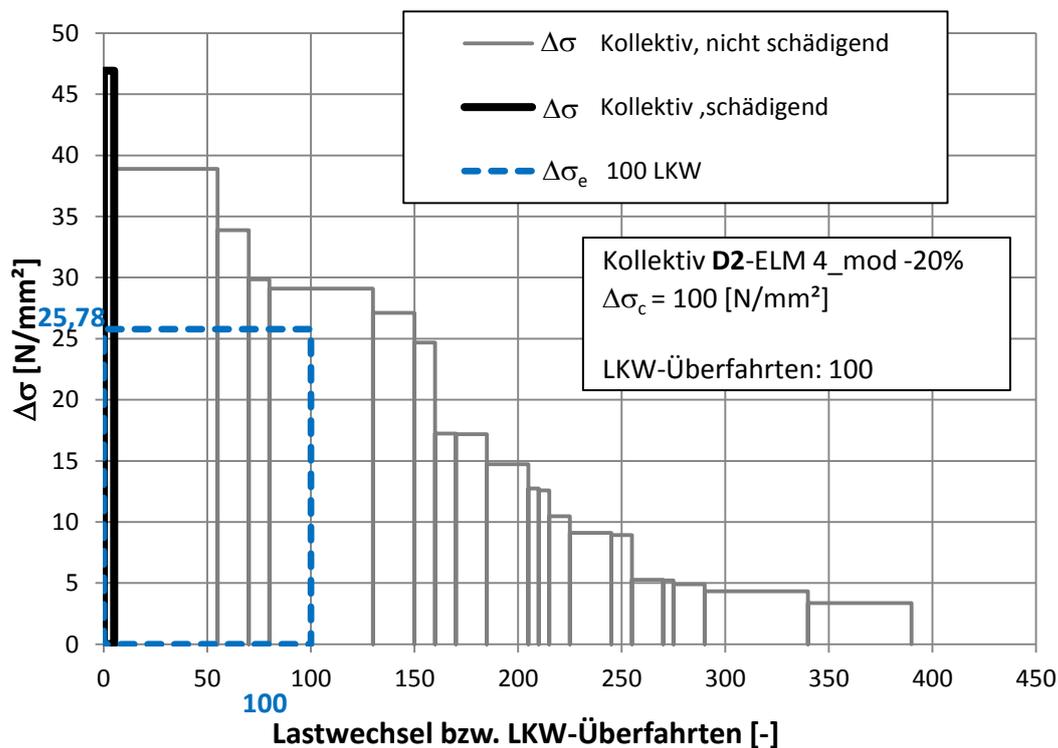


Abbildung 179: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod -20%

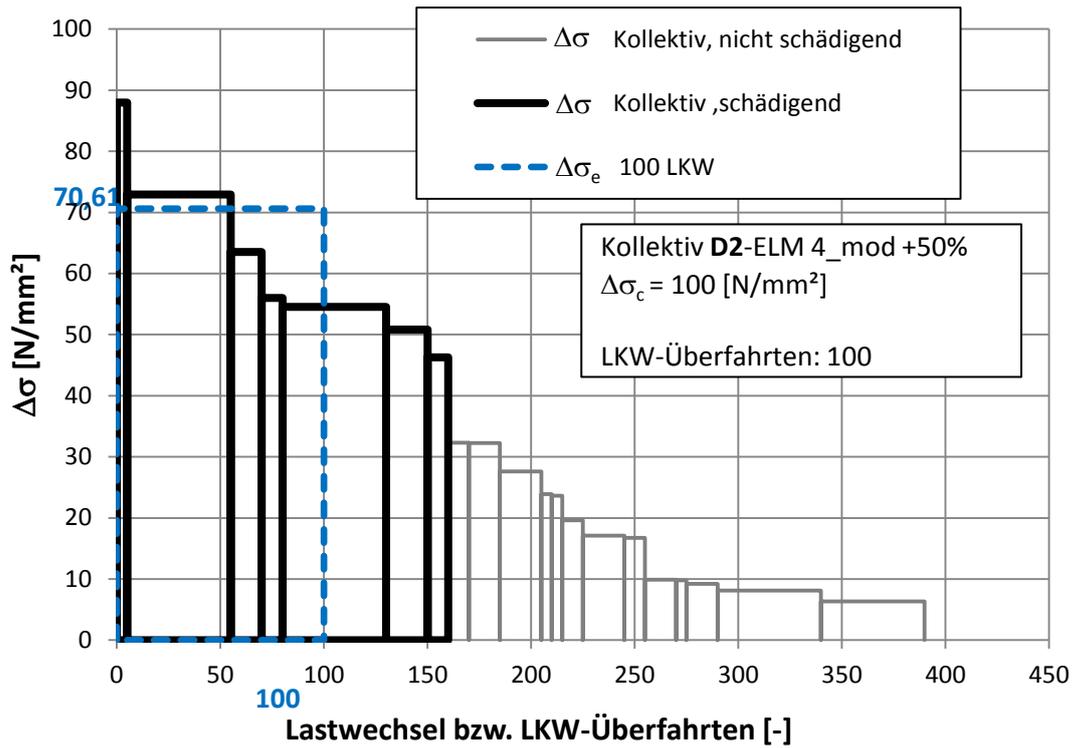


Abbildung 180: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod +50%

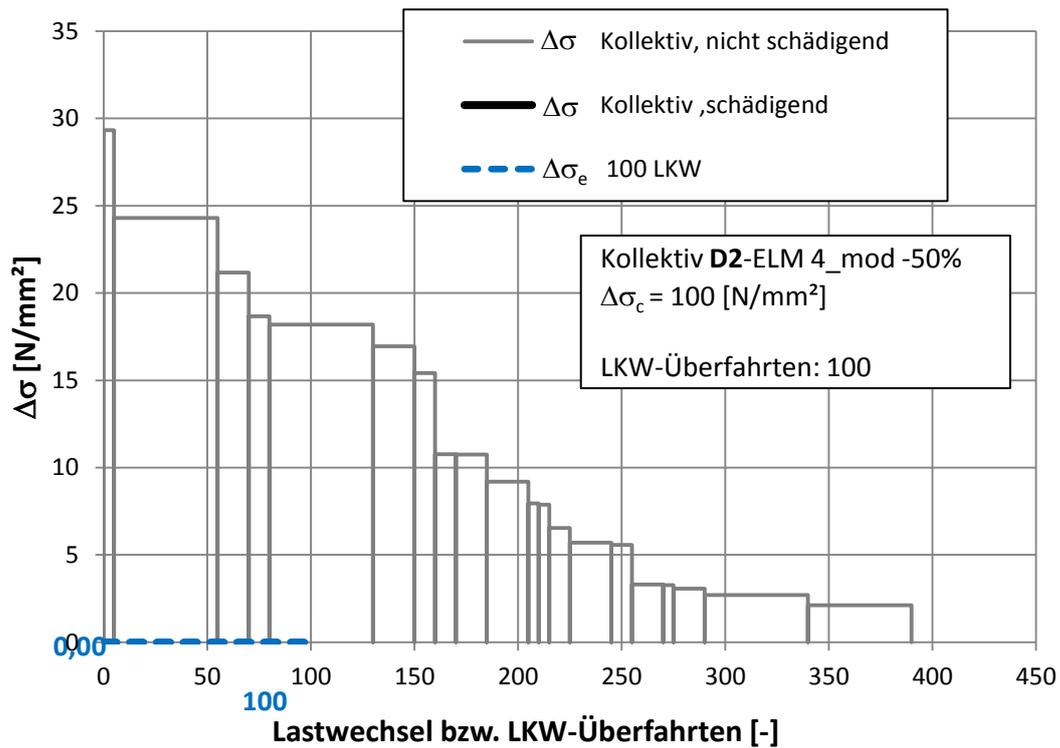


Abbildung 181: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod -50%

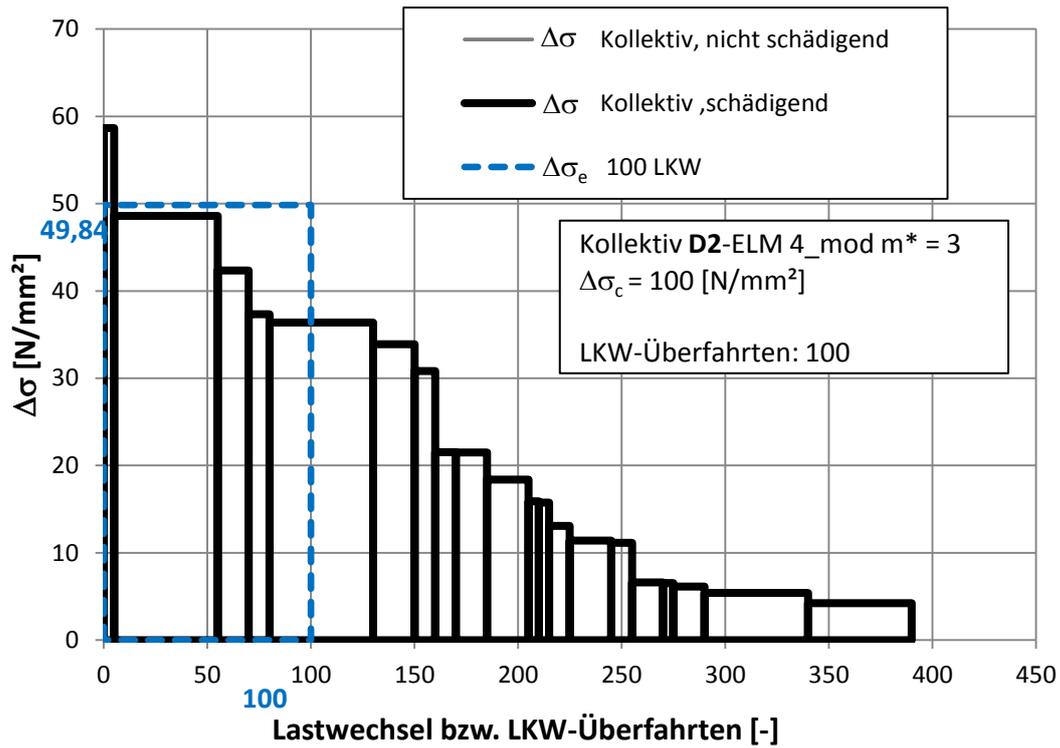


Abbildung 182: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod $m^* = 3$

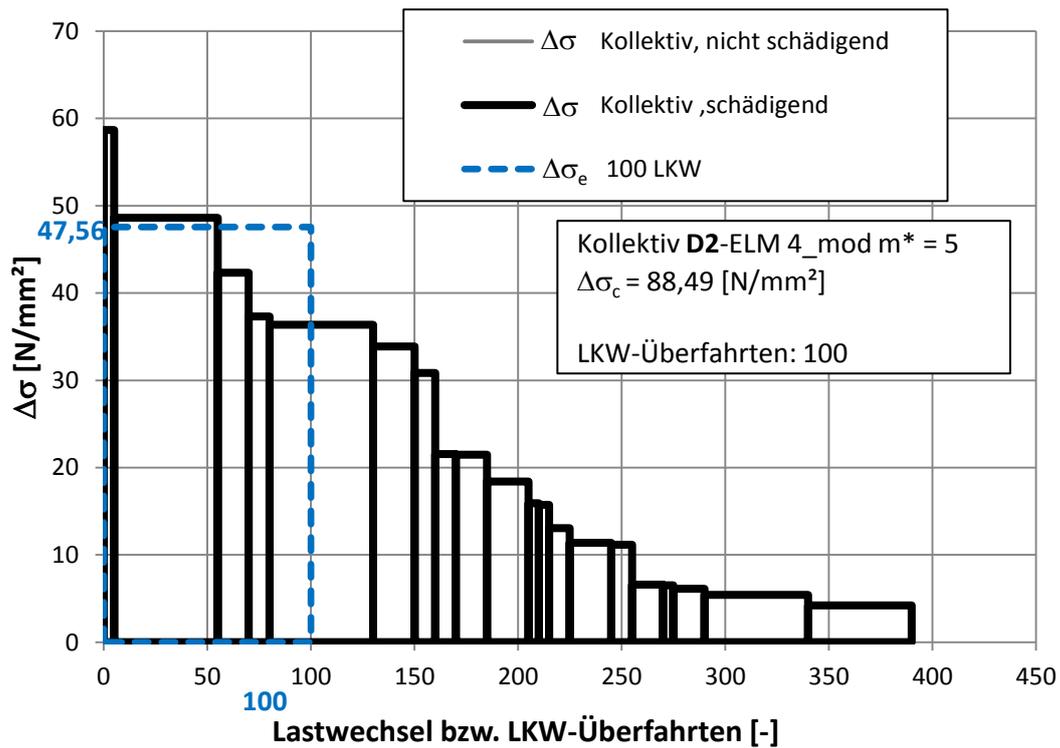


Abbildung 183: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod $m^* = 5$

B.5 Beiwerte λ_1

Mit den ermittelten Lastkollektiven wurden nach Kapitel 4 die unterschiedlichen Beiwerte λ_1 für die Ermüdungslastmodelle ELM 4 und ELM 4_mod berechnet. Die Ergebnisse sind im Folgenden in den Abbildungen 184 bis 187 sowie in den Tabellen 57 bis 60 dargestellt. Der Lastfaktor $f_{Last} = \frac{\Delta\sigma_{ELM3}}{\Delta\sigma_c}$ gibt dabei das jeweilige Verhältnis der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{ELM3}$ zum Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c$ an.

B.5.1 Detail D1 – ermittelte Beiwerte λ_1

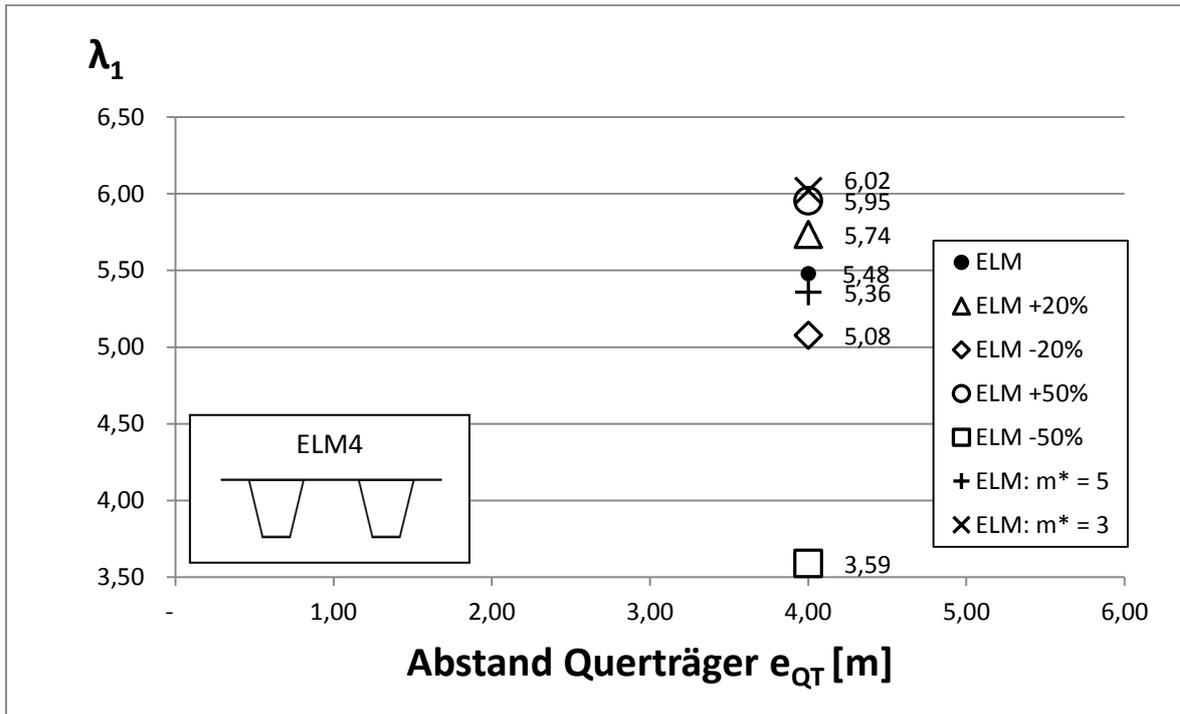


Abbildung 184: Detail D1_Beiwerte λ_1 – orthotrope Platte mit geschlossenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM4

ELM 4 - $e_{QT} = 4 \text{ [m]}$		
Bezeichnung	Lastfaktor f_{Last}	λ_1
ELM	0,54	5,48
ELM +20%	0,65	5,74
ELM -20%	0,45	5,08
ELM +50%	0,81	5,95
ELM -50%	0,36	3,59
ELM: $m^* = 5$	0,61	5,36
ELM: $m^* = 3$	0,54	6,02

Tabelle 57: Detail D1_Beiwerte λ_1 – orthotrope Platte mit geschlossenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM 4

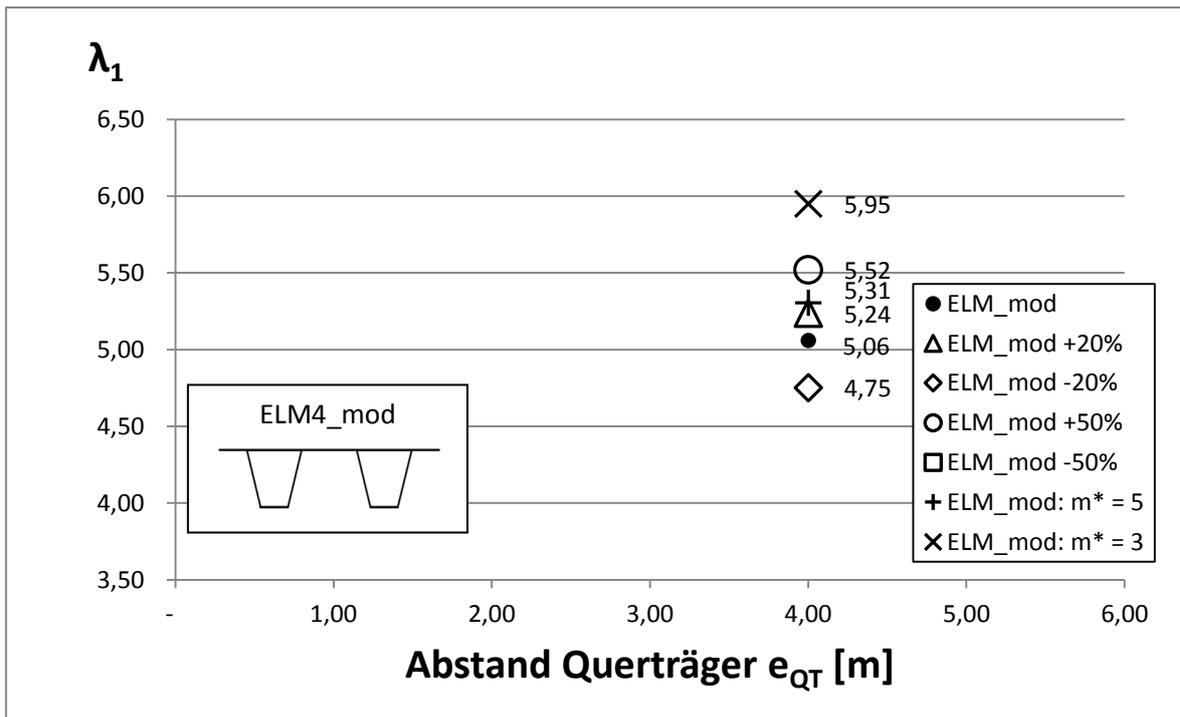
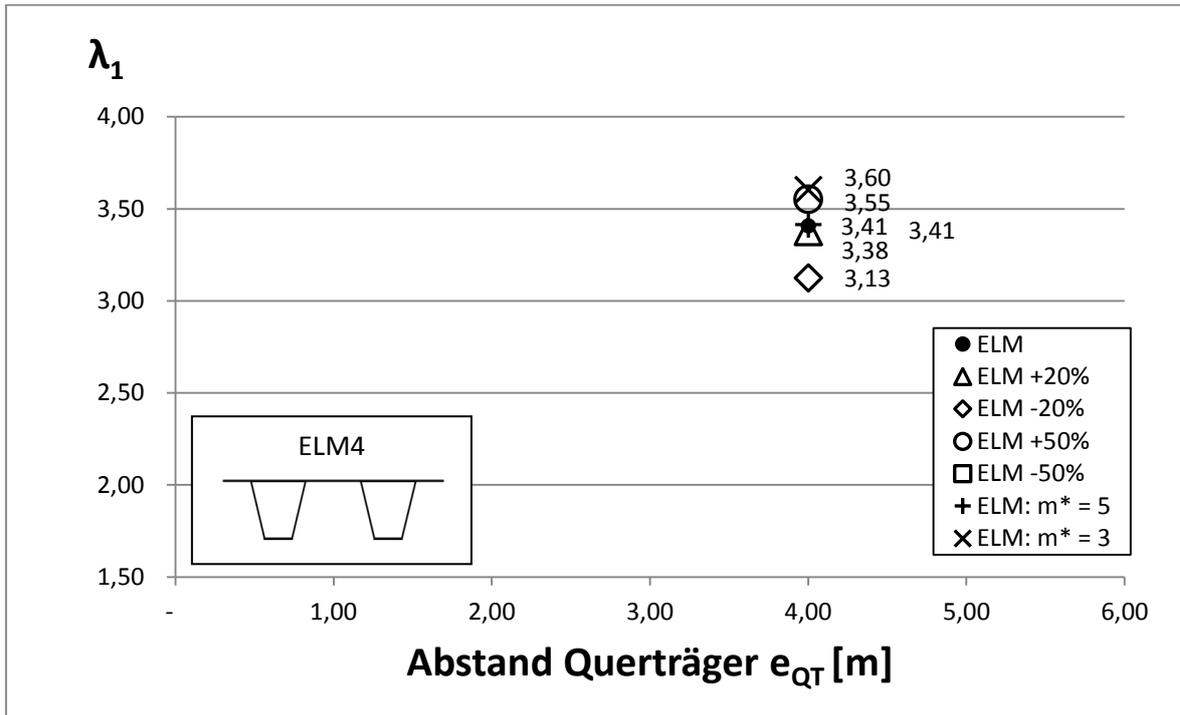


Abbildung 185: Detail D1_Beiwerte λ_1 – orthotrope Platte mit geschlossenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM4_mod

ELM 4_mod - $e_{QT} = 4 \text{ [m]}$		
Bezeichnung	Lastfaktor f_{Last}	λ_1
ELM_mod	0,54	5,06
ELM_mod +20%	0,65	5,24
ELM_mod -20%	0,45	4,75
ELM_mod +50%	0,81	5,52
ELM_mod -50%	0,36	-
ELM_mod: $m^* = 5$	0,61	5,31
ELM_mod: $m^* = 3$	0,54	5,95

Tabelle 58: Detail D1_Beiwerte λ_1 – orthotrope Platte mit geschlossenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM 4_mod

Für Detail D1 ergeben sich mit dem Ermüdungslastmodell 4 und 4_mod jeweils für den gleichen Lastfaktor geringfügig unterschiedliche Beiwerte λ_1 , da sich das verwendete Ermüdungslastmodell ändert und das Spannungsschwingspiel $\Delta\sigma_{ELM3}$ aber gleich bleibt (siehe Abbildungen 184 und 185). Da das Lastkollektiv aus Ermüdungslastmodell 4_mod wesentlich weniger schädigende Kollektivteile beinhaltet, kommt es für λ_1 zwischen den Lastmodellen ELM 4 und ELM 4_mod zu einer Abweichung von ca. 8%. Deshalb ist erkennbar, dass sobald sämtliche Kollektivteile schädigend wirken, wie bei ELM: $m^*=3$ bzw. ELM: $m^*=5$, die Werte fast ident sind (siehe Tabelle 58).

B.5.2 Detail D2 – ermittelte Beiwerte λ_1

 Abbildung 186: Detail D2_Beiwerte λ_1 – orthotrope Platte mit geschlossenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM4

ELM 4 - $e_{QT} = 4 \text{ [m]}$		
Bezeichnung	Lastfaktor f_{Last}	λ_1
ELM	0,65	3,41
ELM +20%	0,77	3,38
ELM -20%	0,54	3,13
ELM +50%	0,97	3,55
ELM -50%	0,43	-
ELM: $m^* = 5$	0,73	3,41
ELM: $m^* = 3$	0,65	3,60

 Tabelle 59: Detail D2_Beiwerte λ_1 – orthotrope Platte mit geschlossenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM 4

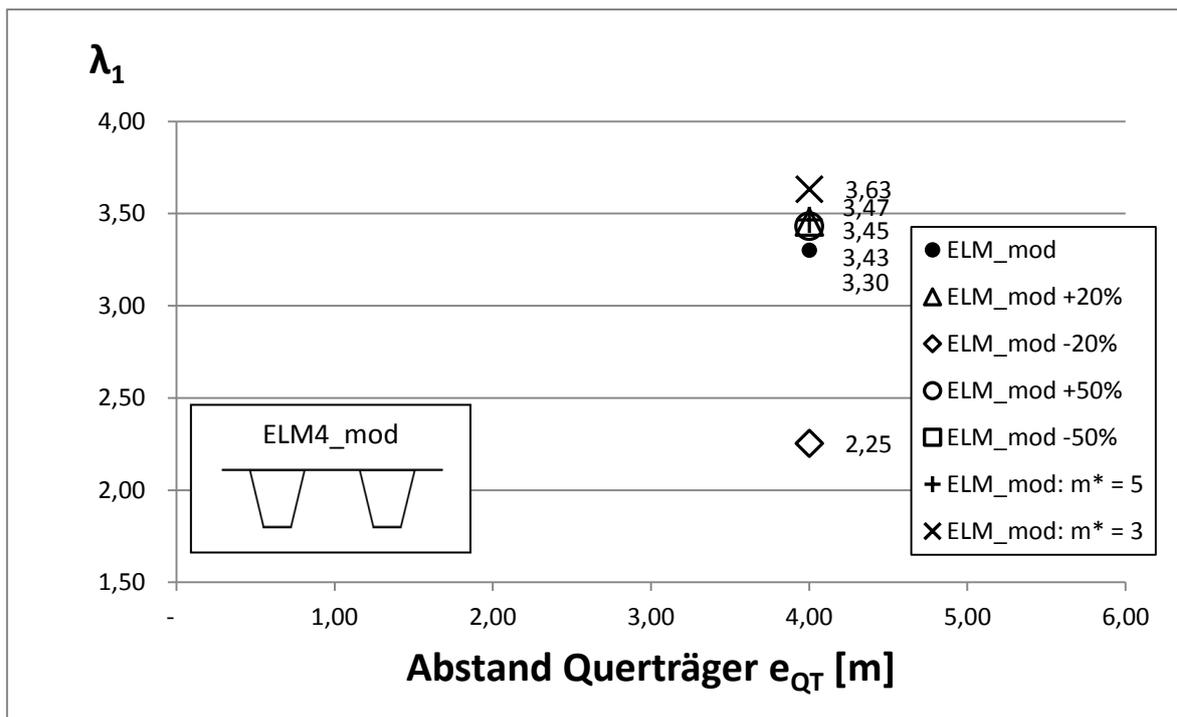


Abbildung 187: Detail D2_Beiwerte λ_1 – orthotrope Platte mit geschlossenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM4_mod

ELM 4_mod - $e_{QT} = 4 \text{ [m]}$		
Bezeichnung	Lastfaktor f_{Last}	λ_1
ELM_mod	0,65	3,30
ELM_mod +20%	0,77	3,45
ELM_mod -20%	0,54	2,25
ELM_mod +50%	0,97	3,43
ELM_mod -50%	0,43	-
ELM_mod: $m^* = 5$	0,73	3,47
ELM_mod: $m^* = 3$	0,65	3,63

Tabelle 60: Detail D2_Beiwerte λ_1 – orthotrope Platte mit geschlossenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM 4_mod

Für Detail D2 ergeben sich zwischen dem Ermüdungslastmodell 4 und 4_mod kaum Unterschiede für den Beiwert λ_1 , bis auf jenen aus den um 20% verminderten Kollektiven (siehe Abbildungen 186 und 187). Dies ist deshalb der Fall, da durch die Verminderung der Kollektivteile beim ohnehin niedrigeren Ermüdungslastmodell 4_mod viel mehr Teile nicht mehr schädigend wirken und dadurch die Ermüdungsbeanspruchung sinkt. Bei den übrigen liegt die Differenz aus den beiden Lastmodellen bei ca. 3% (siehe Tabellen 59 und 60).

C Modell C: orthotrope Platte mit Trapezlängsrippen ($e_{QT} = 2 \text{ m}$)

Bei den Berechnungen der Modelle A, B und C wurden die Ermüdungslastmodelle aus Anhang D verwendet.

Dieses Modell basiert auf den Geometriedaten zur "Stahlhochstraße über den neuen Hauptbahnhof in Ludwigshafen" aus [3], Tafel 29a. Wie bei Modell A bleibt die globale Tragwirkung unberücksichtigt. Aus diesem Grund wurde hier ebenfalls ein Brückendeck zwischen zwei Hauptträgern modelliert.

C.1 Geometrie des betrachteten Brückendecks

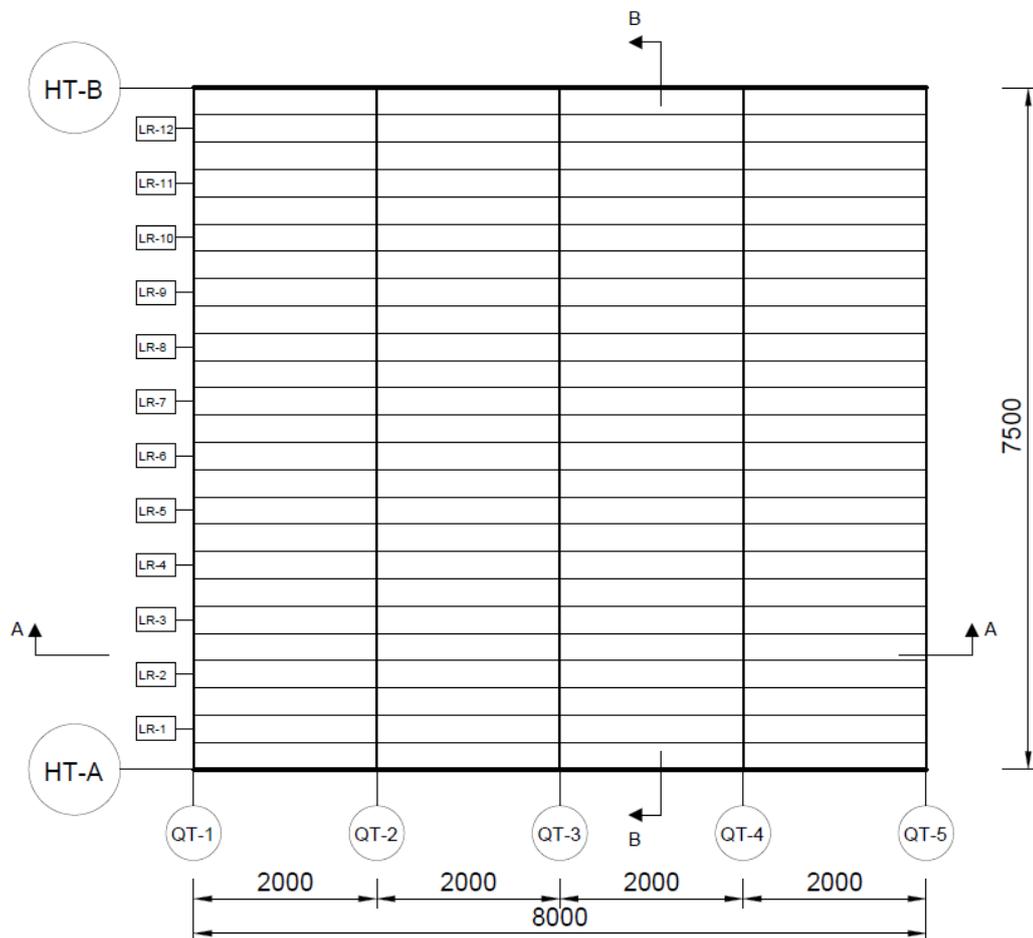


Abbildung 188: Modell C - Grundriss

Das betrachtete Brückendeck mit den Grenzabmessungen 8,0 m auf 7,50 m besteht im Grundriss aus 2 Hauptträgern, 5 Querträgern (in der Literatur auch Querrippen genannt) sowie den 12 geschlossenen Längsrippen (siehe Abbildung 188). Die Hauptträger und Längsrippen haben eine Länge von $l_{HT} = l_{LR} = 8,0 \text{ m}$ und die Querträger eine Länge von $l_{QT} = 7,50 \text{ m}$. Der Hauptträgerabstand beträgt $e_{HT} = 7,50 \text{ m}$, der Querträgerabstand beträgt $e_{QT} = 2 \text{ m}$ und der Längsrippenabstand $e_{LR} = 0,30 \text{ m}$.

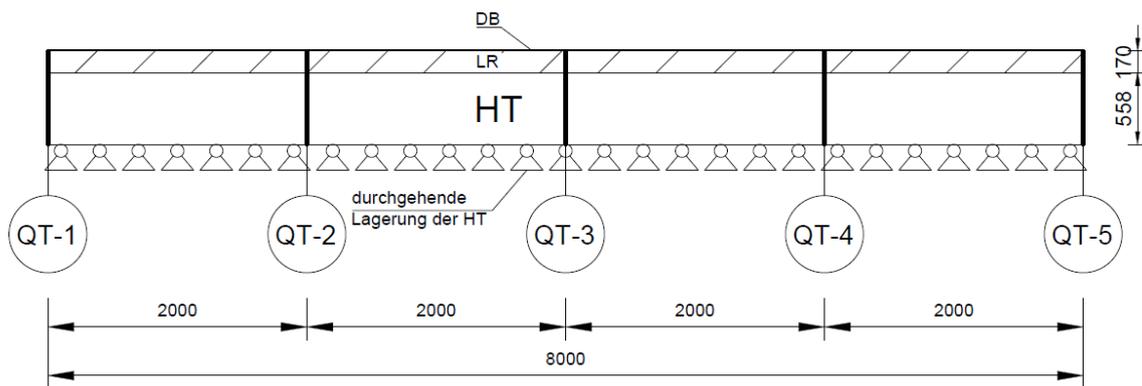


Abbildung 189: Modell C - Schnitt A-A

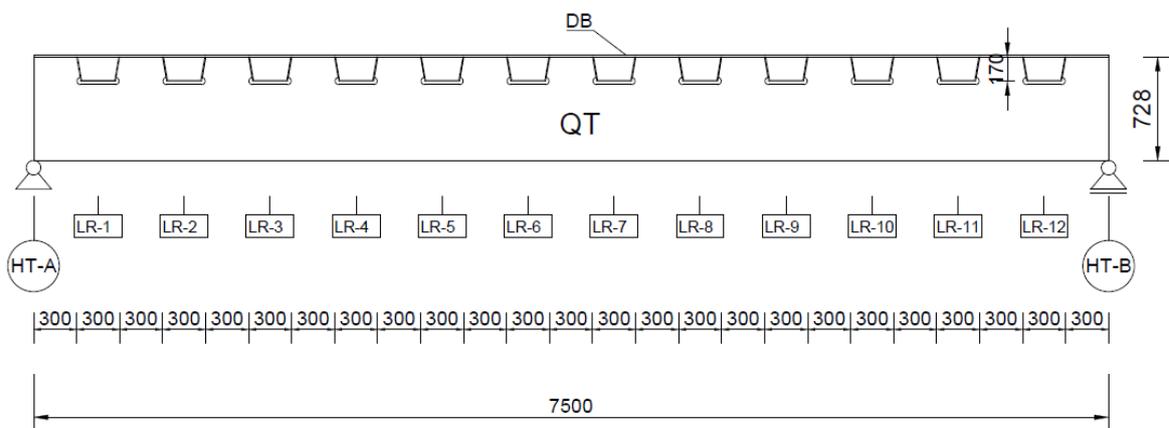


Abbildung 190: Modell C - Schnitt B-B

Die Höhe der Längsrippen beträgt $h_{LR} = 0,17 \text{ m}$ und die der Querträger $h_{QT} = 0,728 \text{ m}$. Die Hauptträgerstege wurden wie im Modell A bis zum Untergurt der Querträger modelliert und sind an ihrer Unterkante linienförmig gelagert. Die geschlossenen Längsrippen sind durchlaufend über die Länge des Brückendecks angeordnet und schließen an der äußeren Stegfläche an die Querträger an, welche an der Unterseite der Längsrippen eine Ausnehmung haben. (siehe Abbildungen 189 und 190)

Die Blechstärke der Längsrippen beträgt $t_{LR} = 6 \text{ mm}$. Die Deckblechdicke beträgt $t_{DB} = 12 \text{ mm}$ und führt zu einer Deckblechschlankheit von $e_{LR}/t_{DB} = 25$. Die Norm EN 1993-2 empfiehlt in Anhang C, Punkt C.1.2.2 eine Deckblechschlankheit von $e/t \leq 25$. Diese Anforderung wird hier eingehalten.

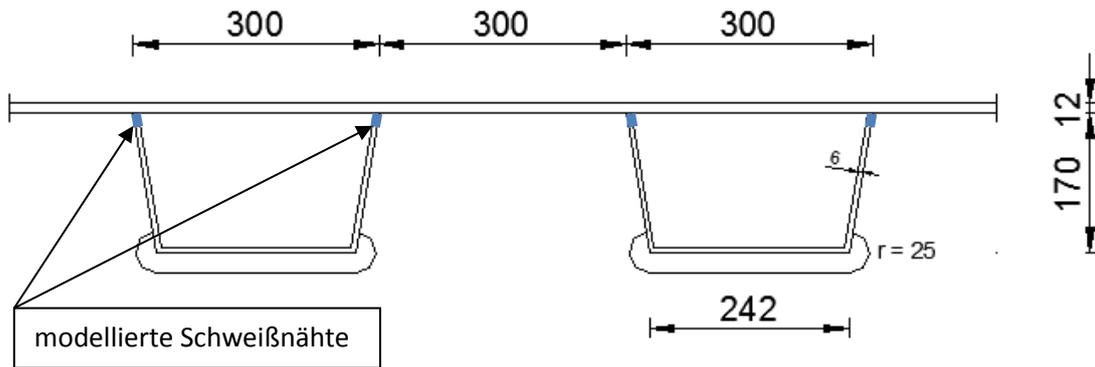


Abbildung 191: Modell C - Längsrippengeometrie

Die hier in Abbildung 191 dargestellten geschlossenen Längsrippen sind mit den Querträgern und mit dem Deckblech über eine Schweißnaht verbunden, wobei die Schweißnahtgeometrie des Anschlusses an das Deckblech wie in Abbildung 192 modelliert wurde. Der Anschluss an die Querträger wird über Kopplungsbedingungen berücksichtigt.

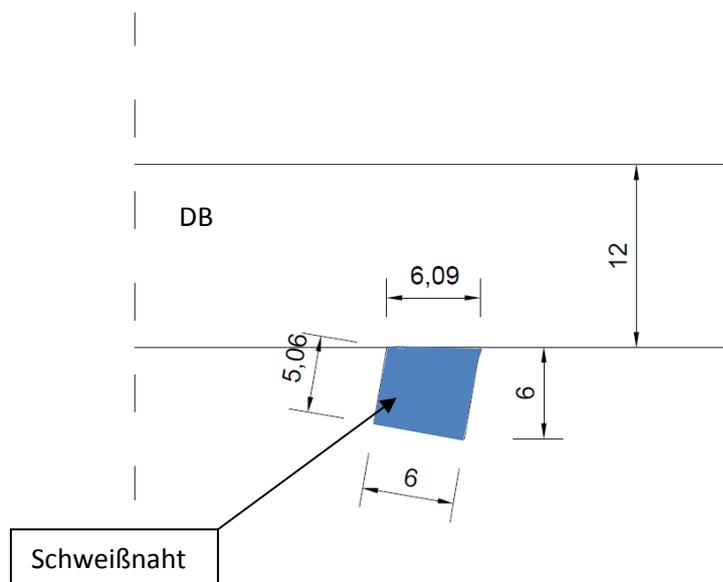


Abbildung 192: Modell C - Schweißnahtgeometrie

Die Schweißnahtgeometrie wurde wie für das Modell B vereinfacht gewählt (siehe Abbildung 192), da im weiteren Verlauf der Berechnung die Spannungen für einen Vergleich verwendet werden, wobei nur das Verhältnis der Spannungen zueinander maßgebend war und somit keine genaue Ermittlung über eine Extrapolation notwendig ist.

C.2 Finite-Elemente-Modellierung

Die Modellierung und Berechnung wurde mit dem Finite-Elemente-Programm Abaqus (Version 6.10) [8] durchgeführt. Das Modell wurde wie oben erwähnt aus [3] abgeleitet. Die getroffenen Annahmen und Programmeingaben werden in diesem Abschnitt zusammengefasst.

C.2.1 Material

Das gesamte Brückendeck besteht aus Stahl mit folgenden für die Modellierung relevanten Eigenschaften lt. EN 1993-1-1, Abschnitt 3.2.6 (1)

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

C.2.2 Bauteile (Parts)

Für dieses Modell des Brückendecks wurden die Bauteile als Volumen-, Schalen- und Stabelemente modelliert. Die Modellierungsart des einzelnen Bauteils kann nachfolgender Tabelle 61 entnommen werden.

Bauteile	Dicke	Element
Hauptträger	$t_{HT} = 12 \text{ mm}$	Schale
Querträger	$t_{QT} = 8 \text{ mm}$	Schale
Querträger Untergurt	160x8	Stab
Längsrippen	$t_{LR} = 6 \text{ mm}$	Schale
Schweißnähte LR an DB	siehe Geometrie	Volumen
Deckblech	$t_{DB} = 12 \text{ mm}$	Volumen

Tabelle 61: Modell C - Bauteile

Die Schalen-Elemente, Hauptträger, Querträger und Längsrippen sind hier in den Abbildungen 193 bis 198 nach der Modellierung in Abaqus dargestellt. Für die verwendeten Geometrien siehe Abschnitt C.1.



Abbildung 193: Modell C - Hauptträger (shell) $l = 8000 \text{ mm}$



Abbildung 194: Modell C - Querträger (shell) $l = 7500 \text{ mm}$

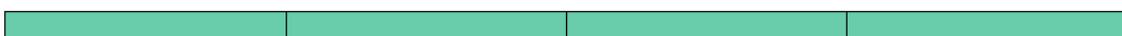


Abbildung 195: Modell C - Längsrippe (shell) $l = 8000 \text{ mm}$

Der Untergurt der Träger wurde als Stab-Element (Beam) mit der Länge $l = 7,5$ m und mit einem Rechteck als Querschnittsprofil mit den Abmessungen 160x8 modelliert (siehe Abbildung 196).

Abbildung 196: Modell C - Querträger Untergurt (beam) $l = 7500$ mm

Das Deckblech und die Schweißnähte wurden als komplexes Volumen-Element modelliert, um das lokale Tragverhalten der Platte gut abbilden zu können (siehe Abbildungen 197 und 198).

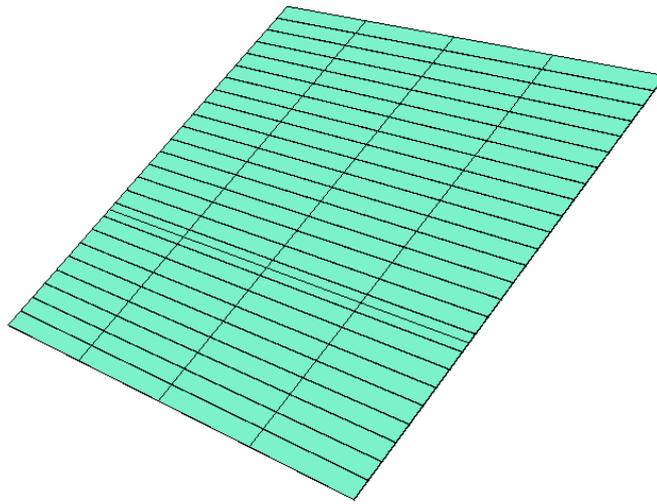


Abbildung 197: Modell C - Deckblech (solid) $l_x b = 8000 \times 7500$ mm

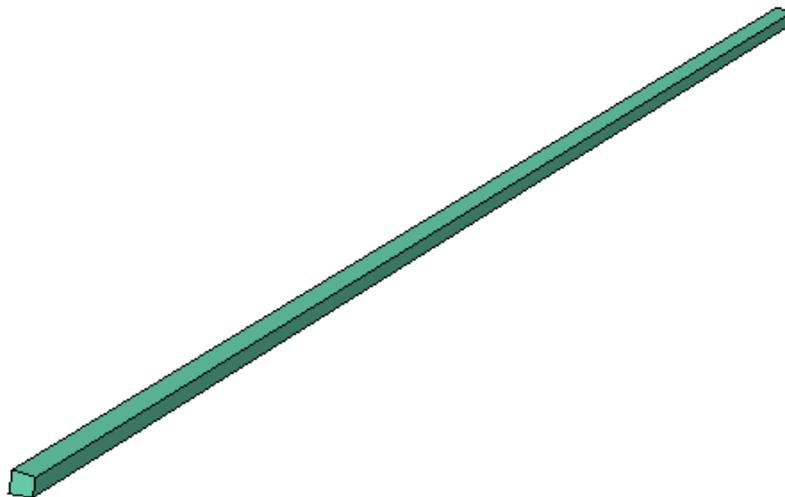


Abbildung 198: Modell C - Schweißnaht (solid) $l = 8000$ mm

Die Schweißnähte als Verbindung zwischen Deckblech und Längsrippe wurden über das gesamte Brückendeck modelliert. Für den Anschluss des Querträgers an das Deckblech wurden keine Schweißnähte modelliert, da an diesen keine Spannungen abgelesen werden. Diese wurden stattdessen durch Kopplungsbedingungen in Abaqus berücksichtigt (siehe Abschnitt C.2.4).

C.2.3 Netzgenerierung

Das Deckblech wurde in 2 Bereiche aufgeteilt. Bereich 1 (Deckblech außen) besteht aus einem größeren Netz (vorgegebene Elementgröße 100 mm), Bereich 2 (Deckblech innen) aus einem feineren (vorgegebene Elementgröße 20 mm). Die Netzgenerierung erfolgte in Abaqus mit der Einstellung "structured", um möglichst gleichmäßige Elemente zu erhalten. Die tatsächliche Elementgröße variiert aufgrund der automatischen Verteilung und der nachträglich gemachten Verfeinerungen zur Einhaltung einer optimalen Elementgeometrie. Das generierte Netz-Modell ist nachfolgend in Abbildung 199 mit den Elementgrößen je Bauteil dargestellt.

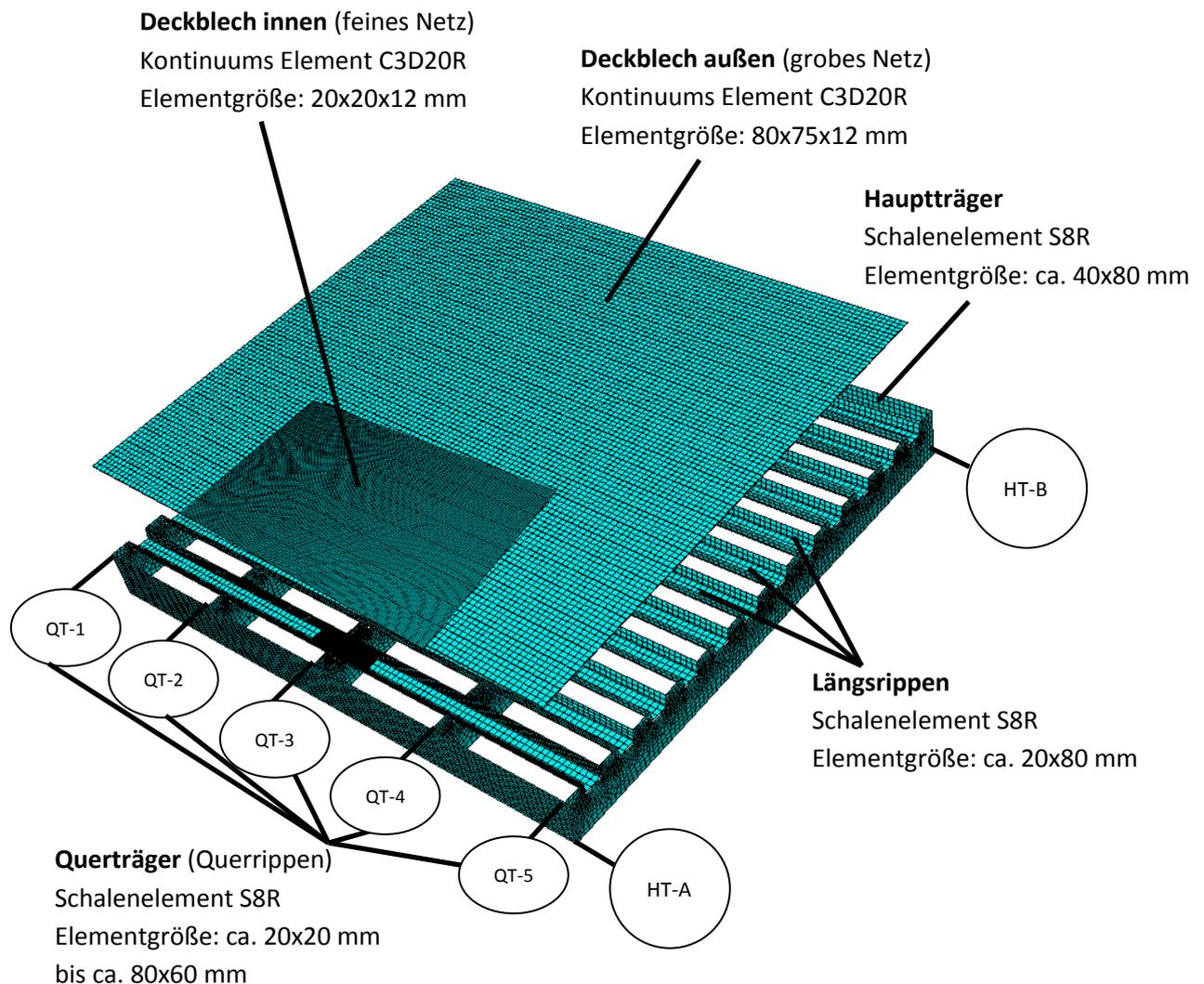


Abbildung 199: Modell C - Ansicht FEM-Modell Elementgrößen

Darüber hinaus wurde zusätzlich die Netzfeinheit der ersten Längsrippe (LR-1) im Bereich, in welchem die Spannungen abgelesen werden, mit einer Elementgröße von 5x20 mm generiert.

Abbildung 200 zeigt den Schnitt durch Querträger 3 sowie die zur automatischen FE-Netzgenerierung gemachten Netzverfeinerungen. (siehe auch Abschnitt B.2.3)

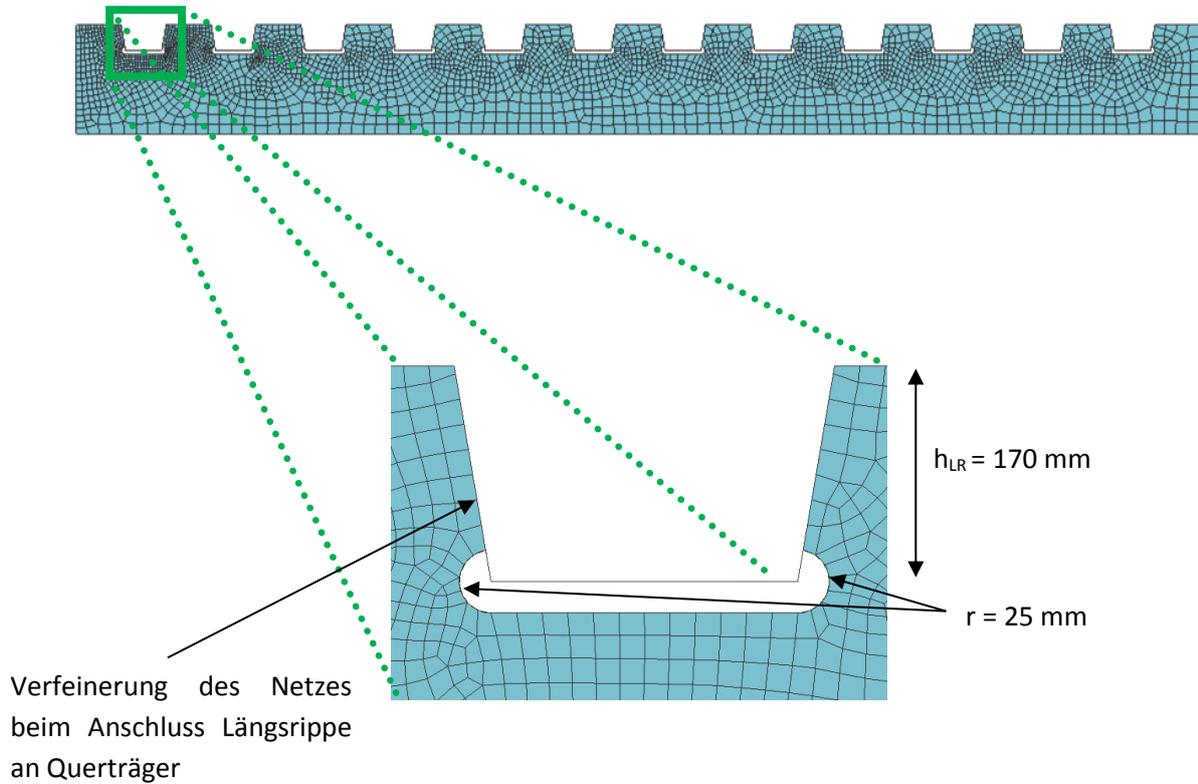


Abbildung 200: Modell C - Netzgenerierung, Schnitt durch Querträger 3

C.2.4 Kopplungen

Um ein zusammenhängendes Modell zu generieren, mit welchem die Berechnungen durchgeführt werden können, ist es in Abaqus notwendig, Bauteile miteinander über Kopplungsbedingungen zu verbinden, um Verschiebungen und Verdrehungen der Anschlussknoten übergeben zu können. Des Weiteren werden durch die Kopplung auch die nicht modellierten Schweißverbindungen berücksichtigt (siehe Tabelle 62).

Die Kopplung der Schalen-Elemente, Hauptträger, Querträger und Längsrippen, erfolgte in Abaqus mit dem Befehl "Merge", wodurch diese Einzelteile zu einem zusammenhängenden Teil verbunden wurden und die Bauteile dadurch starr miteinander verbunden sind. Ebenfalls wurden die Volumen-Elemente, Deckblech und Schweißnähte mit dem Befehl "Merge" zu einem Teil verbunden. Die beiden Deckblechteile wurden als "Tie" (starre Verbindung) verbunden. Weiters wurde nun das Deckblech (Solid-Element) mit den Rippen (Shell-Elemente) mit der Bedingung "Shell-to-solid coupling" verbunden. Zuletzt wurden noch die Untergurte mit den zugehörigen Querträgern als "Tie" verbunden. Eine Auflistung der miteinander gekoppelten Bauteile sowie die verwendete Methode ist in Tabelle 62 nochmals zu finden.

Teil 1	Teil 2	Kopplungsmethode
HT	QT, LR	Merge
Deckblech innen	Schweißnähte	Merge
Deckblech innen	Deckblech außen	Tie
Rippen (HT,QT,LR)	Deckblech	Shell-to-solid coupling
Querträger	Querträger-Untergurt	Tie

Tabelle 62: Modell C - Kopplungsmethoden

C.2.5 Lagerung

Die Hauptträger wurden, wie in den Abbildungen 201 und 202 ersichtlich, als durchgehend gelenkig gelagert modelliert. Die gesperrten Freiheitsgrade sind für den Hauptträger A: $U_x = U_y = U_z = Rot_z = 0$ und für den Hauptträger B: $U_x = U_y = Rot_z = 0$.

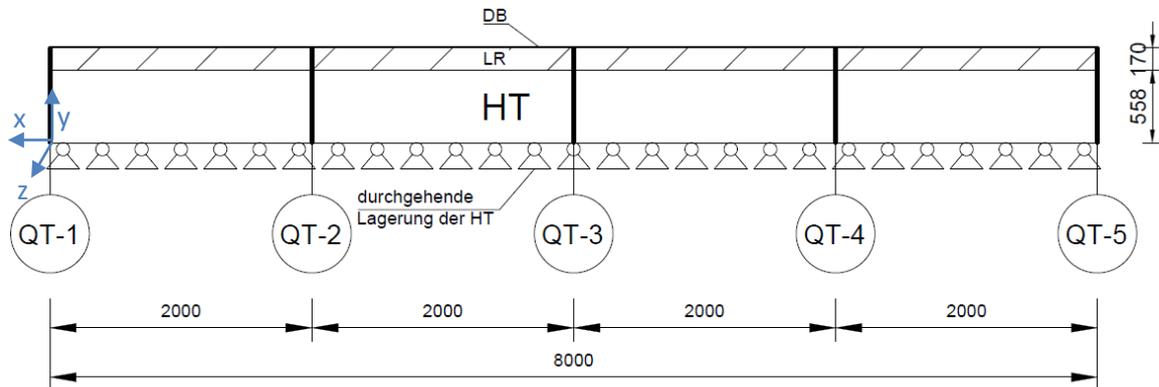


Abbildung 201: Modell C - Lagerung der Hauptträger

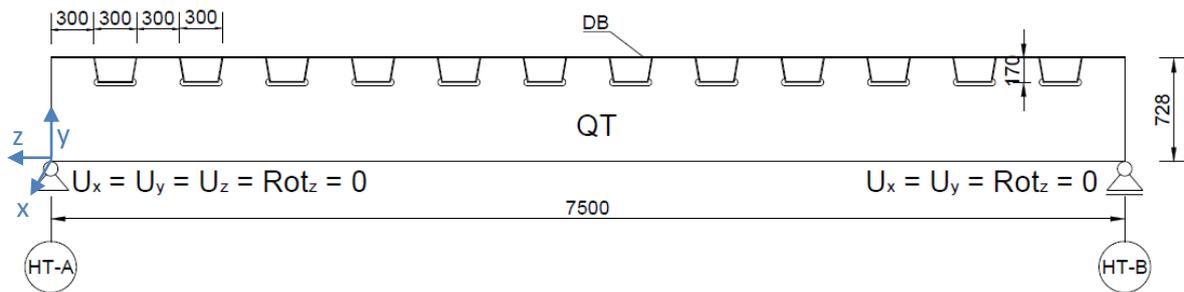


Abbildung 202: Modell C - Lagerung der Querträger

C.2.6 Betrachtete Detailpunkte

Im Rahmen der Berechnungen wurden die 2 maßgeblichen Detailpunkte im Hinblick auf ihre Ermüdungsbelastung gesondert betrachtet. Beide Punkte befinden sich im Bereich der ersten Längsrippe (LR-1), wobei Detailpunkt D2 direkt bei Querträger 3 (QT-3) liegt und Detailpunkt D1 in einem Abstand von $e_{LR} = 300 \text{ mm}$ zum QT-3 (siehe Abbildungen 203 und 204).

Detail D1 betrachtet den Anschlusspunkt der Schweißnaht an das Deckblech (siehe Abbildungen 203 und 204). Für diesen Detailpunkt liegt aus der EN 1993-1-9, Anhang B, Tabelle B.1 ein Kerbfall 100 ($\Delta\sigma_c = 100 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$) vor.

Detail D2 betrachtet den maßgebenden Anschlusspunkt der Längsrippe an den Querträger (siehe Abbildungen 203 und 204). Für diesen Detailpunkt liegt aus der EN 1993-1-9, Anhang B, Tabelle B.1 ein Kerbfall 100 ($\Delta\sigma_c = 100 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$) vor.

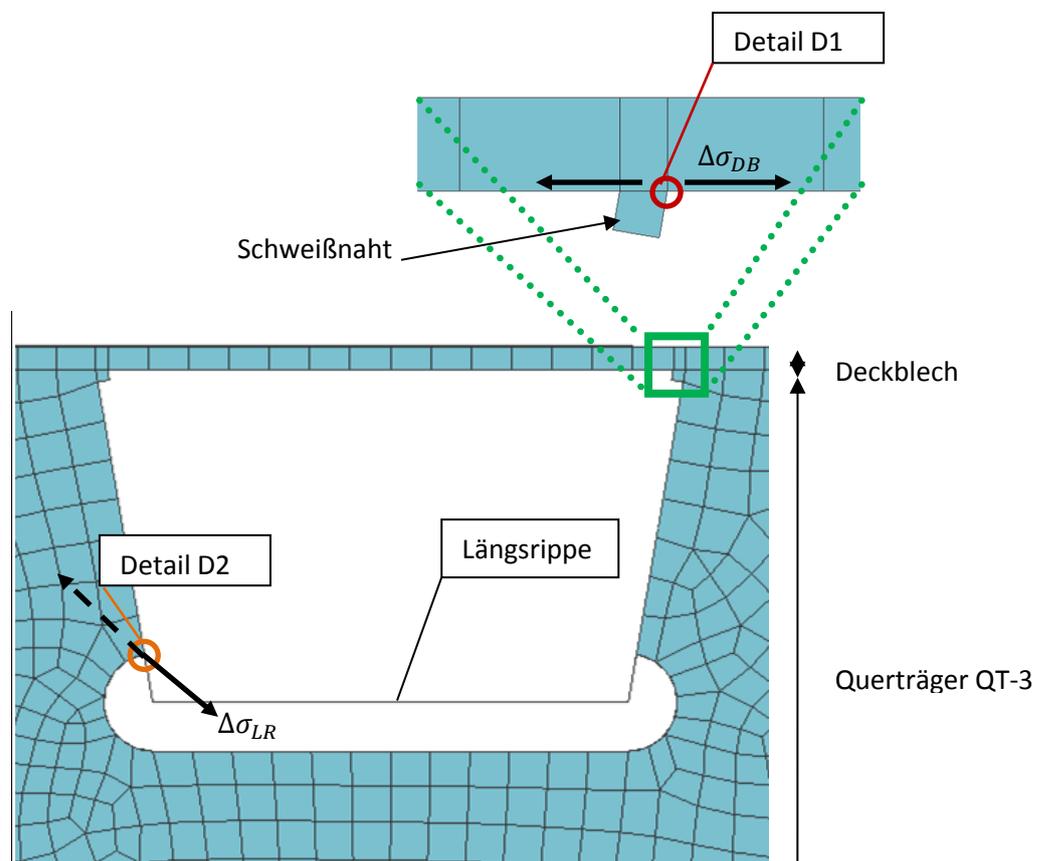


Abbildung 203: Modell C - Betrachtete Detailpunkte

Zur besseren Erläuterung, wo sich die Detailpunkte im Grundriss befinden, soll nachfolgende Abbildung 204 dienen.

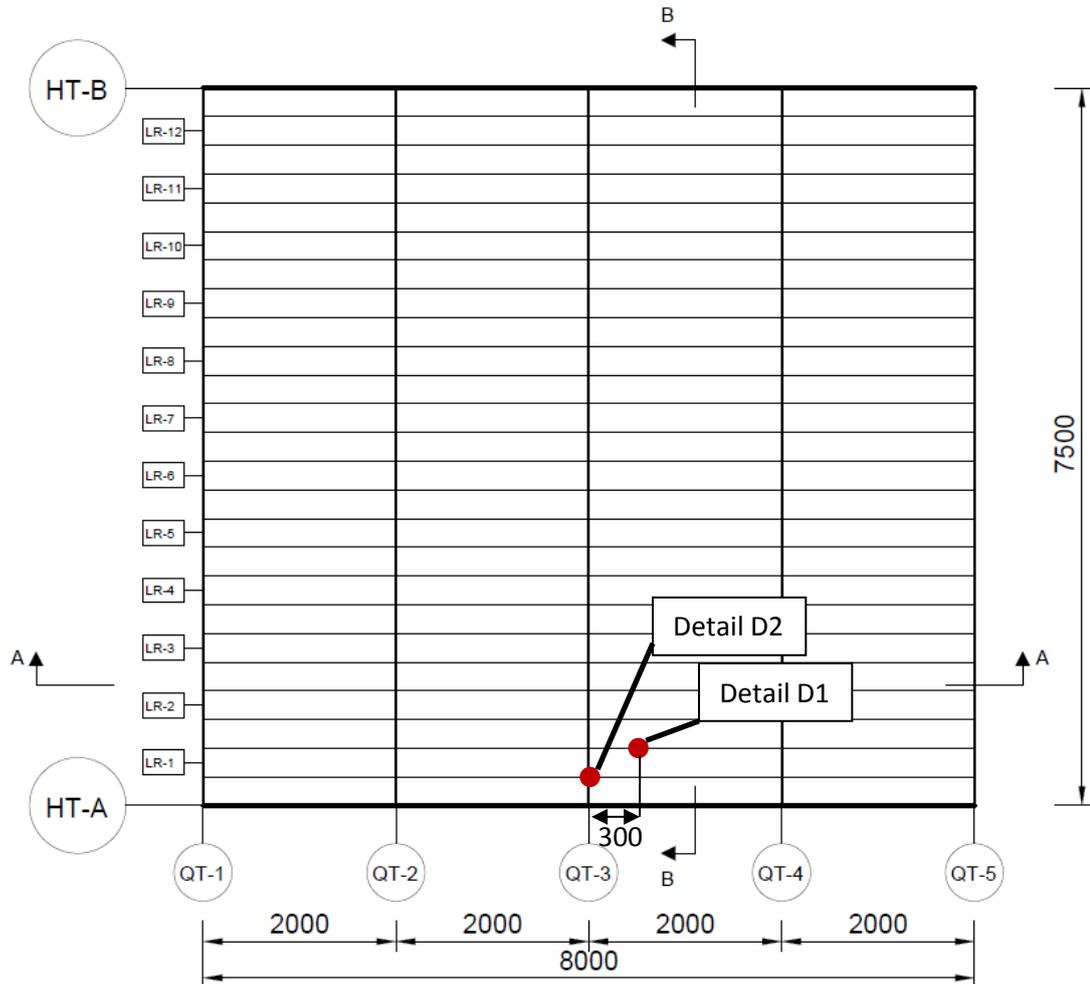


Abbildung 204: Modell C - Lage im Grundriss von Detail D1 und D2

Detailpunkt D1 liegt nicht auf derselben Seite der Längsrippe wie Punkt D2, da beim Aufstellen der Radlast mittig über D1 aufgrund der breiten Doppelbereifung des Reifentyps B dieser sonst über das betrachtete Brückendeck hinaus stehen würde. (siehe Abbildungen 203 und 204)

Da im Verlauf einer ersten Kontrollrechnung festgestellt wurde, dass sich genau am spannungsabzulesenden Detailpunkt D2 eine Singularität im Rechenmodell befindet, wurden die Spannungen in einem Abstand von 30 mm der Querträgerachse QT-3 abgelesen und für den Punkt D2 verwendet.

Da im weiteren Verlauf der Berechnungen die Spannungen des selben Punktes lediglich miteinander verglichen wurden, ergibt sich hieraus keine Einschränkung.

C.2.7 Lastaufstellung

Zur Berechnung der schädigenden Spannungsspiele wurden das Ermüdungslastmodell 3 (ELM 3) sowie das Ermüdungslastmodell 4 (ELM 4) lt. ÖNORM EN 1991-2, Abschnitt 4.6.4 und Abschnitt 4.6.5 angewendet. Weiters wurde ein modifiziertes Ermüdungslastmodell 4 (ELM 4-mod) aus [6] angesetzt. Die einzelnen Lastmodelle werden in Anhang D näher beschrieben.

Mit den einzelnen Einheitsflächenlasten je Reifenart aus Anhang D.3 wurde ein Lastzug über das Brückendeck erzeugt, wobei der Schwerpunkt der Lastfläche für Detail D1 mittig über der Schweißnaht der Längsrippe 1 (LR-1) auf der Seite der LR-2 liegt. Für Detail D2 liegt der Schwerpunkt der Lastfläche mittig über der LR-1. Dies führt nun im Detailpunkt D1 und D2 zum größten Spannungsspiel. (siehe Abbildung 205)

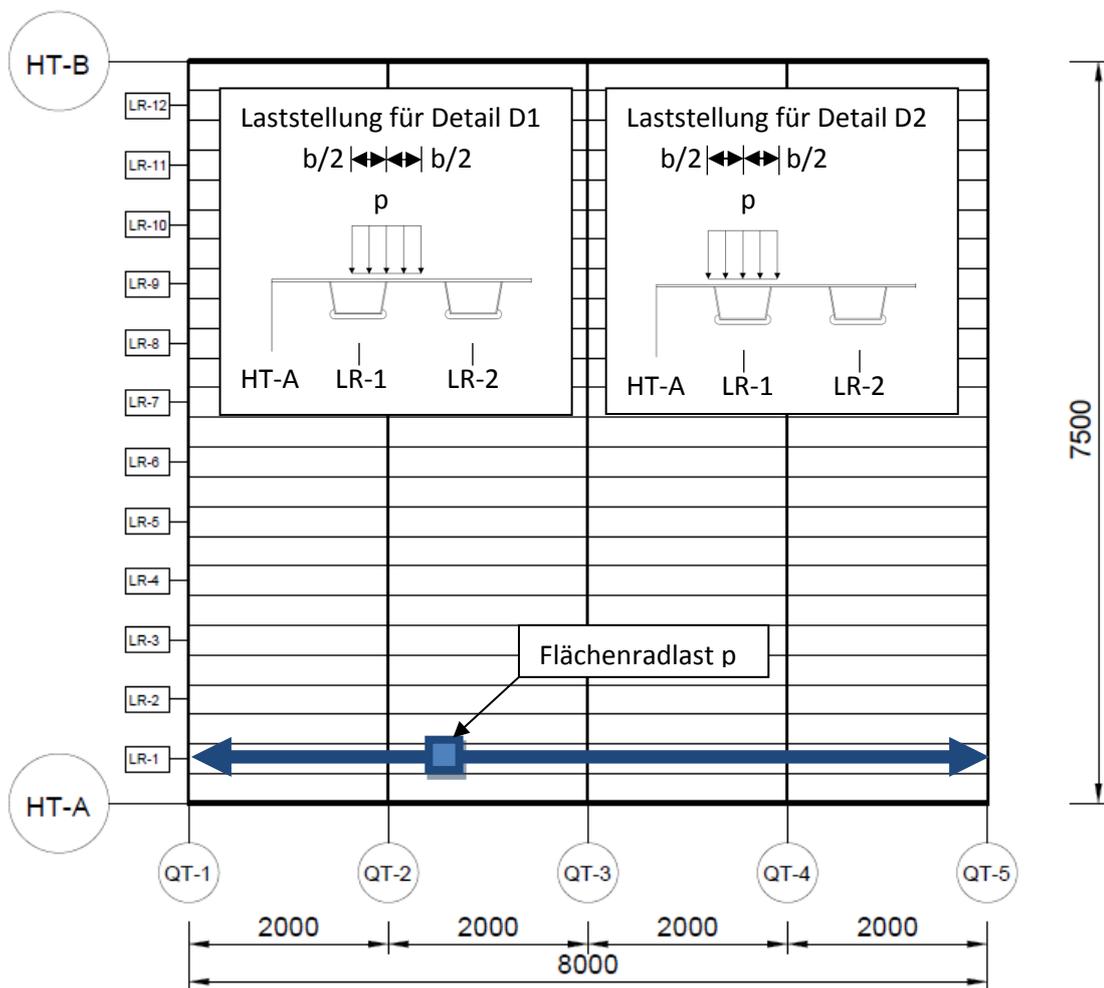


Abbildung 205: Modell C - Lastzug für größtes Spannungsspiel in Detail D1 und D2

In weiterer Folge wurden die Spannungen ausgelesen und damit im Programm Microsoft Excel die Einflusslinien je Detailpunkt erstellt.

C.3 Ermittelte Einflusslinien

C.3.1 Detail D1 - Spannungseinflusslinien

Den Einflusslinien für das Detail D1 geht die Annahme voraus, dass die Einflusslinien gleich sind wie jene des Modell A. Daher wurden Umrechnungsfaktoren für jede Achse bestimmt, mit welchen die Lastkollektive $\Delta\sigma_i$ aus Modell A entsprechend skaliert wurden.

Die Umrechnungsfaktoren errechnen sich wie folgt:

$$\text{Achse A: } f_A = \frac{\sigma_{\min,A,Modell C}}{\sigma_{\min,A,Modell A}} = \frac{-51,24 \left[\frac{N}{mm^2}\right]}{-110,94 \left[\frac{N}{mm^2}\right]} = 0,46$$

$$\text{Achse B: } f_B = \frac{\sigma_{\min,B,Modell C}}{\sigma_{\min,B,Modell A}} = \frac{-39,45 \left[\frac{N}{mm^2}\right]}{-103,78 \left[\frac{N}{mm^2}\right]} = 0,38$$

$$\text{Achse C: } f_C = \frac{\sigma_{\min,C,Modell C}}{\sigma_{\min,C,Modell A}} = \frac{-51,68 \left[\frac{N}{mm^2}\right]}{-115,70 \left[\frac{N}{mm^2}\right]} = 0,45$$

Die Umrechnung der Lastkollektive des Modell A auf jene des Modell C erfolgte mit

$$\Delta\sigma_{i,Modell C} = \Delta\sigma_{i,Modell A} * f_i$$

Da es sich um dieselben Einflusslinien wie bei dem Modell A handelt, werden diese hier nicht nochmals dargestellt.

Zur Ermittlung von $\Delta\sigma_{ELM3,D1}$ wurde wie für das Modell A die Radlast aus dem Ermüdungslastmodell 3 direkt über dem Detailpunkt D1 angesetzt. Dadurch ergab sich

$$\Delta\sigma_{ELM3,D1} = 49,00 \left[\frac{N}{mm^2}\right]$$

C.3.2 Detail D2 – Spannungseinflusslinien aus Einheitsachslasten

Die Einflusslinien für Detail D2 wurden mit den aus dem Berechnungsmodell ausgelesenen Spannungen am Detailpunkt erstellt. Aus ihnen erkennt man in den Abbildungen 206 bis 209 die beiden Spannungsspiele welche jeweils ein Maximum im Detailpunkt hervorrufen, wenn das betreffende Rad der Achse in einem Abstand von 80 cm zum Detail mittig über der Längsrippe steht. In den nachfolgenden Abbildungen 206 bis 209 sind darüber hinaus die Querträger durch dickere vertikale Linien bei $x = -200$ und 200 cm gekennzeichnet.

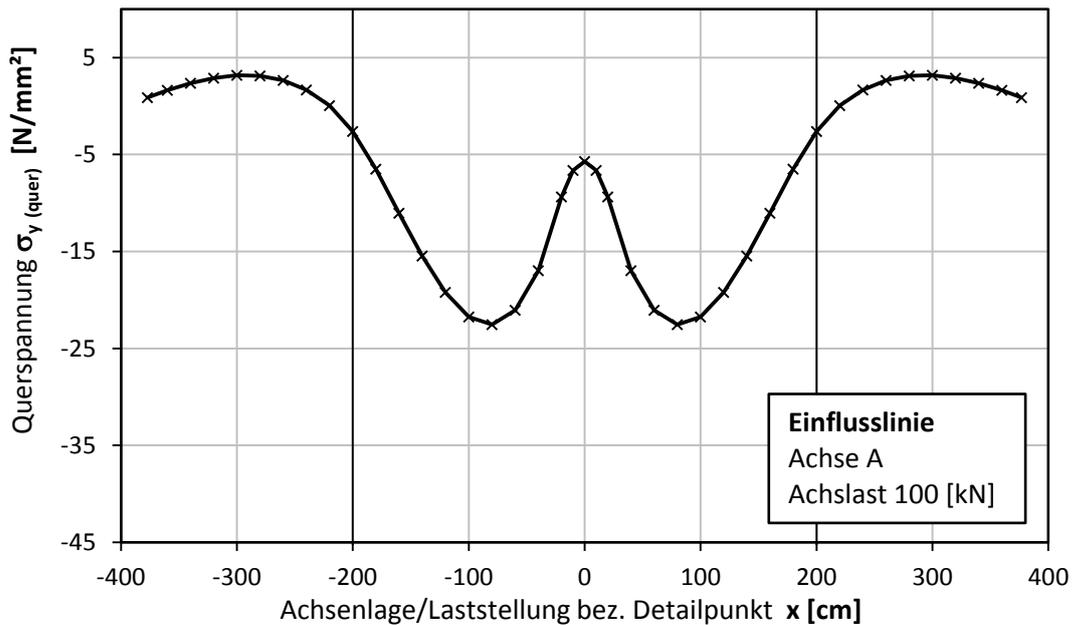


Abbildung 206: Detail D2 - Spannungseinflusslinie aus Achse A

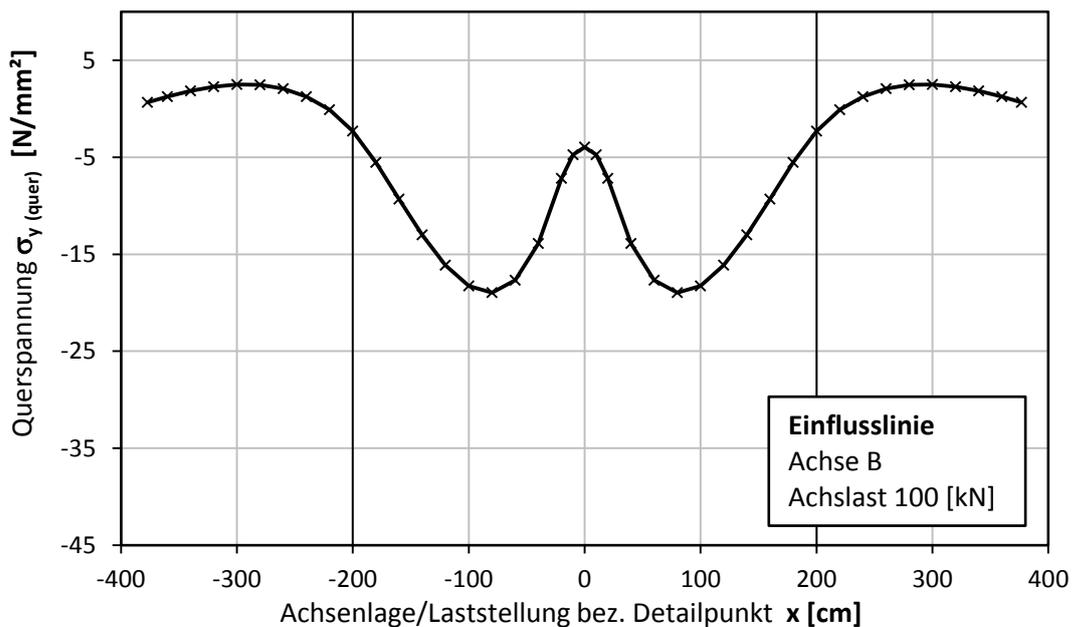


Abbildung 207: Detail D2 - Spannungseinflusslinie aus Achse B

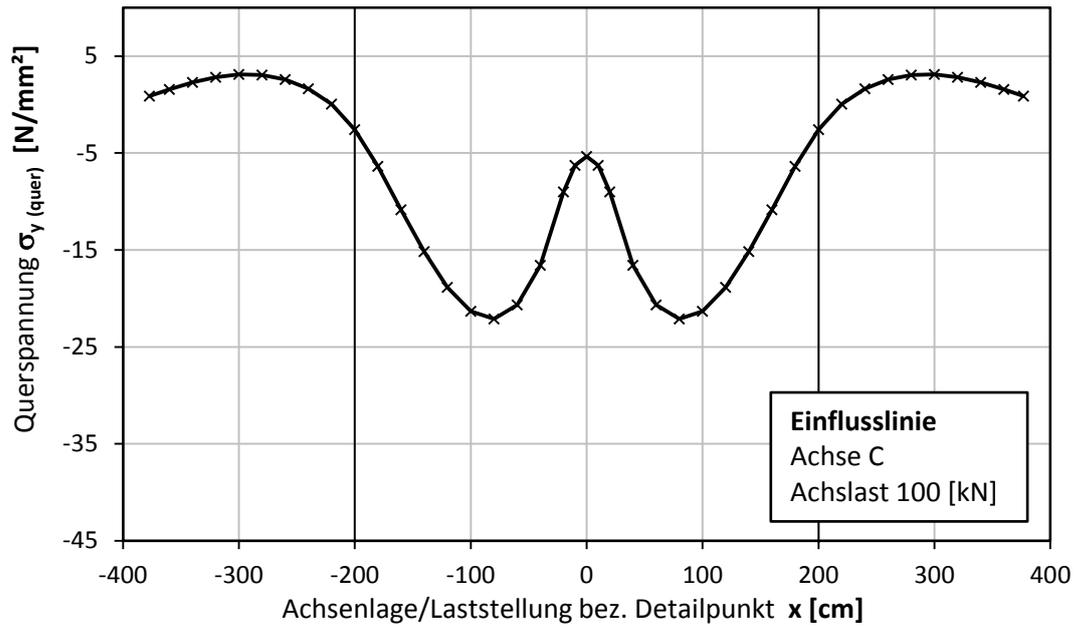


Abbildung 208: Detail D2 - Spannungseinflusslinie aus Achse C

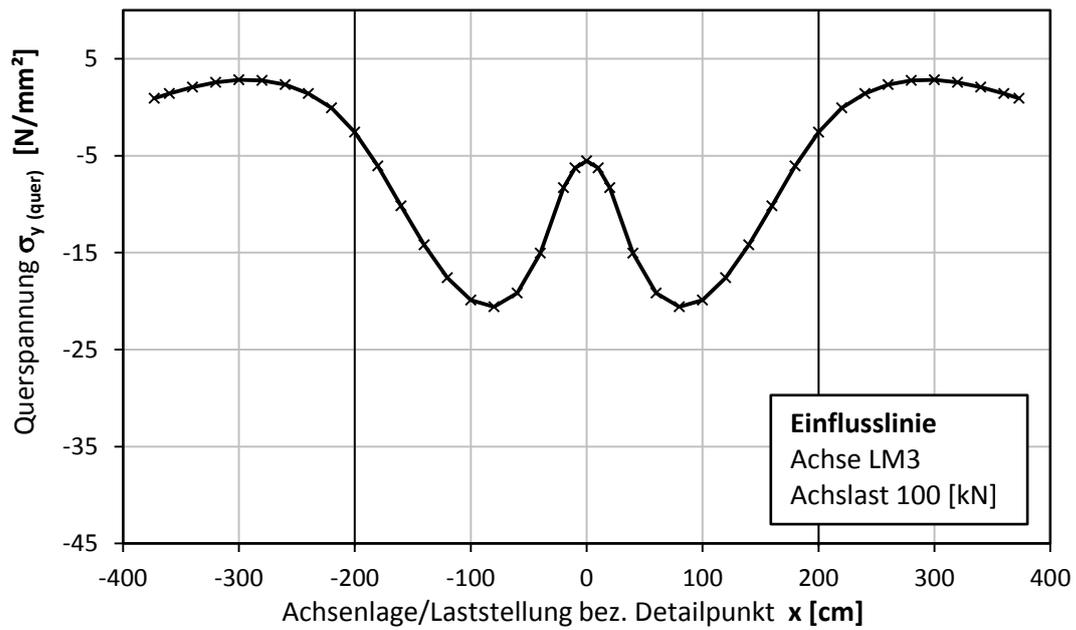


Abbildung 209: Detail D2 - Spannungseinflusslinie aus Achse LM3

C.4 Ermittlung der Lastkollektive

C.4.1 Detail D1 – Lastspiele aus ELM 4

Die Spannungsspiele $\Delta\sigma_i$ für Detail D1 wurden wie in Abschnitt B.3.1 gezeigt, aus jenen des Modell A errechnet und sind in den nachfolgenden Tabellen 63 bis 72 zusammengefasst. (vgl. Tabellen 11 bis 15)

C.4.1.1 Schwerfahrzeug Typ T1

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{[mm^2]}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	66,14	20
$\Delta\sigma_2$	32,30	20

Tabelle 63: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T1

C.4.1.2 Schwerfahrzeug Typ T2

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{[mm^2]}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	63,71	5
$\Delta\sigma_2$	48,45	5
$\Delta\sigma_3$	29,05	5

Tabelle 64: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T2

C.4.1.3 Schwerfahrzeug Typ T3

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{[mm^2]}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	76,10	50
$\Delta\sigma_2$	49,09	50
$\Delta\sigma_3$	48,33	50
$\Delta\sigma_4$	44,77	50
$\Delta\sigma_5$	34,05	50

Tabelle 65: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T3

C.4.1.4 Schwerfahrzeug Typ T4

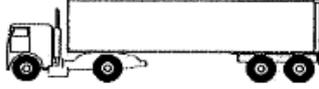
		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	58,29	15
$\Delta\sigma_2$	45,18	15
$\Delta\sigma_3$	35,98	15
$\Delta\sigma_4$	28,88	15

Tabelle 66: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T4

C.4.1.5 Schwerfahrzeug Typ T5

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	66,01	10
$\Delta\sigma_2$	46,40	10
$\Delta\sigma_3$	43,08	10
$\Delta\sigma_4$	42,87	10
$\Delta\sigma_5$	34,14	10

Tabelle 67: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T5

C.4.2 Detail D1 – Lastspiele aus ELM 4_mod

Für das Ermüdungslastmodell 4_mod sind in den Tabellen 68 bis 72 die ermittelten Lastspiele dargestellt (vgl. Tabellen 16 bis 20).

C.4.2.1 Schwerfahrzeug Typ T1

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	38,65	20
$\Delta\sigma_2$	25,07	20

Tabelle 68: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T1

C.4.2.2 Schwerfahrzeug Typ T2

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	56,12	5
$\Delta\sigma_2$	42,68	5
$\Delta\sigma_3$	25,56	5

Tabelle 69: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T2

C.4.2.3 Schwerfahrzeug Typ T3

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	55,91	50
$\Delta\sigma_2$	36,05	50
$\Delta\sigma_3$	35,49	50
$\Delta\sigma_4$	32,88	50
$\Delta\sigma_5$	25,00	50

Tabelle 70: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T3

C.4.2.4 Schwerfahrzeug Typ T4

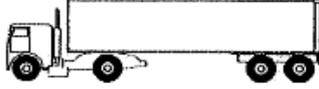
		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{[mm^2]}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	43,33	15
$\Delta\sigma_2$	35,14	15
$\Delta\sigma_3$	24,65	15
$\Delta\sigma_4$	21,49	15

Tabelle 71: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T4

C.4.2.5 Schwerfahrzeug Typ T5

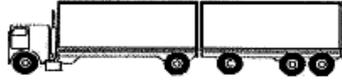
		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{[mm^2]}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	47,07	10
$\Delta\sigma_2$	33,12	10
$\Delta\sigma_3$	30,73	10
$\Delta\sigma_4$	30,60	10
$\Delta\sigma_5$	24,34	10

Tabelle 72: Detail D1 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T5

C.4.3 Detail D2 – Spannungsverläufe und Lastspiele aus ELM 4

Für Detail D2 wurden die Spannungsschwingspiele $\Delta\sigma$ mit Hilfe der Reservoirmethode laut EN 1993-1-9 Bild A.1 c) ausgezählt. Die Einflusslinien der einzelnen Schwerfahrzeuge sind analog wie jene in Abschnitt A.4.3 zu bestimmen.

C.4.3.1 Schwerfahrzeug Typ T1

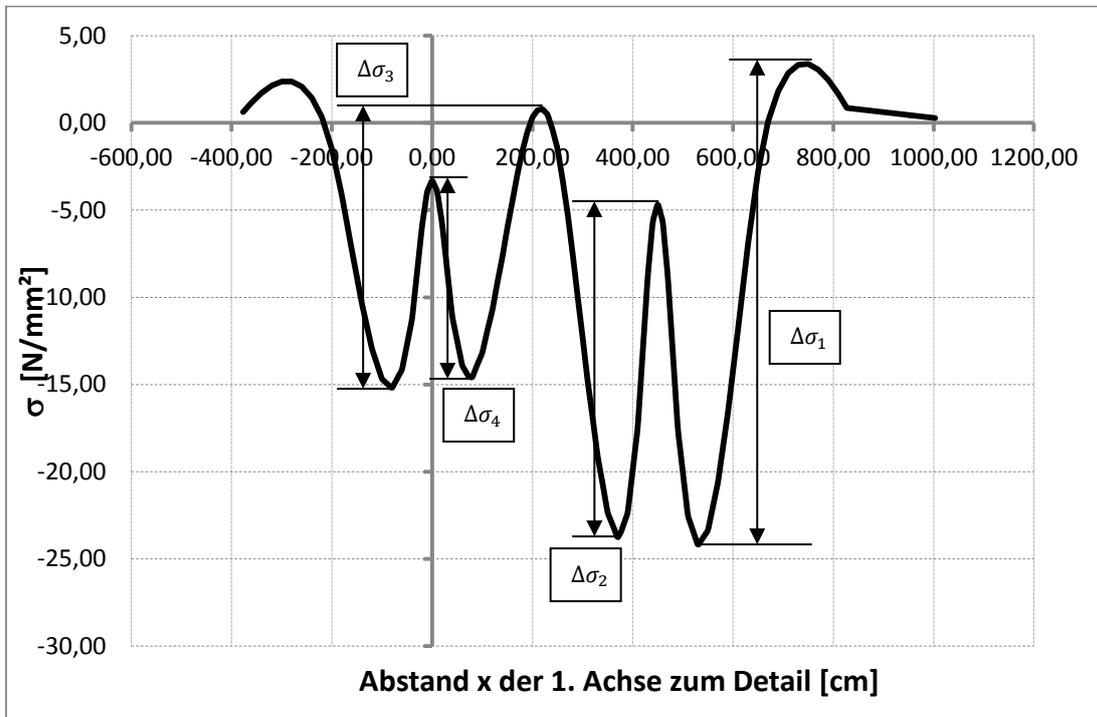


Abbildung 210: Detail D2 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T1

Für den Fahrzeugtyp können nun die Spannungsspiele $\Delta\sigma_i$ aus dem Diagramm der Einflusslinie abgelesen werden, wobei die sehr kleinen Spannungsspiele nicht berücksichtigt wurden. Die Vorgehensweise ist für sämtliche Fahrzeugtypen analog durchzuführen (siehe Abbildungen 210 bis 220 sowie Tabellen 73 bis 82). Für den Fahrzeugtyp T1 sind die Spannungsspiele in Tabelle 73 zusammengefasst.

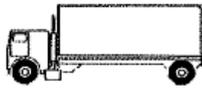
		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	27,56	20
$\Delta\sigma_2$	19,03	20
$\Delta\sigma_3$	15,97	20
$\Delta\sigma_4$	11,22	20

Tabelle 73: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T1

C.4.3.2 Schwerfahrzeug Typ T2

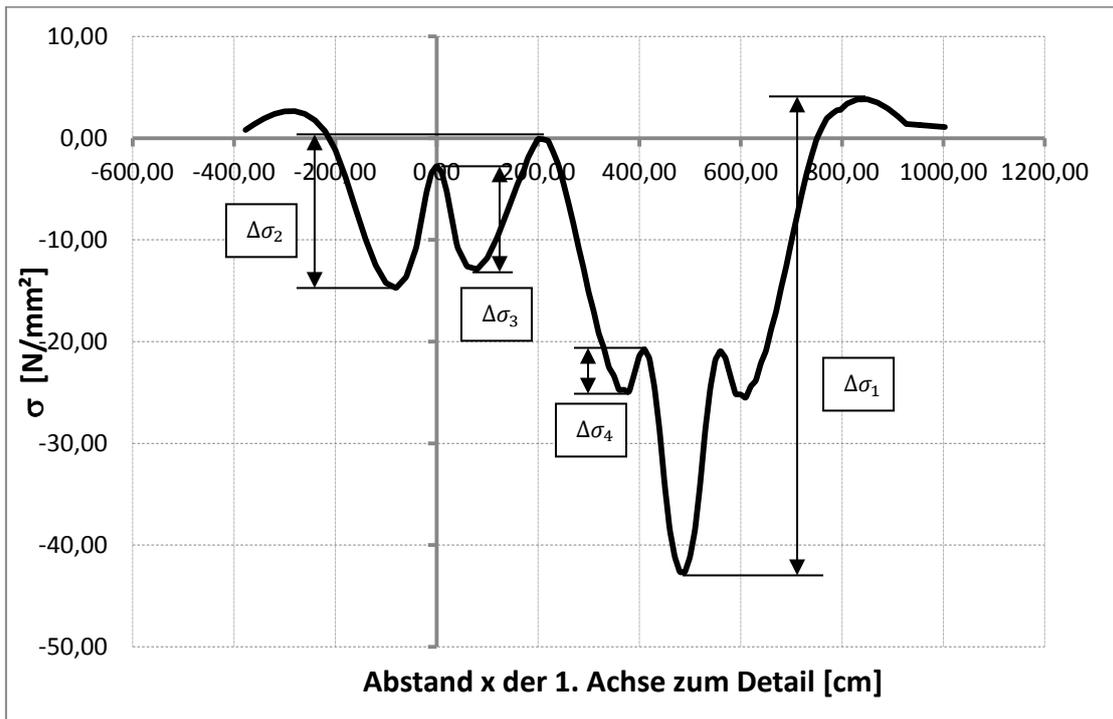


Abbildung 211: Detail D2 - Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T2

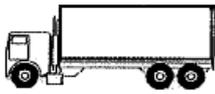
		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	46,50	5
$\Delta\sigma_2$	14,64	5
$\Delta\sigma_3$	10,09	5
$\Delta\sigma_4$	4,16	5

Tabelle 74: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T2

C.4.3.3 Schwerfahrzeug Typ T3

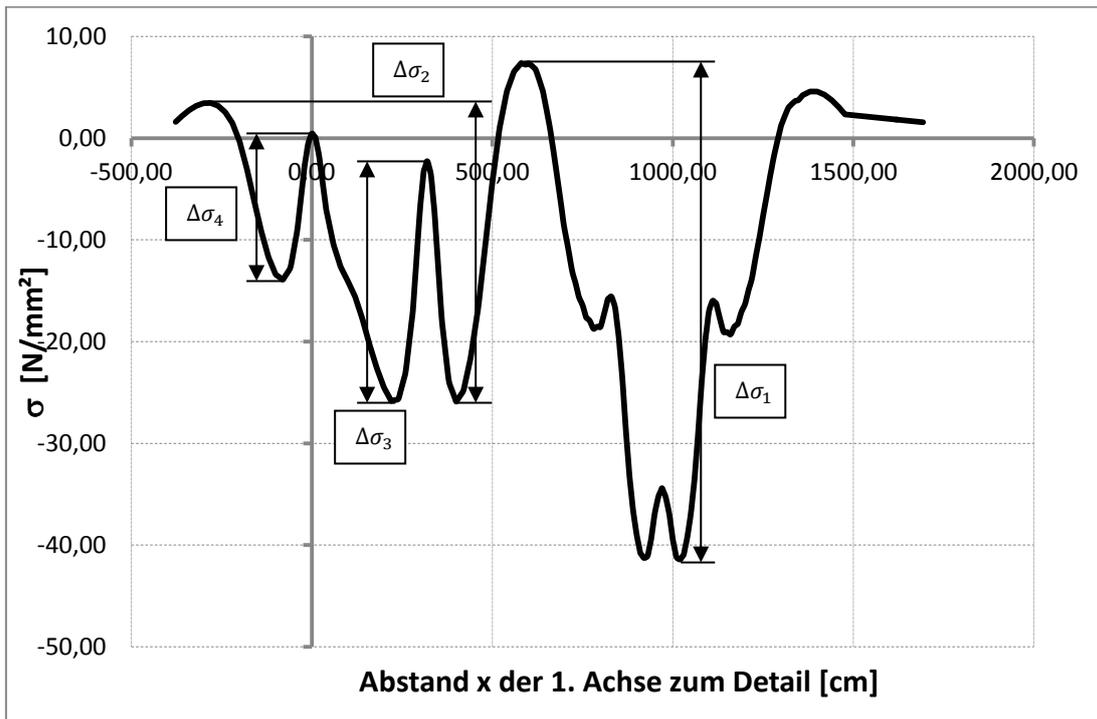


Abbildung 212: Detail D2 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T3

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	48,79	50
$\Delta\sigma_2$	29,36	50
$\Delta\sigma_3$	23,57	50
$\Delta\sigma_4$	14,37	50

Tabelle 75: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T3

C.4.3.4 Schwerfahrzeug Typ T4

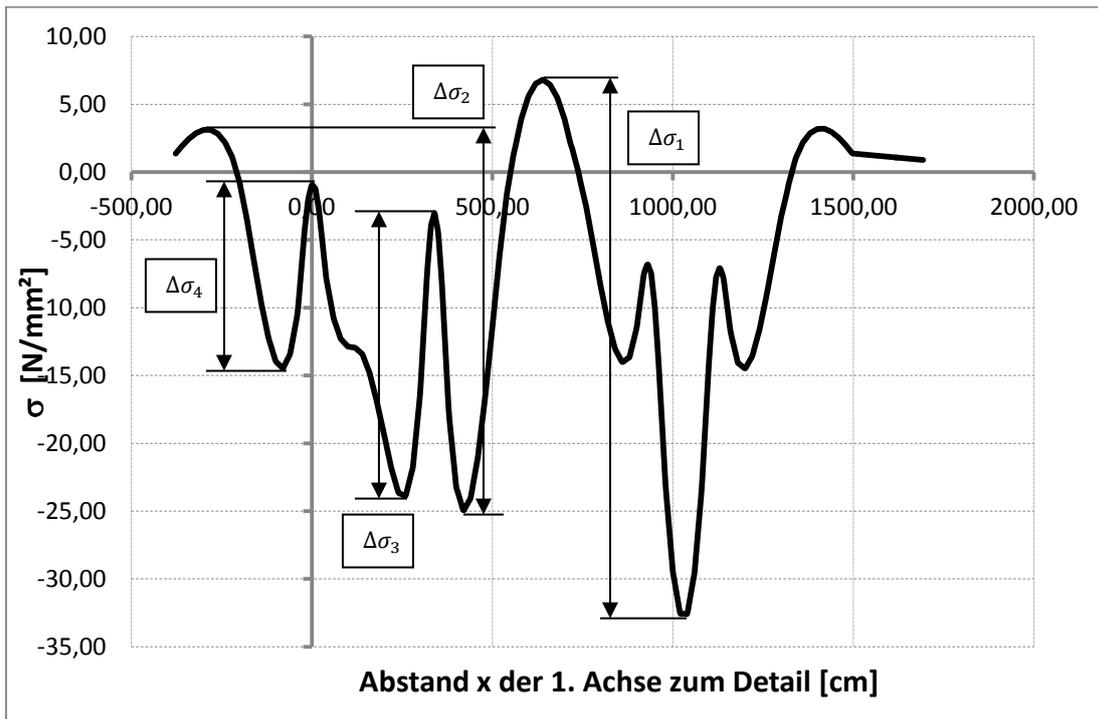


Abbildung 213: Detail D2 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T4

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	39,40	15
$\Delta\sigma_2$	28,05	15
$\Delta\sigma_3$	20,86	15
$\Delta\sigma_4$	13,55	15

Tabelle 76: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T4

C.4.3.5 Schwerfahrzeug Typ T5

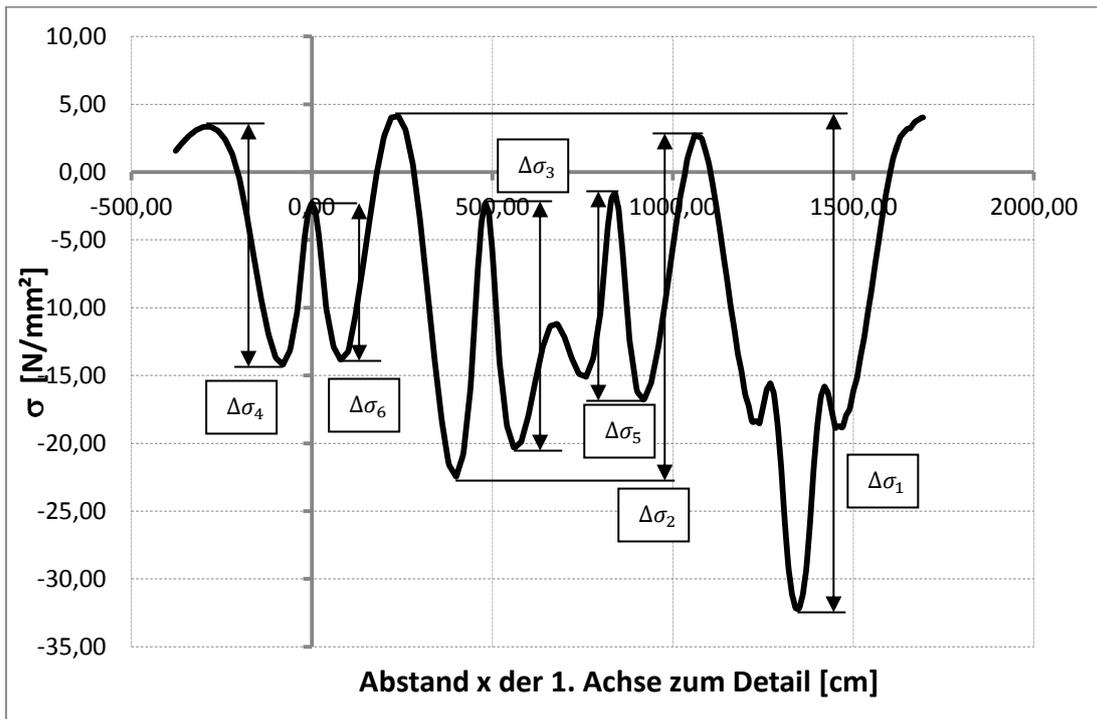


Abbildung 214: Detail D2 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T5

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	36,31	10
$\Delta\sigma_2$	25,15	10
$\Delta\sigma_3$	18,01	10
$\Delta\sigma_4$	17,54	10
$\Delta\sigma_5$	18,37	10
$\Delta\sigma_6$	16,12	10

Tabelle 77: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T5

C.4.4 Detail D2 – Spannungsverläufe und Lastspiele aus ELM 4_mod

Für das Ermüdungslastmodell 4_mod sind in den Abbildungen 215 bis 220 die Spannungsverläufe je Fahrzeugstyp und zugehörig in den Tabellen 78 bis 82 die ermittelten Lastspiele dargestellt (vgl. Tabellen 26 bis 30).

C.4.4.1 Schwerfahrzeug Typ T1

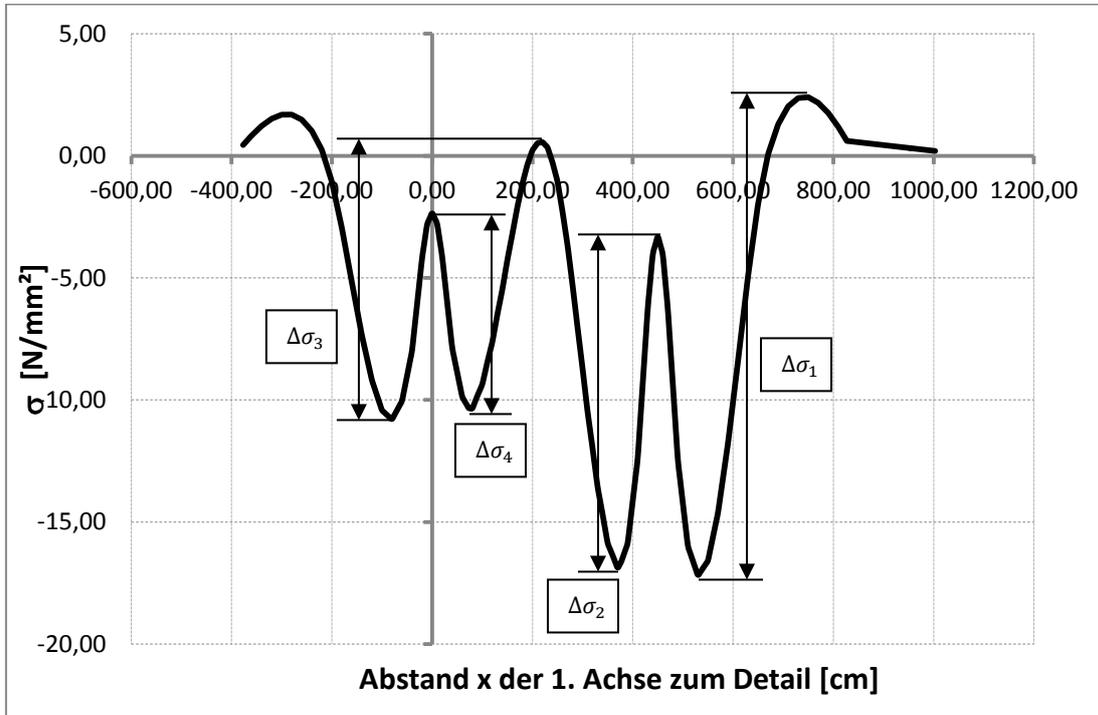


Abbildung 215: Detail D2 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T1

		
$\Delta\sigma_i$	N [$\frac{N}{\text{mm}^2}$]	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	19,57	10
$\Delta\sigma_2$	13,51	10
$\Delta\sigma_3$	11,34	10
$\Delta\sigma_4$	7,99	10

Tabelle 78: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T1

C.4.4.2 Schwerfahrzeug Typ T2

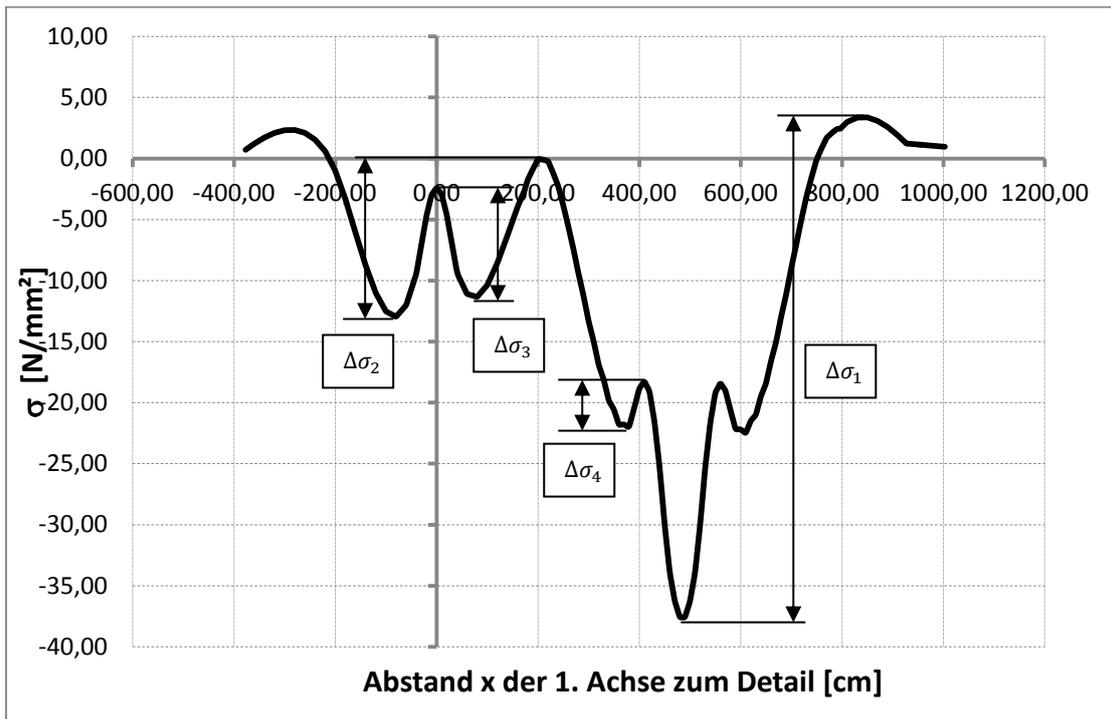


Abbildung 216: Detail D2 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T2

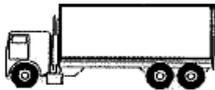
		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	40,96	5
$\Delta\sigma_2$	12,88	5
$\Delta\sigma_3$	8,88	5
$\Delta\sigma_4$	3,67	5

Tabelle 79: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T2

C.4.4.3 Schwerfahrzeug Typ T3

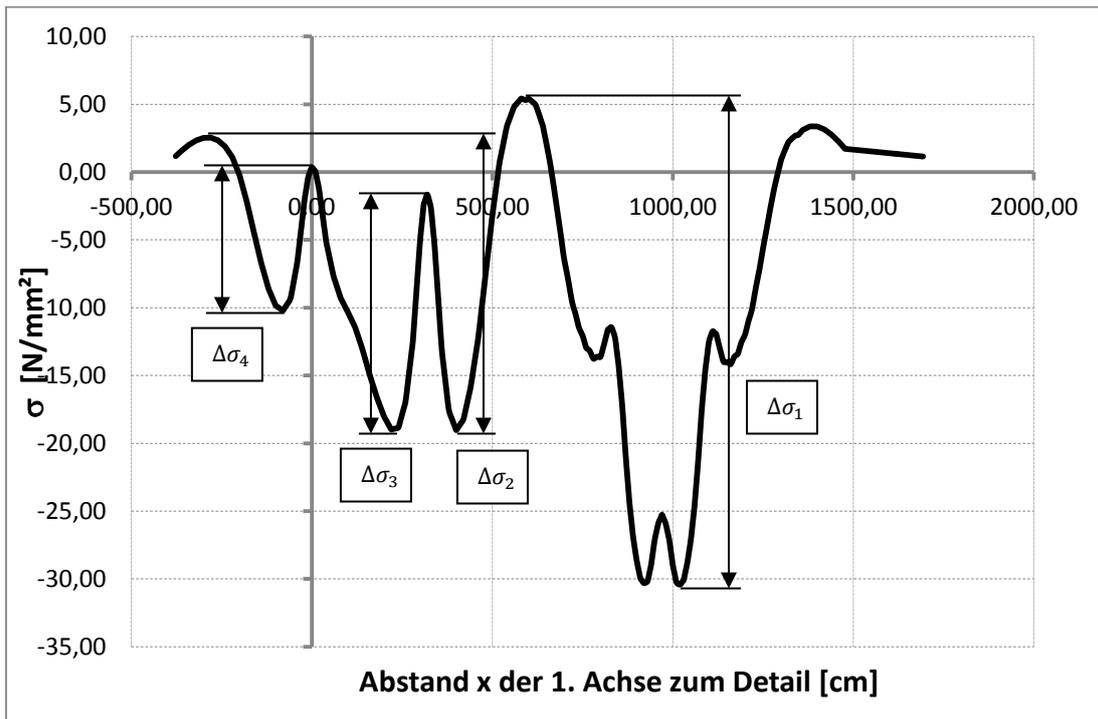


Abbildung 217: Detail D2 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T3

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	35,84	50
$\Delta\sigma_2$	21,57	50
$\Delta\sigma_3$	17,31	50
$\Delta\sigma_4$	10,55	50

Tabelle 80: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T3

C.4.4.4 Schwerfahrzeug Typ T4

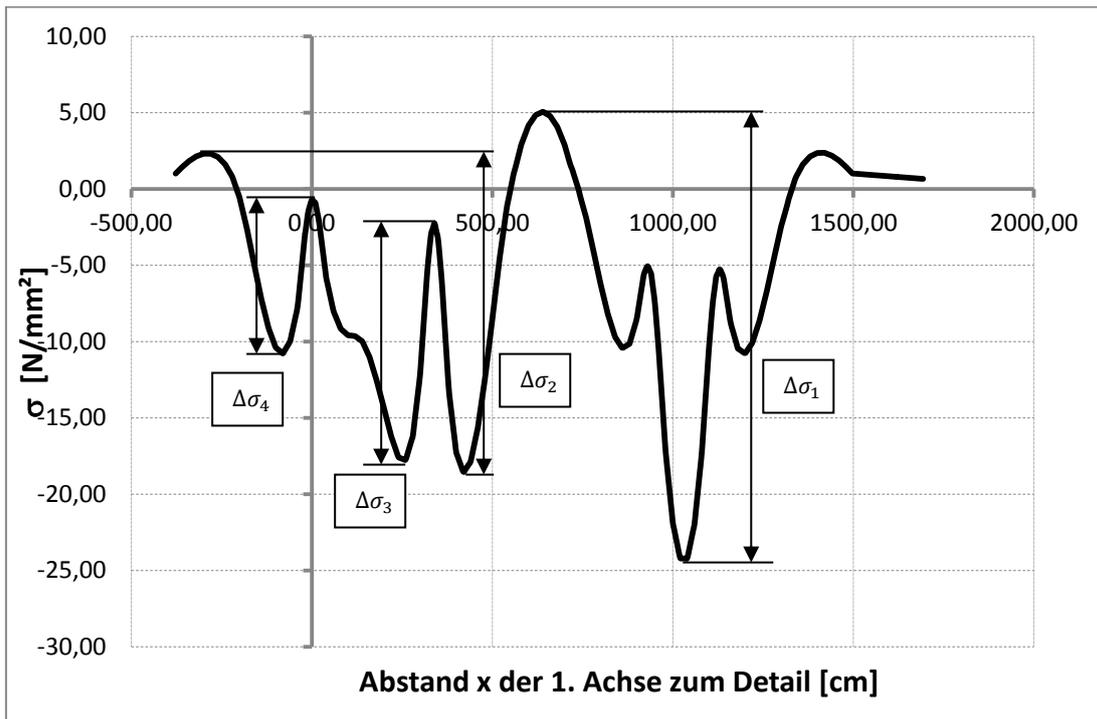


Abbildung 218: Detail D2 – Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T4

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	29,29	15
$\Delta\sigma_2$	20,86	15
$\Delta\sigma_3$	15,51	15
$\Delta\sigma_4$	10,08	15

Tabelle 81: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T4

C.4.4.5 Schwerfahrzeug Typ T5

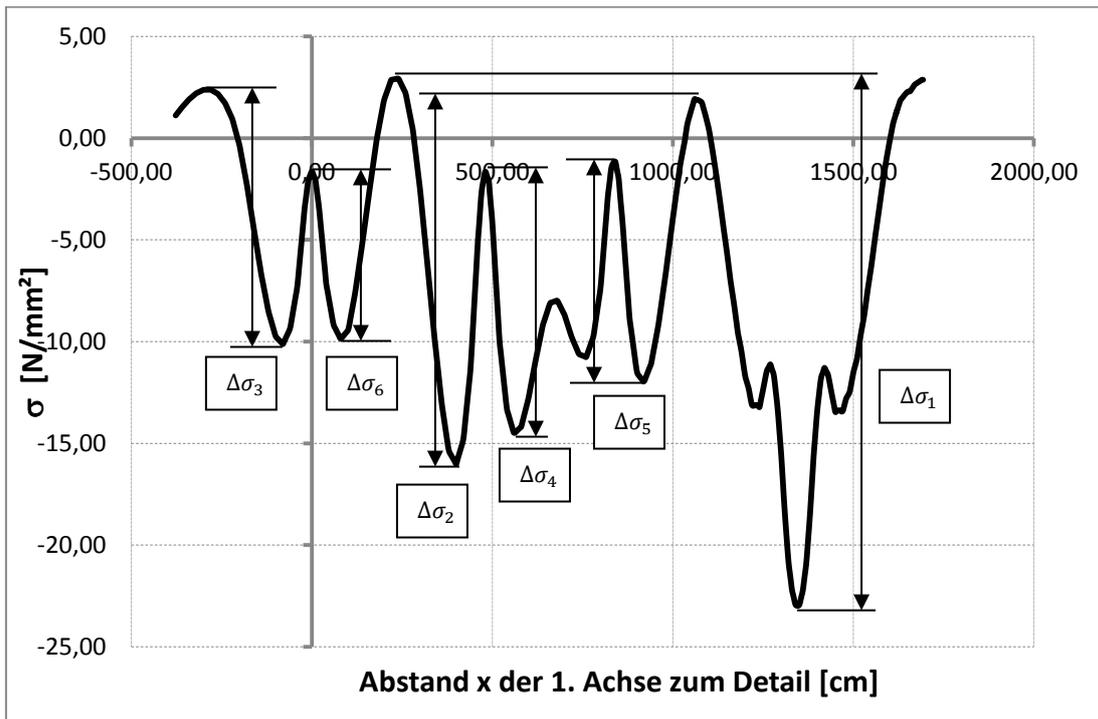


Abbildung 219: Detail D2 - Spannungsverlauf für das Schwerfahrzeug Typ T5

		
$\Delta\sigma_i$	$\frac{N}{mm^2}$	Häufigkeit n_i
$\Delta\sigma_1$	25,91	10
$\Delta\sigma_2$	17,94	10
$\Delta\sigma_3$	12,50	10
$\Delta\sigma_4$	12,85	10
$\Delta\sigma_5$	10,83	10
$\Delta\sigma_6$	8,20	10

Tabelle 82: Detail D2 – Lastspiele des Schwerfahrzeugs T5

C.4.4.6 Fahrzeug Typ ELM3

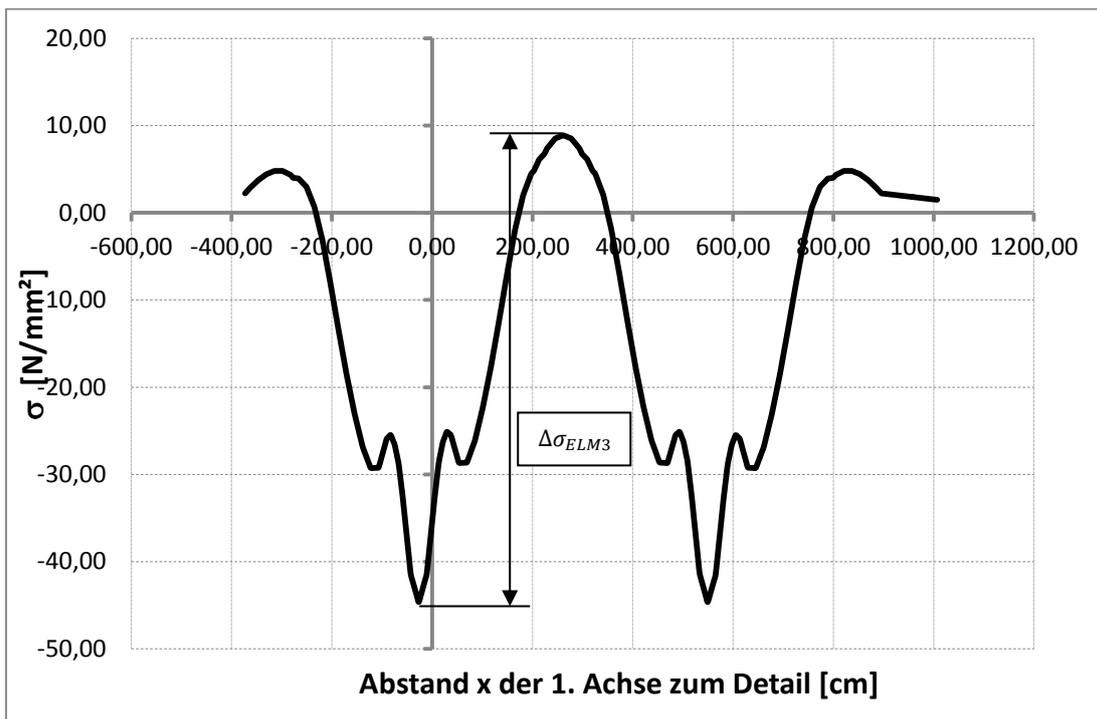


Abbildung 220: Detail D2 - Lastspiel für das Fahrzeug aus ELM3

Für das Ermüdungslastmodell 3 ist nur das maximale Spannungsspiel für die weitere Berechnung maßgebend. Hier ergibt sich $\Delta\sigma_{ELM3,D2} = 53,53 \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$ (siehe Abbildung 220)

C.4.5 Lastkollektiv - Einstufenkollektiv

Wie bei Modell A in Abschnitt A.4.5 werden hier nun in den Abbildungen 221 bis 248 die Lastkollektive mit ihren schädigungsäquivalenten Einstufenkollektiven $\Delta\sigma_e$ für die nach Abbildung 25 untersuchten 5 Lastniveaus, sowie der 2 Grenzfälle $m^* = 3$ und $m^* = 5$ dargestellt (siehe Abschnitt 4).

C.4.5.1 D1 - Lastkollektive aus ELM 4

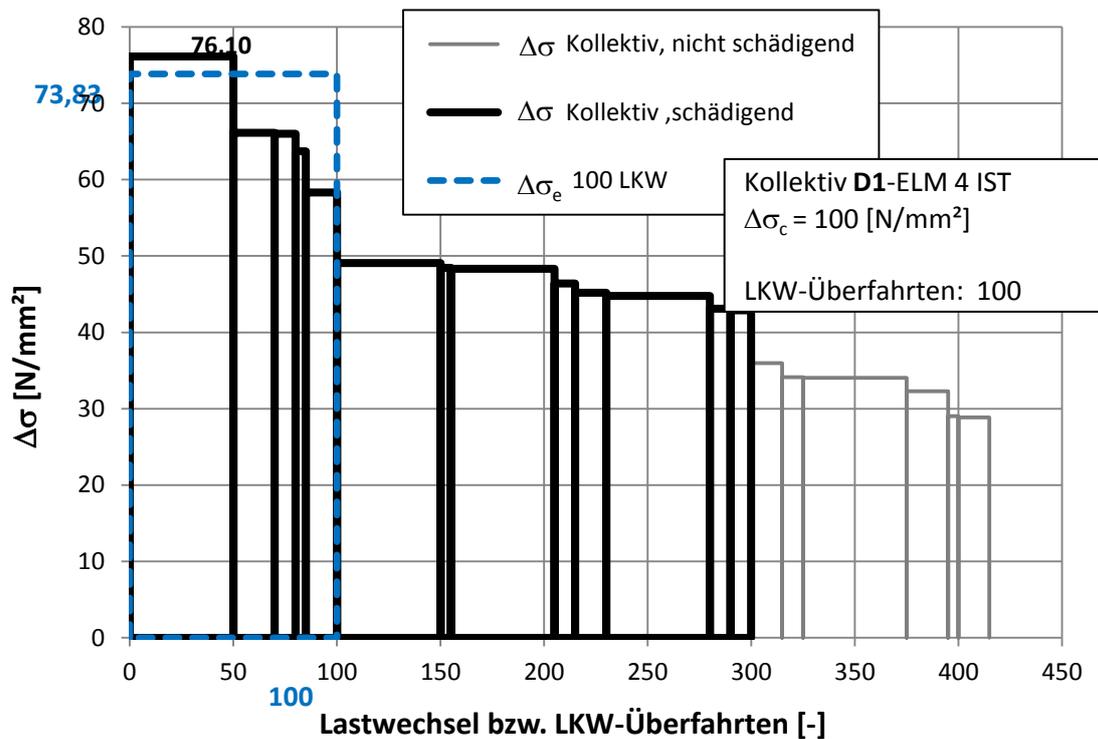


Abbildung 221: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4 IST

Aus dem Lastkollektiv in Abbildung 221 für Detail D1 mit der Belastung aus Ermüdungslastmodell 4 ist erkennbar, dass bezogen auf eine Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c = 100 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$ bereits sechs Kollektivteile als nicht schädigend wegfallen. Bei einer Verminderung der Kollektivteile um 50% ist sogar keine schädigende Wirkung mehr vorhanden (siehe Abbildung 225). Nur bei einer Erhöhung des Kollektivs um 50% sind sämtliche Teile schadenswirksam (siehe Abbildung 224). Die nicht schädigenden Kollektivteile sind mit grauen Linien dargestellt.

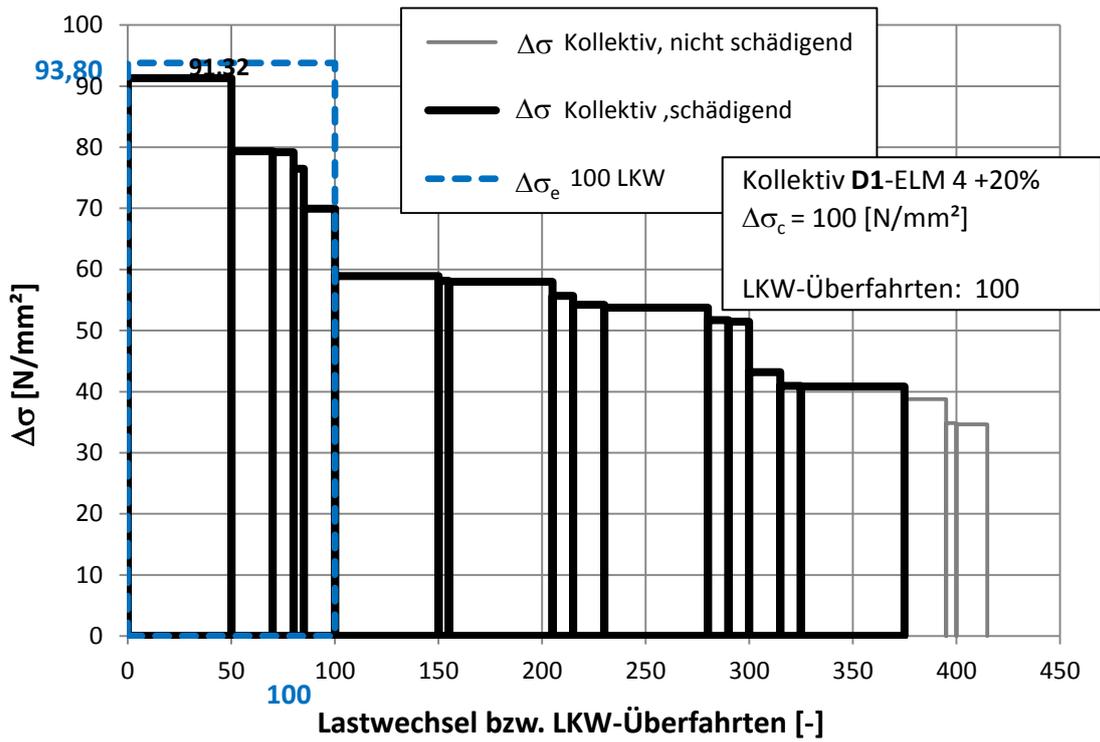


Abbildung 222: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4 +20%

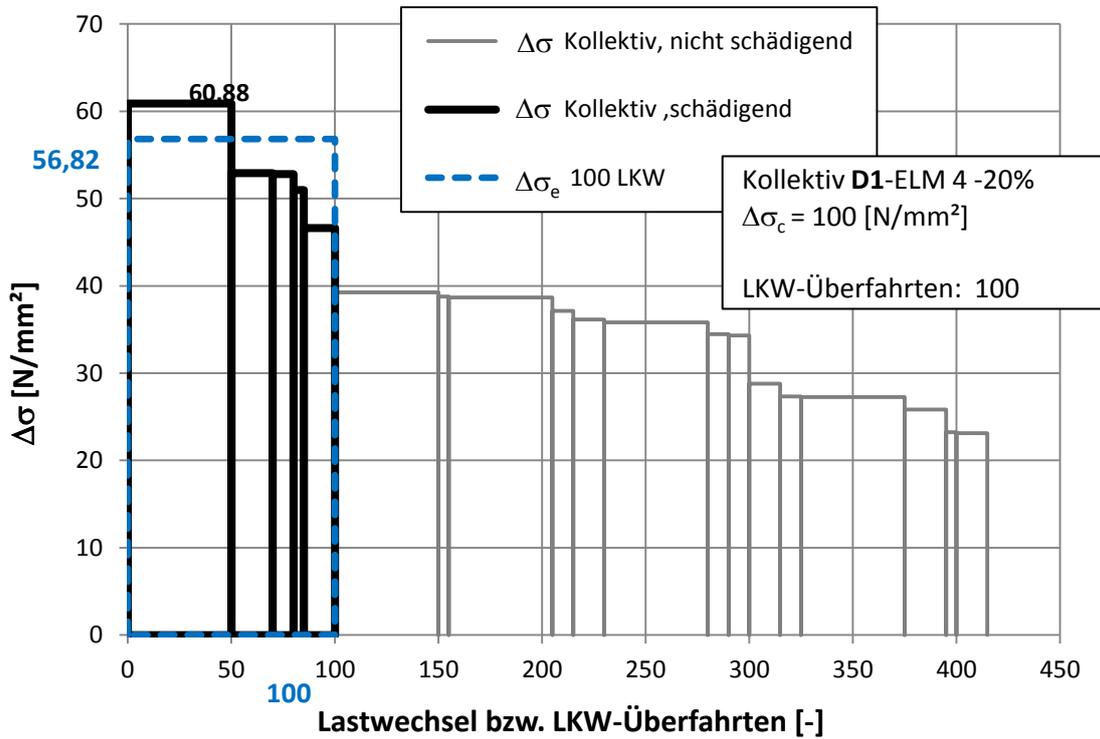


Abbildung 223: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4 -20%

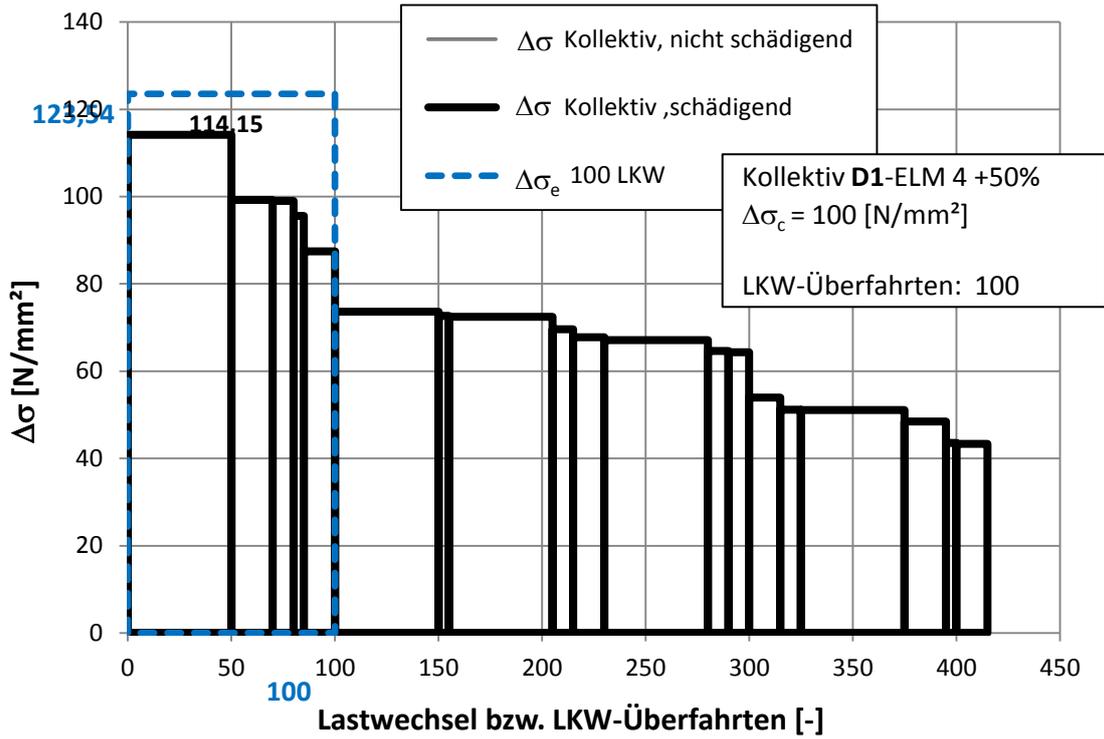


Abbildung 224: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4 +50%

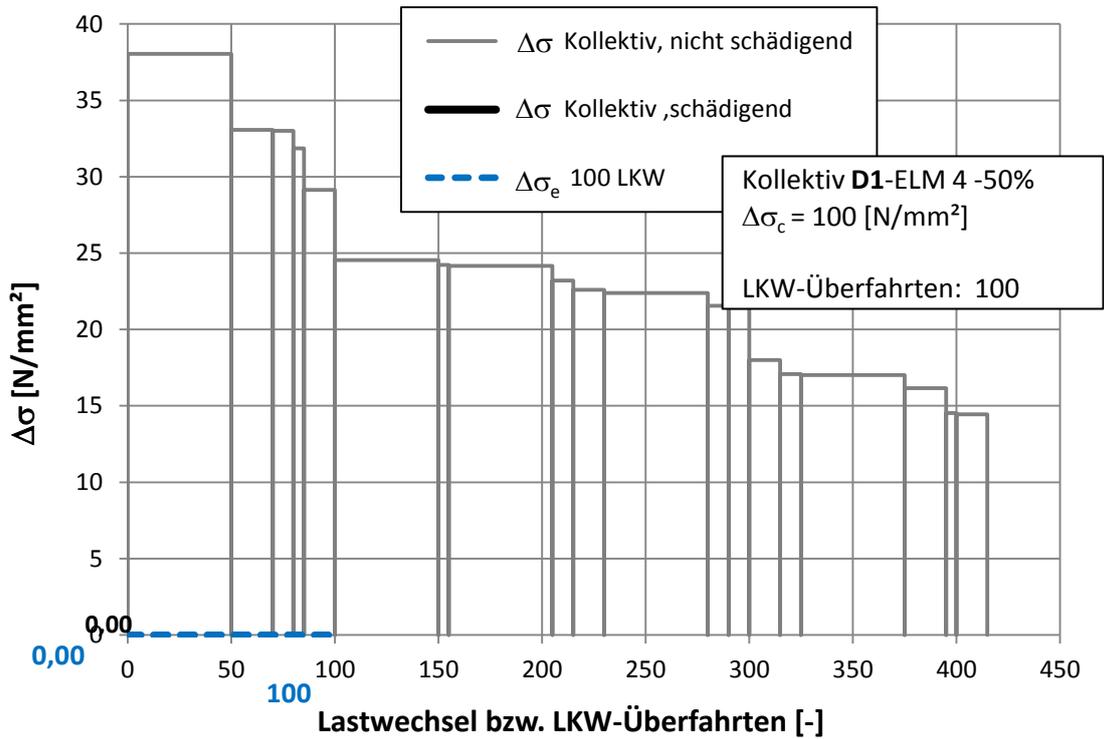


Abbildung 225: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4 -50%

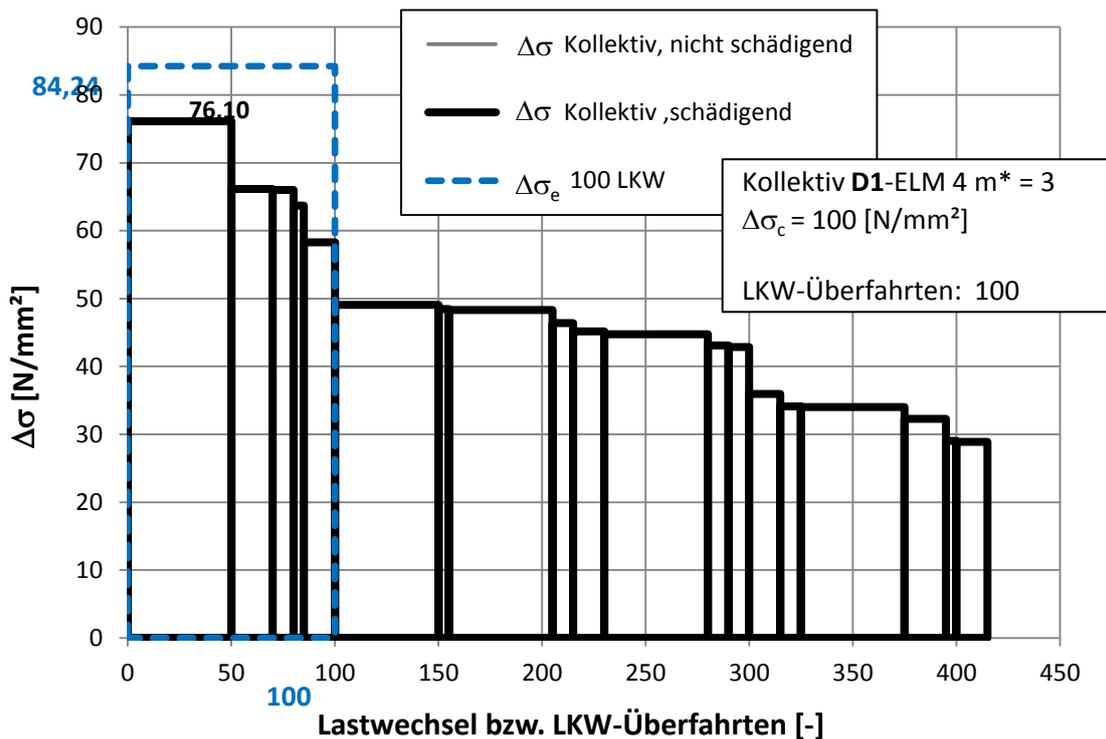


Abbildung 226: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4 m* = 3

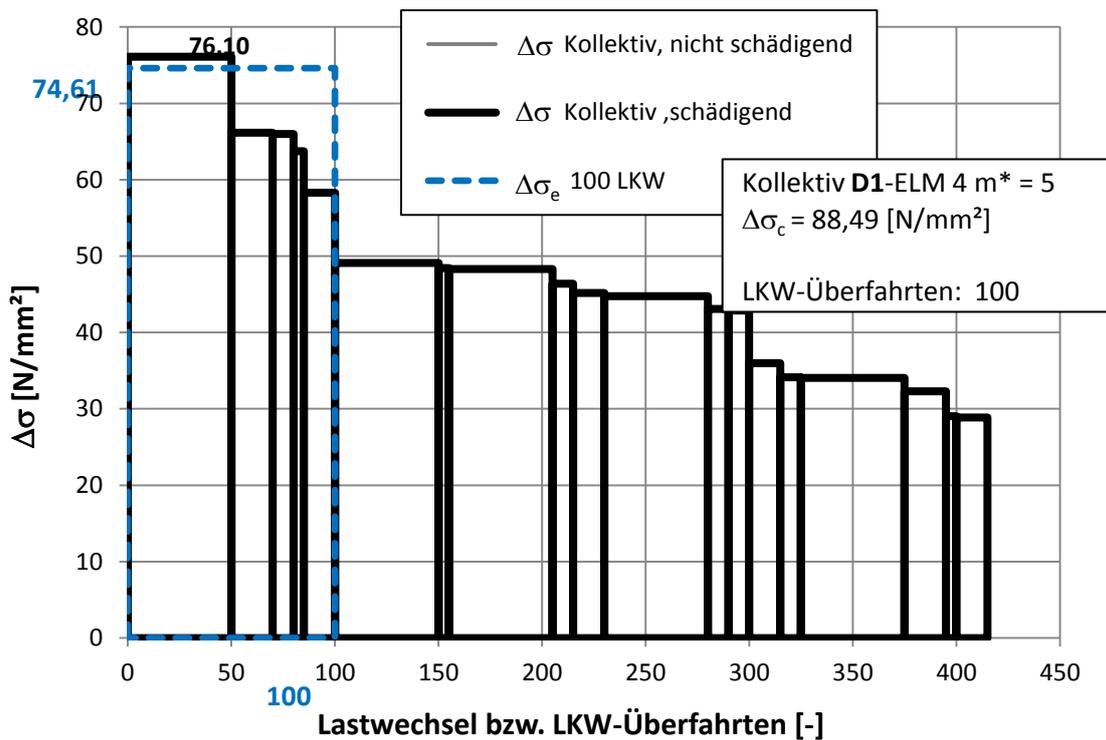


Abbildung 227: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4 m* = 5

C.4.5.2 Detail D1 - Lastkollektive aus ELM 4_mod

In den Abbildungen 228 bis 234 folgt die Darstellung der Lastkollektive für die nach Abbildung 25 untersuchten 5 Lastniveaus, sowie der 2 Grenzfälle $m^* = 3$ und $m^* = 5$ (siehe Abschnitt 4).

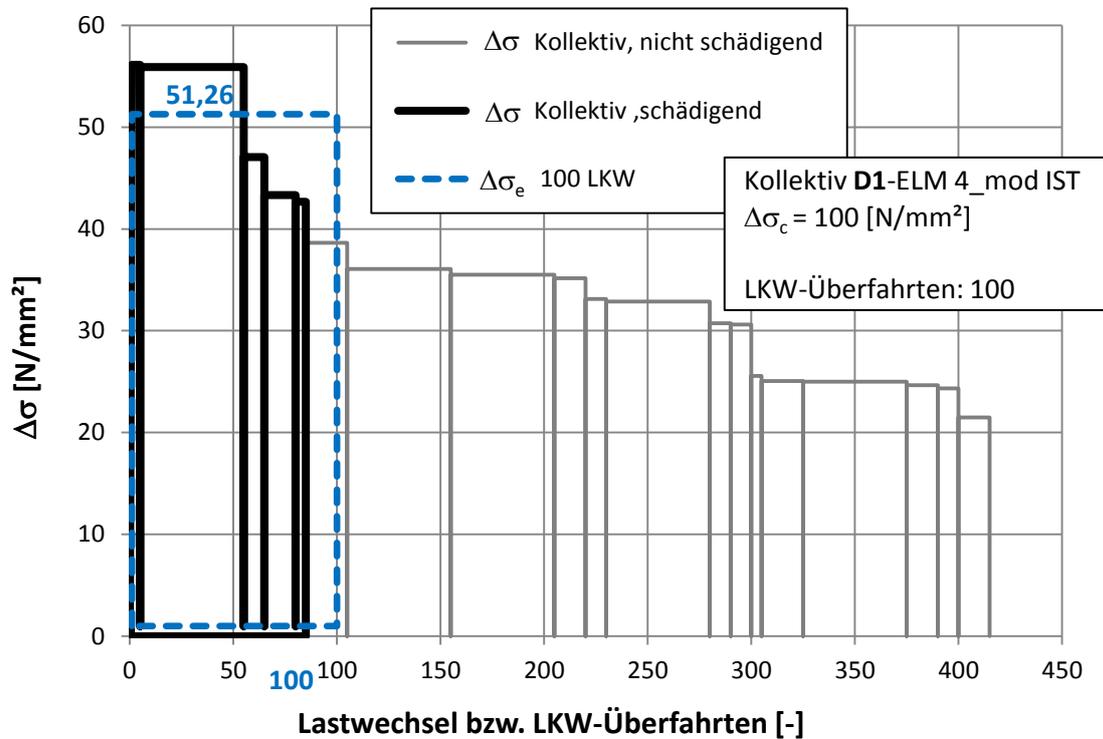


Abbildung 228: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod IST

Beim Lastkollektiv in Abbildung 228 für Detail D1 mit der Beanspruchung aus dem Ermüdungslastmodell 4_mod kommt es im Vergleich zum Ermüdungslastmodell 4 aufgrund der geringeren Achslasten nur mehr zu fünf schädigenden Kollektivteilen. Bei einer Verminderung der Kollektivteile um 20% sind nur mehr zwei Anteile schädigend und bei einer Verminderung um 50% ist auch hier kein schädigender Kollektivteil mehr vorhanden (siehe Abbildungen 230 und 232).

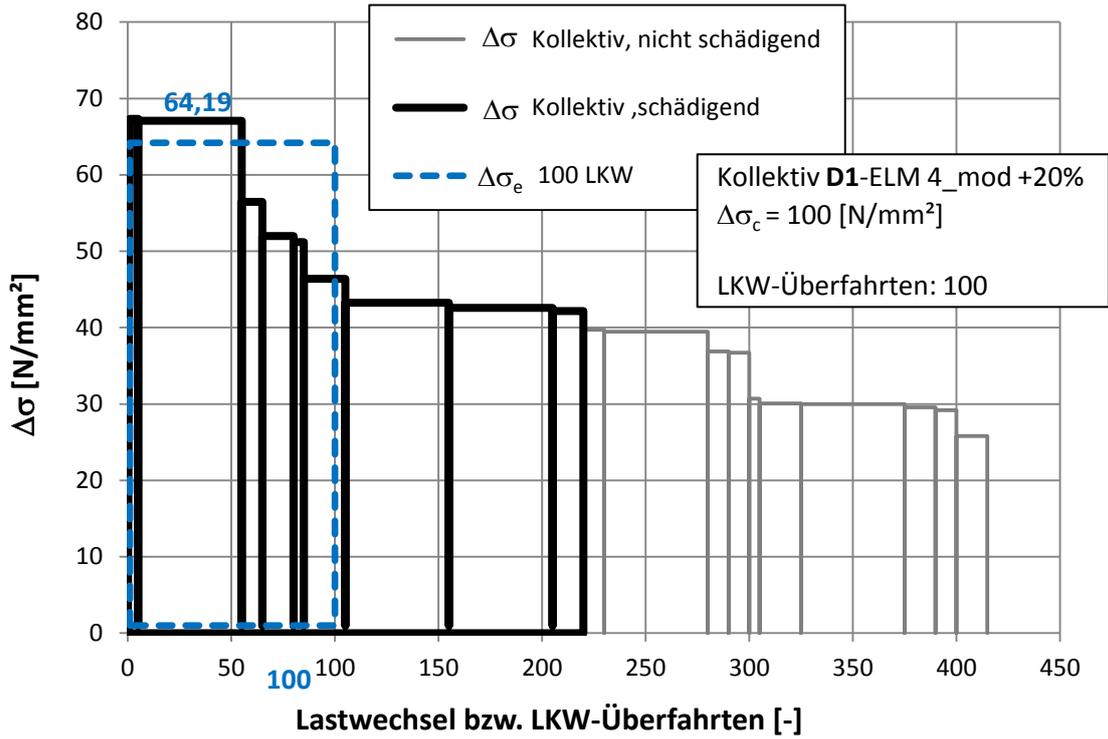


Abbildung 229: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod +20%

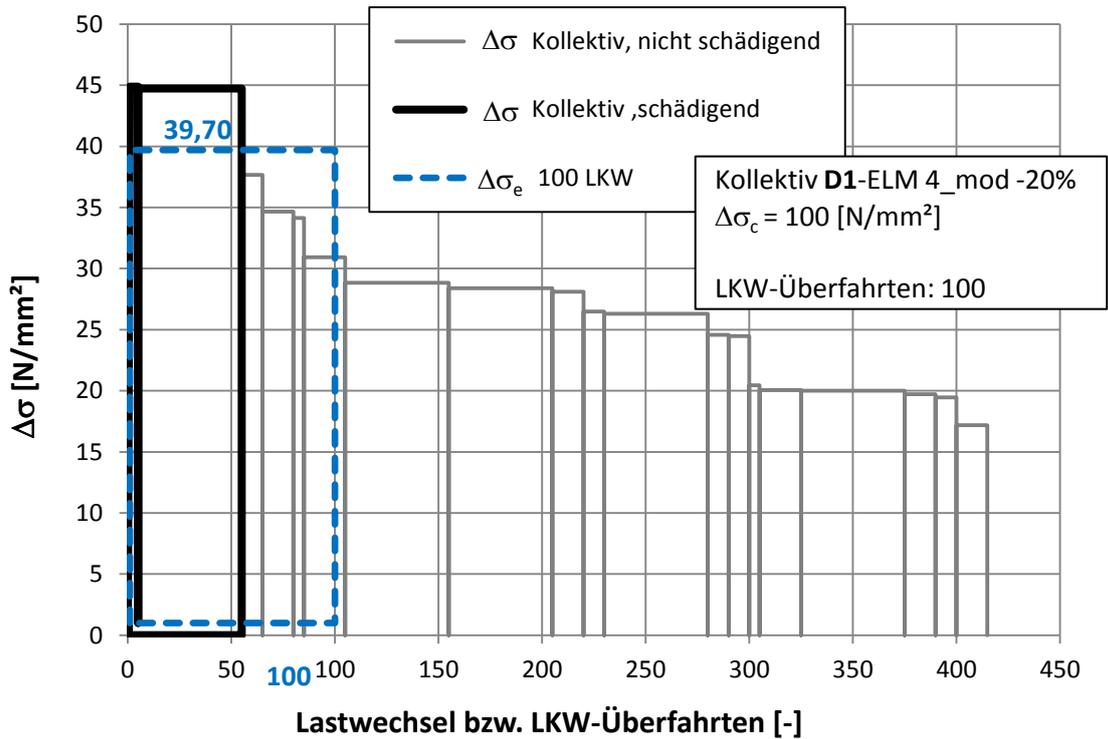


Abbildung 230: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod -20%

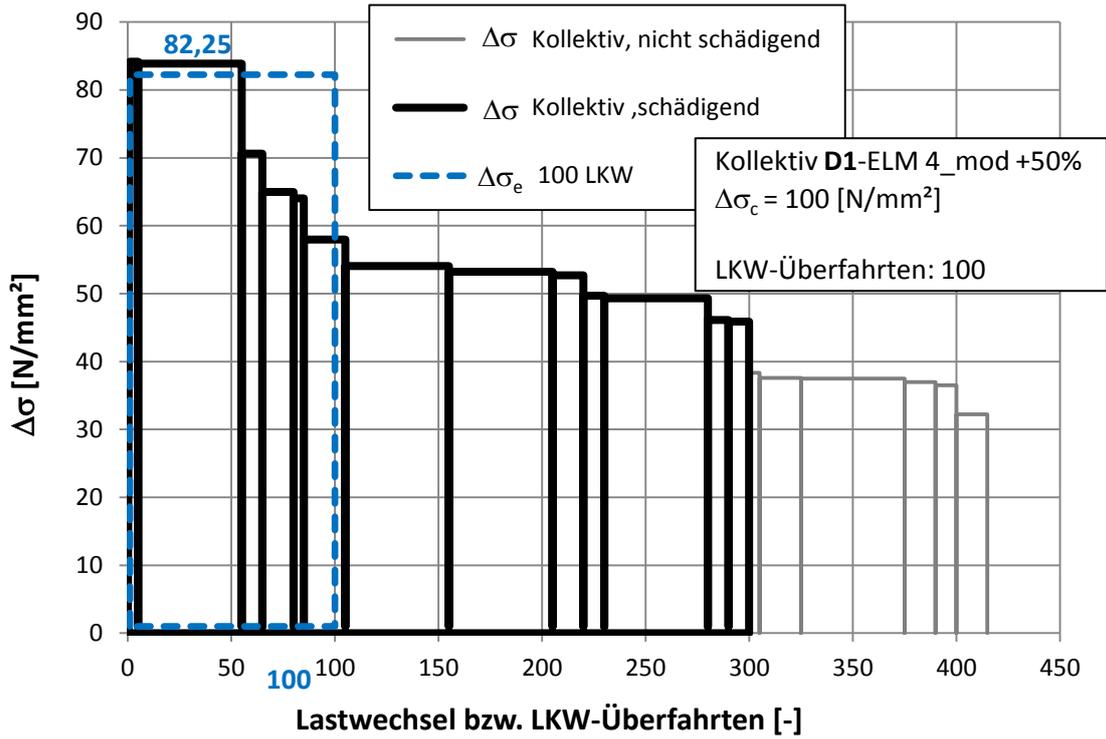


Abbildung 231: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod +50%

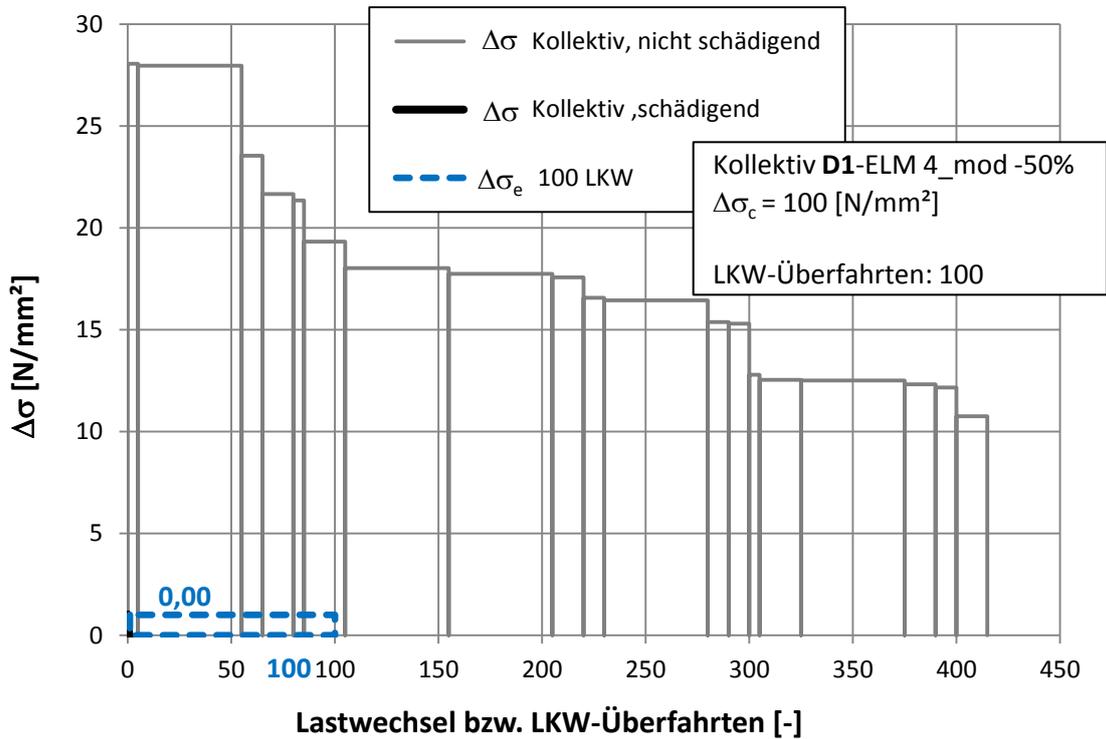


Abbildung 232: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod -50%

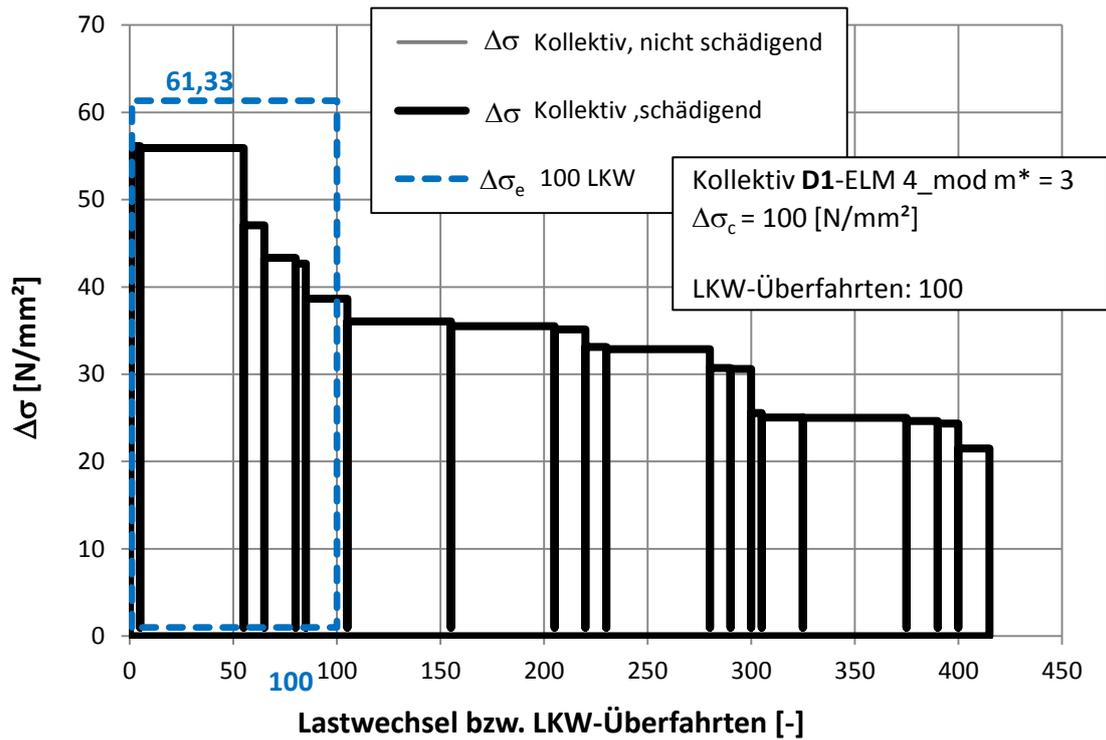


Abbildung 233: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod $m^* = 3$

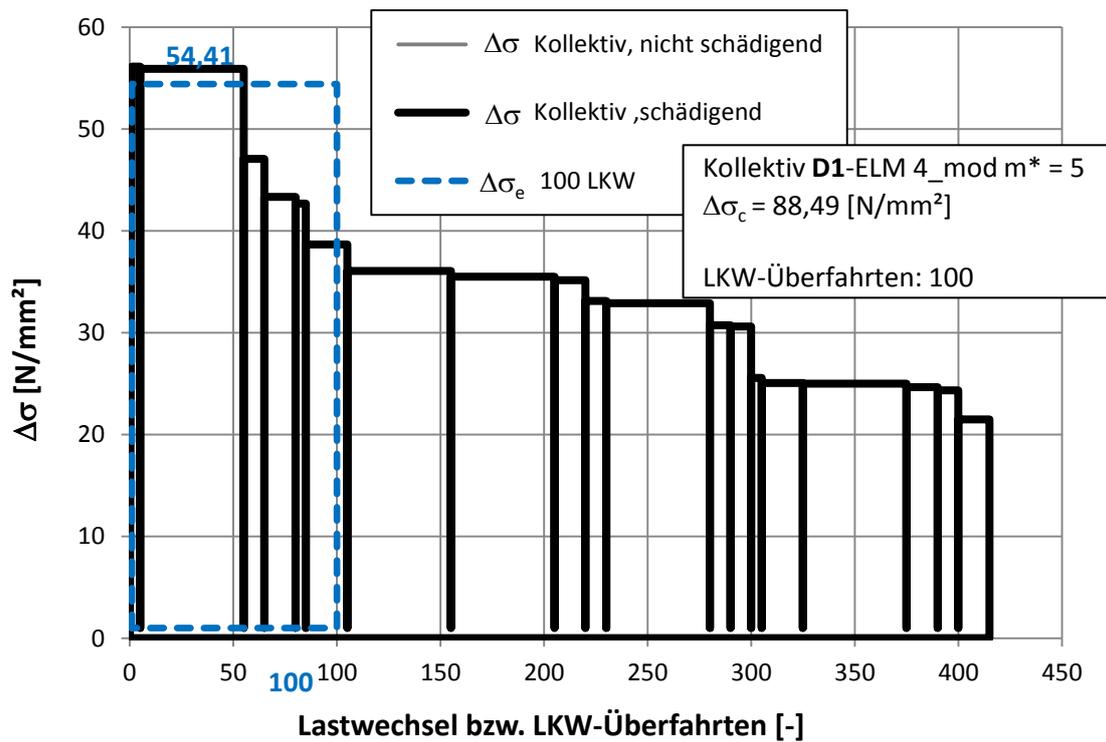


Abbildung 234: Detail D1 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod $m^* = 5$

C.4.5.3 Detail D2 - Lastkollektive aus ELM 4

In den Abbildungen 235 bis 241 folgt die Darstellung der Lastkollektive für die nach Abbildung 25 untersuchten 5 Lastniveaus, sowie der 2 Grenzfälle $m^* = 3$ und $m^* = 5$ (siehe Abschnitt 4).

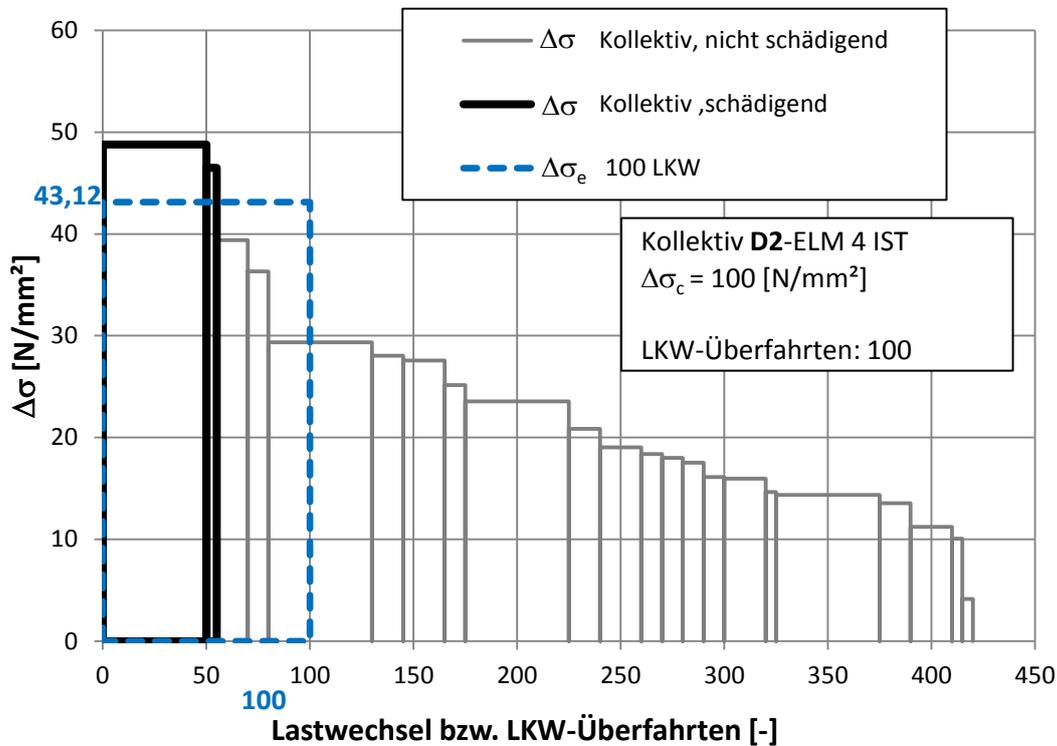


Abbildung 235: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4 IST

Im Gegensatz zu den Lastkollektiven des Detailpunktes D1 ergibt bei Detail D2 bereits eine Ermittlung der Kollektivteile in Abbildung 235 mit Ermüdungslastmodell 4, dass die Spannungsschwingbreiten hier wesentlich kleiner sind und aufgrund dessen nur zwei Kollektivteile schädigend wirken. Bereits eine Verminderung der Kollektivteile um 20% führt dazu, dass keine schädigende Wirkung mehr vorhanden ist (siehe Abbildung 237). Selbst bei einer Erhöhung um 50% sind nur etwa die Hälfte der Kollektivteile schadenswirksam (siehe Abbildung 238).

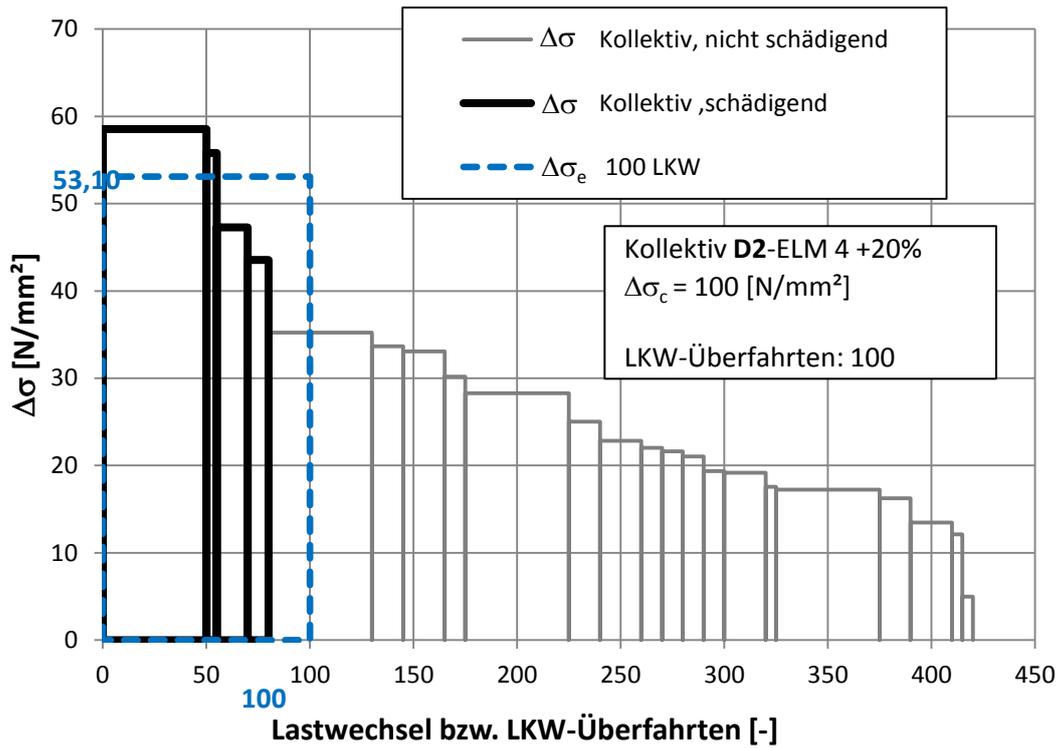


Abbildung 236: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4 +20%

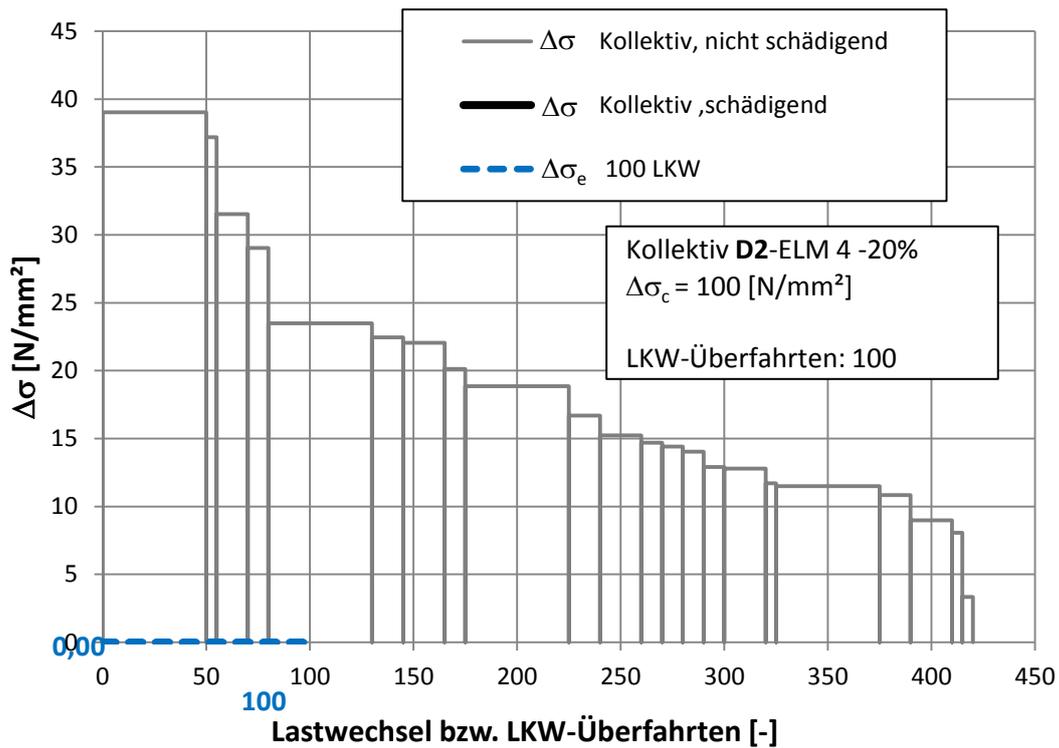


Abbildung 237: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4 -20%

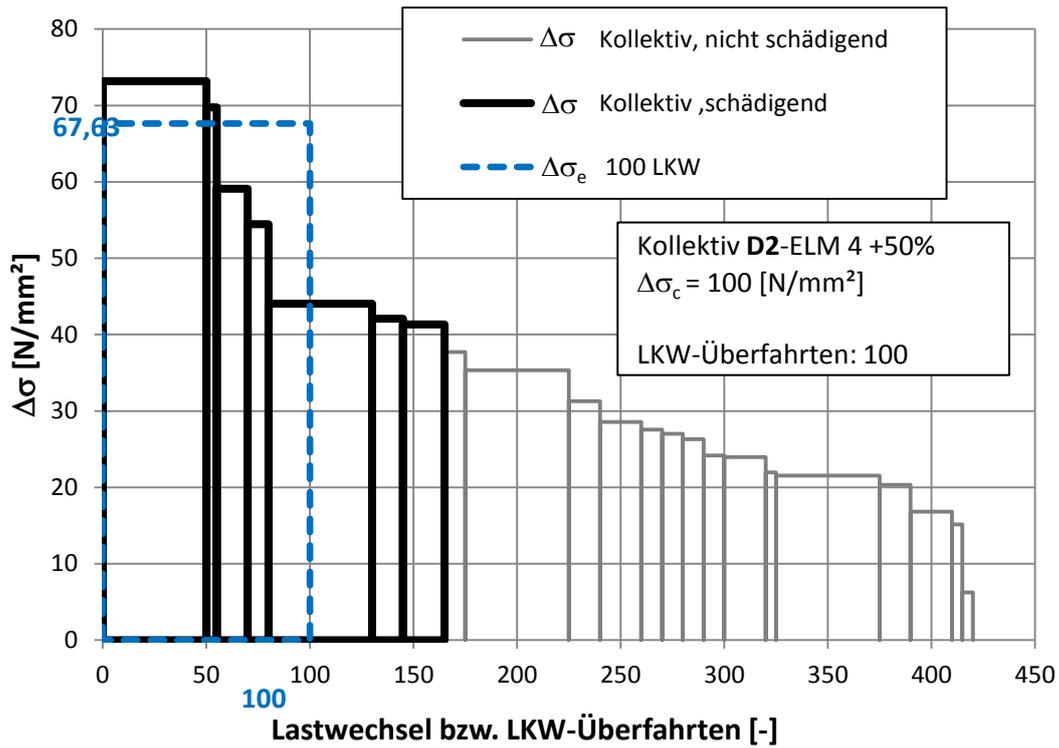


Abbildung 238: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4 +50%

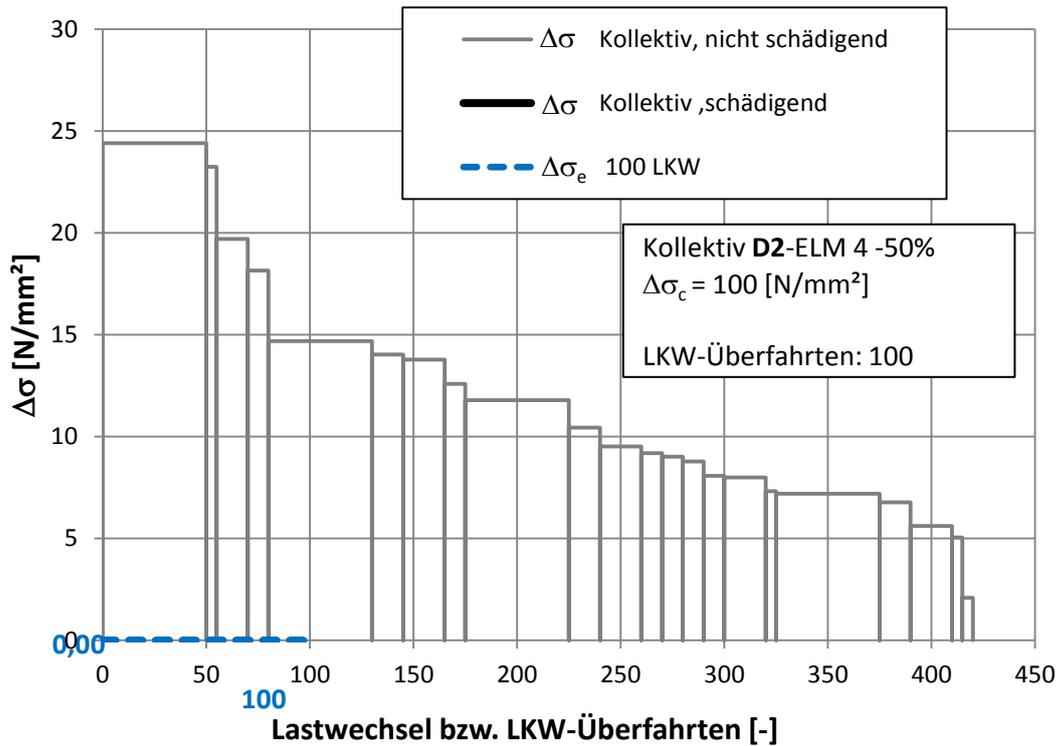


Abbildung 239: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4 -50%

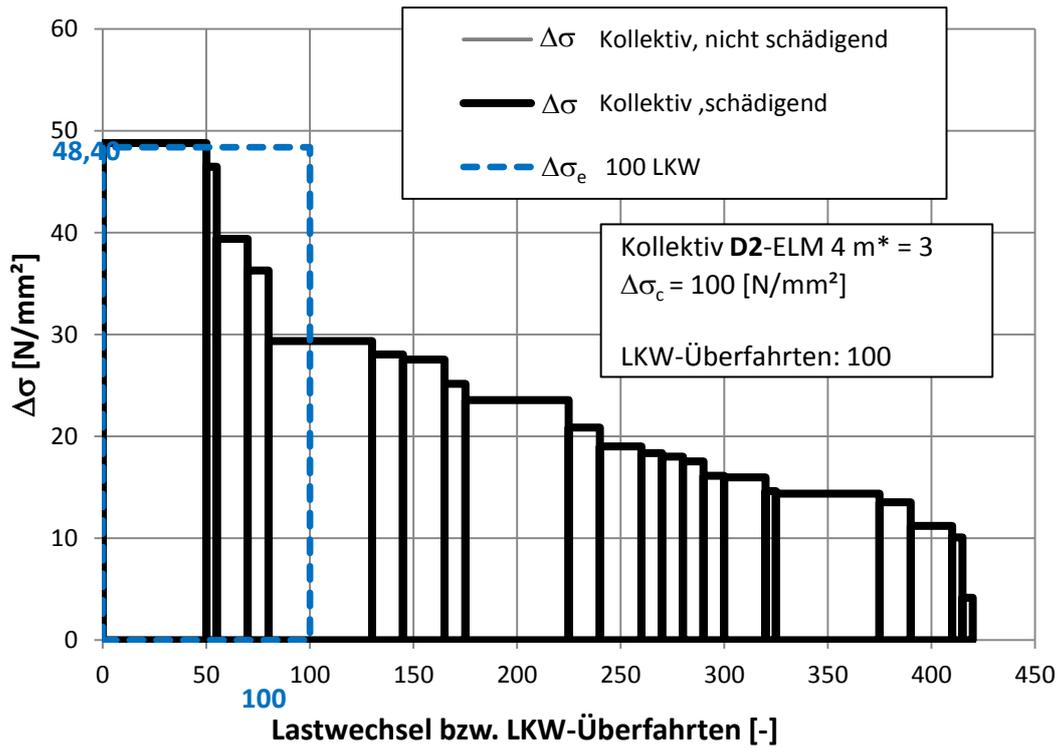


Abbildung 240: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4 m* = 3

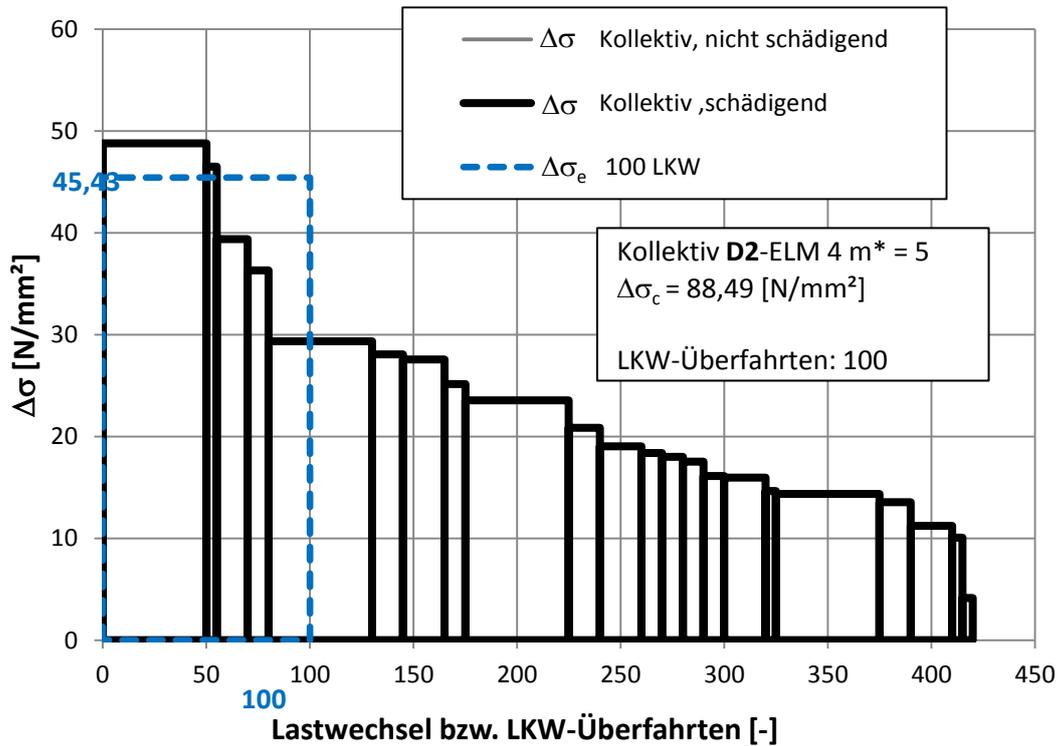


Abbildung 241: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4 m* = 5

C.4.5.4 Detail D2 - Lastkollektive aus ELM 4_mod

In den Abbildungen 242 bis 248 folgt die Darstellung der Lastkollektive für die nach Abbildung 25 untersuchten 5 Lastniveaus, sowie der 2 Grenzfälle $m^* = 3$ und $m^* = 5$ (siehe Abschnitt 4).

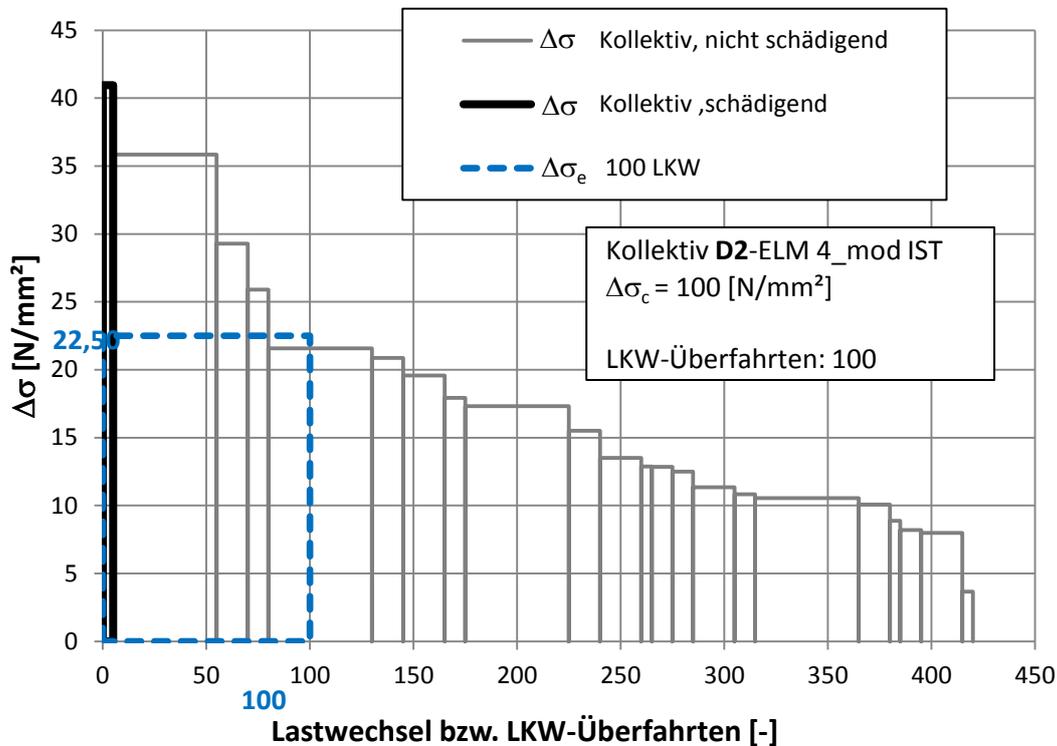


Abbildung 242: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod IST

Bei dem Lastkollektiv in Abbildung 242 für Detailpunkt D2 aus dem modifizierten Ermüdungslastmodell 4_mod kommt es aufgrund der geringeren Achslasten zu noch kleineren Spannungsschwingbreiten. Dadurch hat das Kollektiv nur mehr einen schädigenden Anteil. Selbst bei einer Erhöhung der Kollektivteile um 50% haben nur drei Teile eine schädigende Wirkung (siehe Abbildung 245). Eine Verminderung um 20% oder 50% haben zur Folge, dass keine Kollektivteile mehr schädigend wirken (siehe Abbildungen 244 und 246).

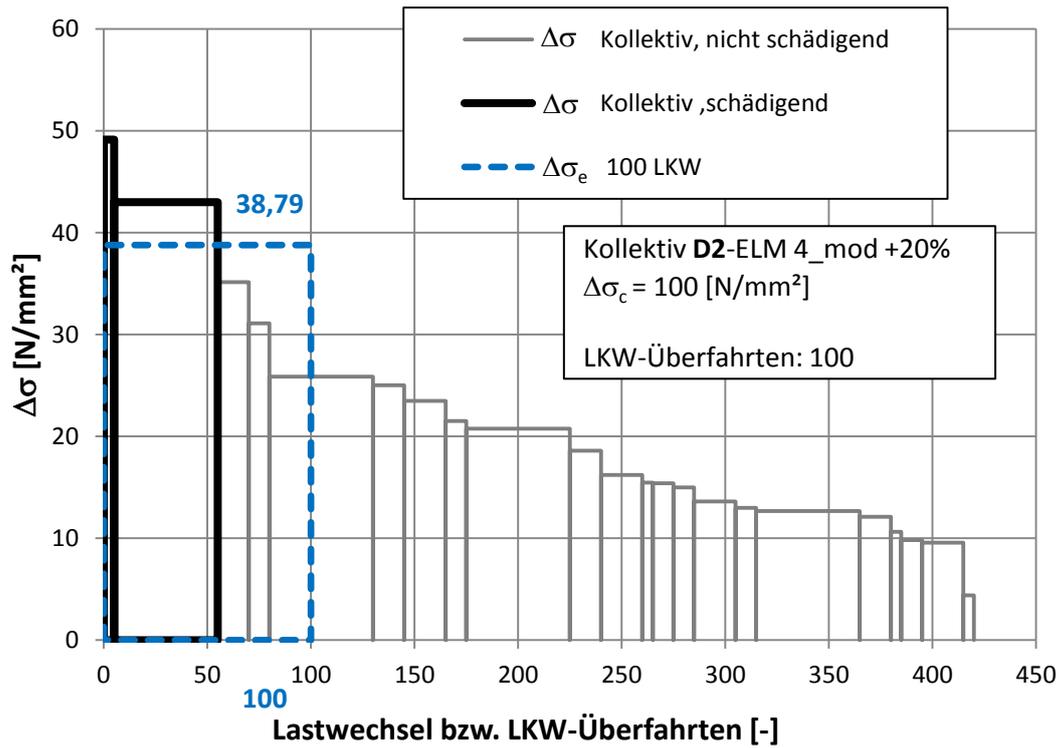


Abbildung 243: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod +20%

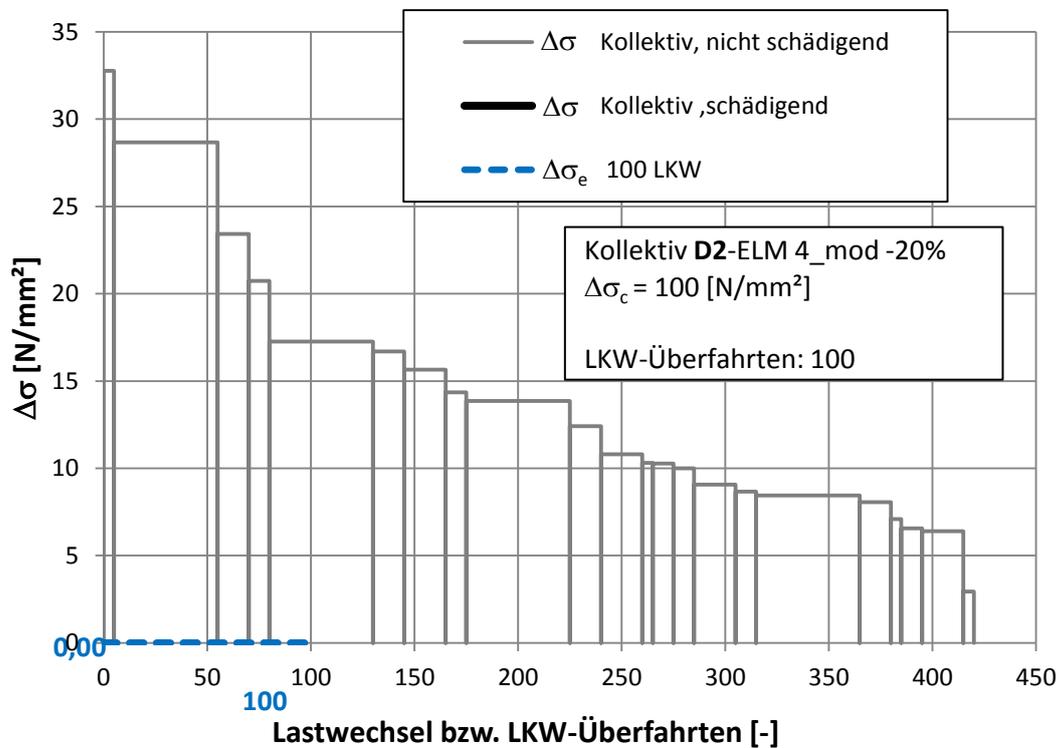


Abbildung 244: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod -20%

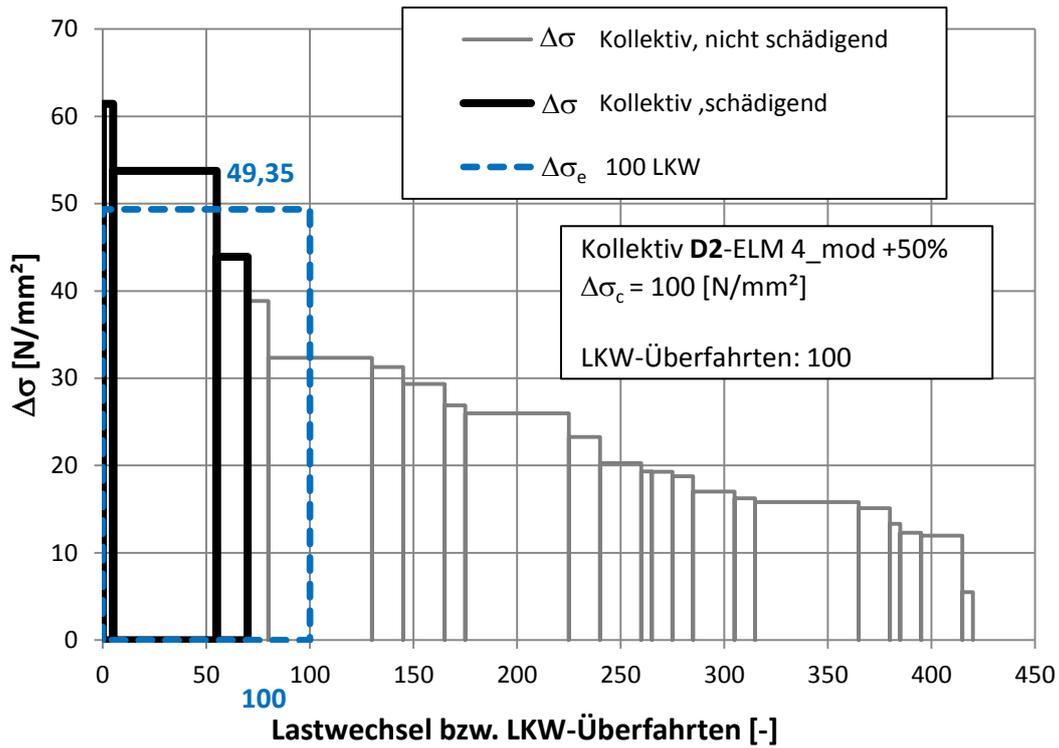


Abbildung 245: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod +50%

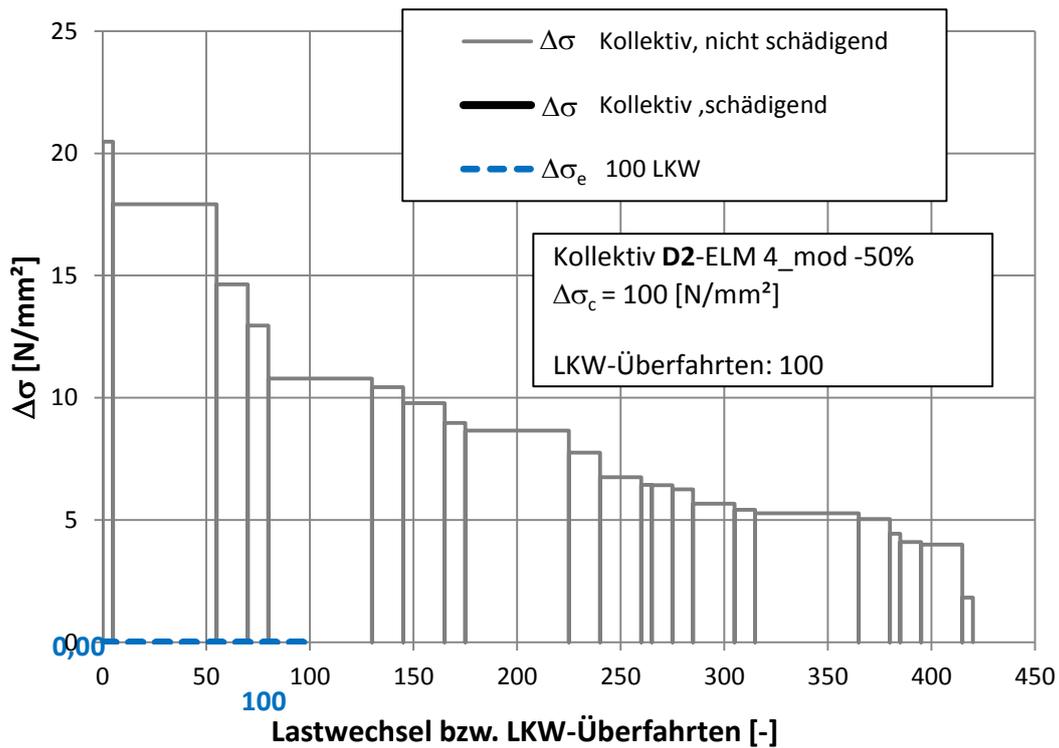


Abbildung 246: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod -50%

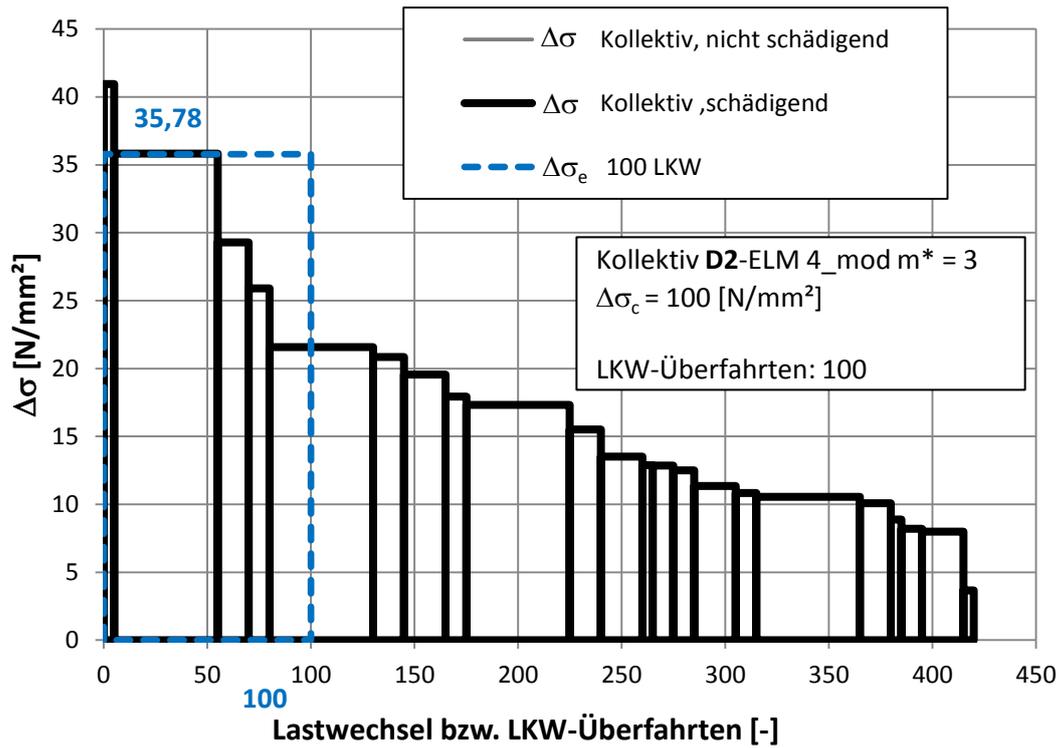


Abbildung 247: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod $m^* = 3$

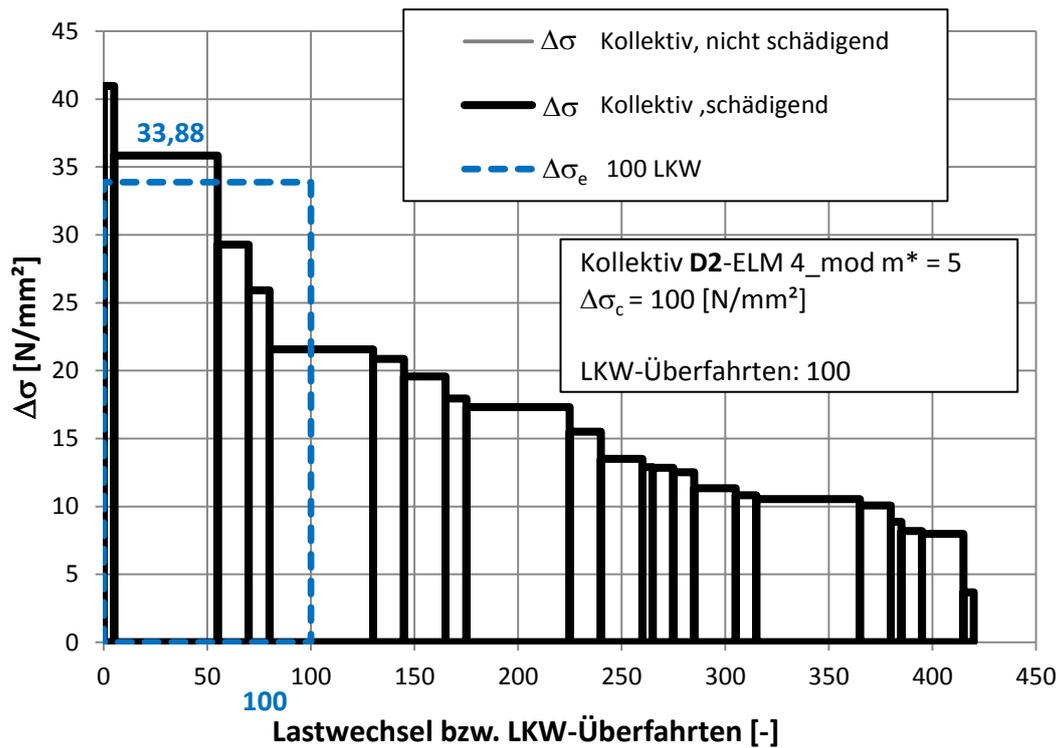


Abbildung 248: Detail D2 - Lastkollektiv aus ELM 4_mod $m^* = 5$

C.5 Beiwerte λ_1

Mit den ermittelten Lastkollektiven wurden nach Kapitel 4 die unterschiedlichen Beiwerte λ_1 für die Ermüdungslastmodelle ELM 4 und ELM 4_mod berechnet. Die Ergebnisse sind im Folgenden in den Abbildungen 249 bis 252 dargestellt. Der Lastfaktor $f_{Last} = \frac{\Delta\sigma_{ELM3}}{\Delta\sigma_c}$ gibt dabei das jeweilige Verhältnis der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{ELM3}$ zum Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c$ an.

C.5.1 Detail D1 – ermittelte Beiwerte λ_1

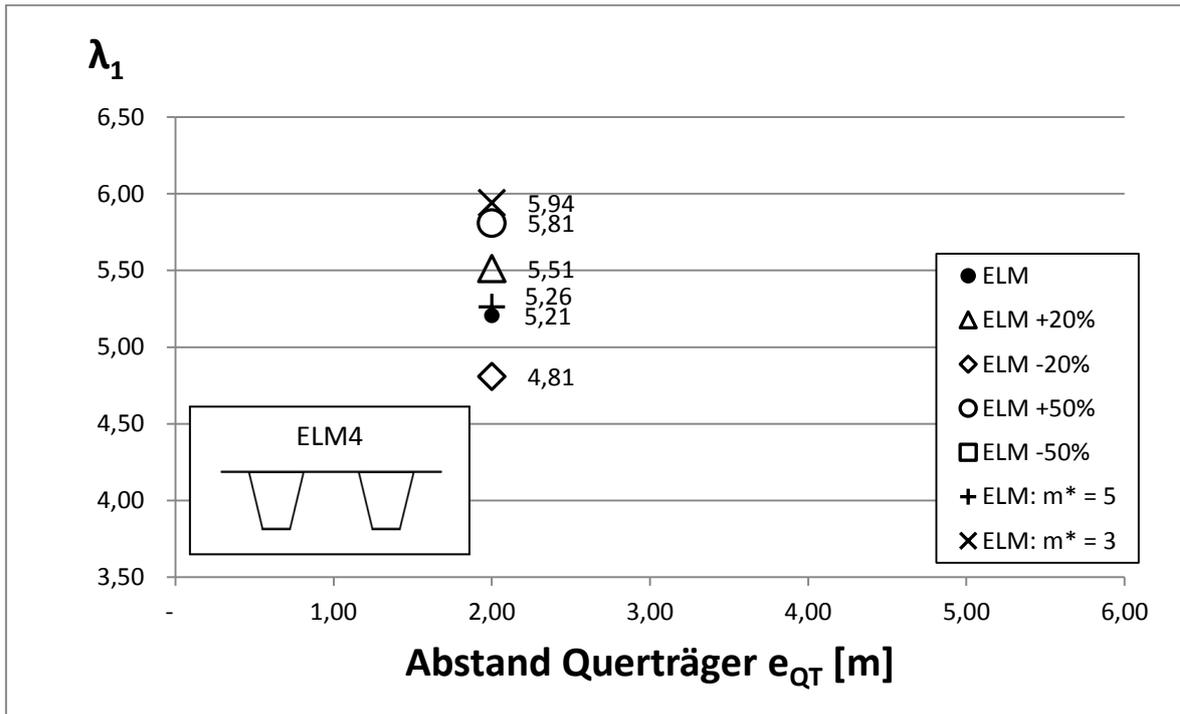


Abbildung 249: Detail D1_Beiwerte λ_1 – orthotrope Platte mit geschlossenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM4

ELM 4 - $e_{QT} = 2 \text{ [m]}$		
Bezeichnung	Lastfaktor f_{Last}	λ_1
ELM	0,49	5,21
ELM +20%	0,59	5,51
ELM -20%	0,41	4,81
ELM +50%	0,74	5,81
ELM -50%	0,33	-
ELM: $m^* = 5$	0,55	5,26
ELM: $m^* = 3$	0,49	5,94

Tabelle 83: Detail D1_Beiwerte λ_1 – orthotrope Platte mit geschlossenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM 4

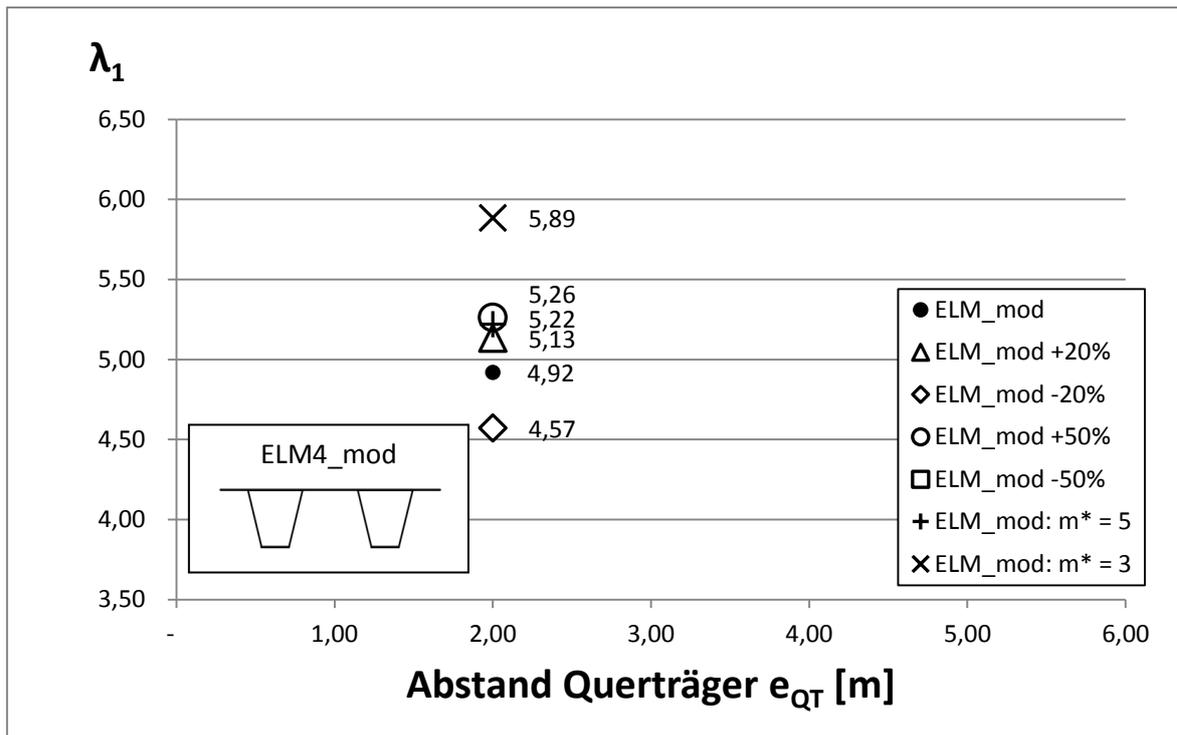
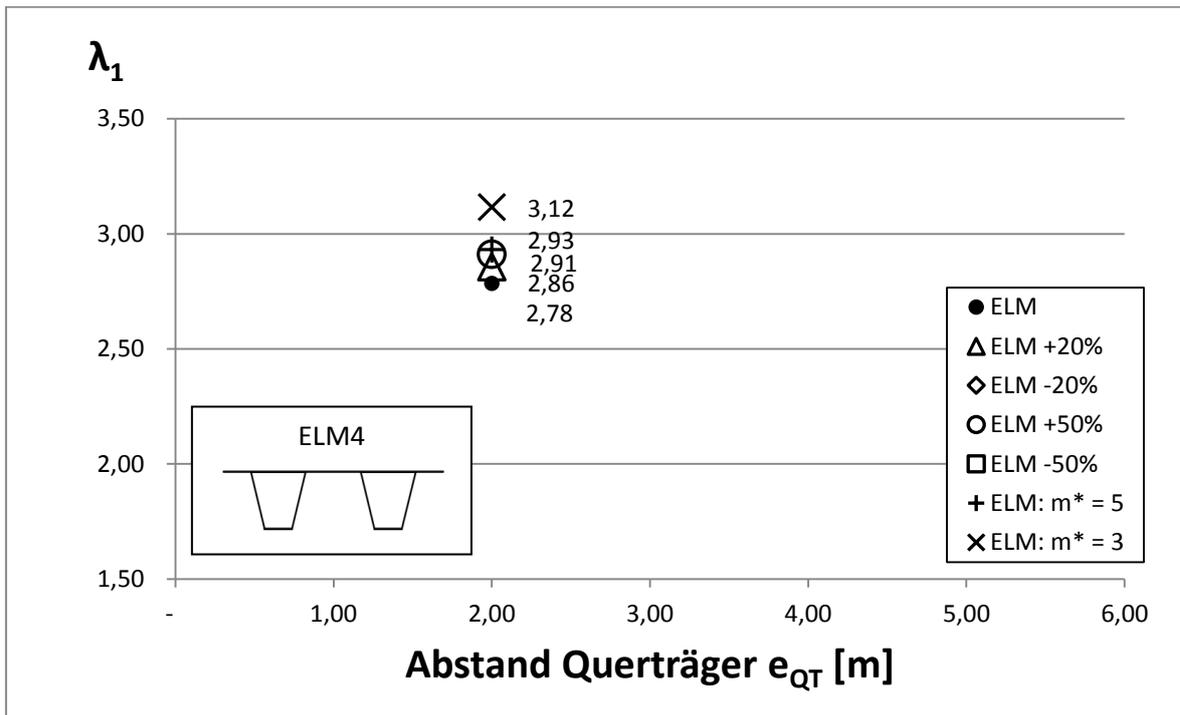


Abbildung 250: Detail D1_Beiwerte λ_1 – orthotrope Platte mit geschlossenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM4_mod

ELM 4_mod - $e_{QT} = 2 \text{ [m]}$		
Bezeichnung	Lastfaktor f_{Last}	λ_1
ELM_mod	0,49	4,92
ELM_mod +20%	0,59	5,13
ELM_mod -20%	0,41	4,57
ELM_mod +50%	0,74	5,26
ELM_mod -50%	0,33	-
ELM_mod: $m^* = 5$	0,55	5,22
ELM_mod: $m^* = 3$	0,49	5,89

Tabelle 84: Detail D1_Beiwerte λ_1 – orthotrope Platte mit geschlossenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM 4_mod

Für Detail D1 ergeben sich, wie in den anderen Modellen, mit Ermüdungslastmodell 4 und 4_mod jeweils für den gleichen Lastfaktor geringfügig unterschiedliche Beiwerte λ_1 , da sich das verwendete Ermüdungslastmodell für die Simulation ändert, das Spannungsschwingspiel $\Delta\sigma_{ELM3}$ aber gleich bleibt, wobei dies auf das Detail D1 kaum einen Einfluss hat, da sich die Lastkollektive der einzelnen Ermüdungslastmodelle sehr ähneln und desto größer diese Ähnlichkeit in ihrer schädigenden Wirkung ist, umso näher liegen ihre λ_1 -Werte beieinander (siehe Abbildungen 249 und 249). Die Differenz der Werte zwischen ELM 4 und ELM 4_mod liegt bei ca. 5% (siehe Tabellen 83 und 84).

C.5.2 Detail D2 – ermittelte Beiwerte λ_1

 Abbildung 251: Detail D2_Beiwerte λ_1 – orthotrope Platte mit geschlossenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM4

ELM 4 - $e_{QT} = 2 \text{ [m]}$		
Bezeichnung	Lastfaktor f_{Last}	λ_1
ELM	0,54	2,78
ELM +20%	0,64	2,86
ELM -20%	0,45	-
ELM +50%	0,80	2,91
ELM -50%	0,36	-
ELM: $m^* = 5$	0,60	2,93
ELM: $m^* = 3$	0,54	3,12

 Tabelle 85: Detail D2_Beiwerte λ_1 – orthotrope Platte mit geschlossenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM 4

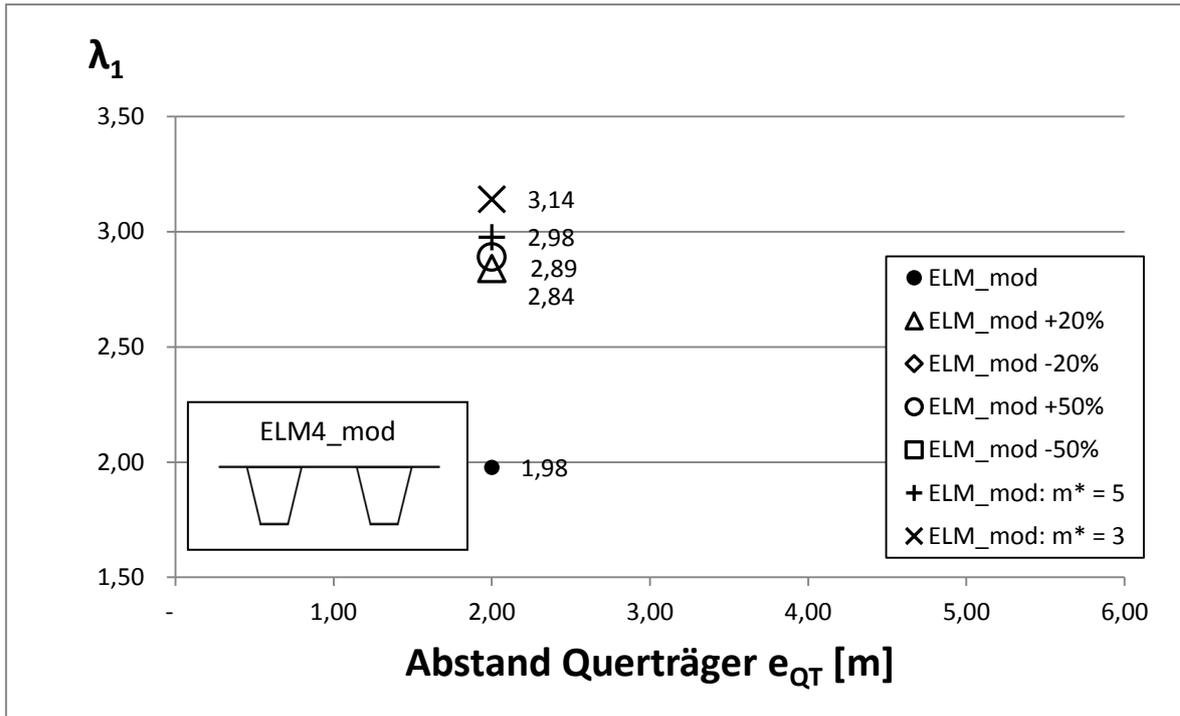


Abbildung 252: Detail D2_Beiwerte λ_1 – orthotrope Platte mit geschlossenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM4_mod

ELM 4_mod - $e_{QT} = 2 \text{ [m]}$		
Bezeichnung	Lastfaktor f_{Last}	λ_1
ELM_mod	0,54	1,98
ELM_mod +20%	0,64	2,84
ELM_mod -20%	0,45	-
ELM_mod +50%	0,80	2,89
ELM_mod -50%	0,36	-
ELM_mod: $m^* = 5$	0,60	2,98
ELM_mod: $m^* = 3$	0,54	3,14

Tabelle 86: Detail D2_Beiwerte λ_1 – orthotrope Platte mit geschlossenen Längsrippen und dem Lastmodell ELM 4_mod

Für Detail D2 ergibt sich der größte Unterschied zwischen Ermüdungslastmodell 4 und 4_mod beim Beiwert λ_1 für das Ausgangskollektiv (ELM und ELM_mod). Die Abweichung liegt hier bei fast 30% (siehe Abbildungen 251 und 252). Dies resultiert allerdings aus dem Lastkollektiv des Ermüdungslastmodells 4_mod, welches nur einen kleinen schädigenden Kollektivteil enthält (siehe Abbildung 242). Aufgrund der Ähnlichkeit der übrigen um 20% bzw. 50% erhöhten bzw. verringerten Kollektive ergeben sich hier für die beiden Lastmodelle fast idente Werte. Die Schädigung aus ihnen ist wie erkennbar so niedrig, dass sich für eine Kollektivverminderung von 20% bzw. 50% kein λ_1 -Wert mehr berechnen lässt. (siehe Tabellen 85 und 86)

D Ermüdungslastmodelle

In diesem Abschnitt sind die in den Berechnungsmodellen verwendeten Ermüdungslastmodelle nach EN 1993-1-1 und [6] erklärt.

D.1 Ermüdungslastmodell 3 (Einzelfahrzeugmodell)

Mit diesem Ermüdungslastmodell 3 wird die Überfahrt eines fiktiven Fahrzeugs bestehend aus vier identen Achsen mit je zwei identischen Rädern am modellierten Brückendeck simuliert, wie in Abbildung 253 dargestellt.

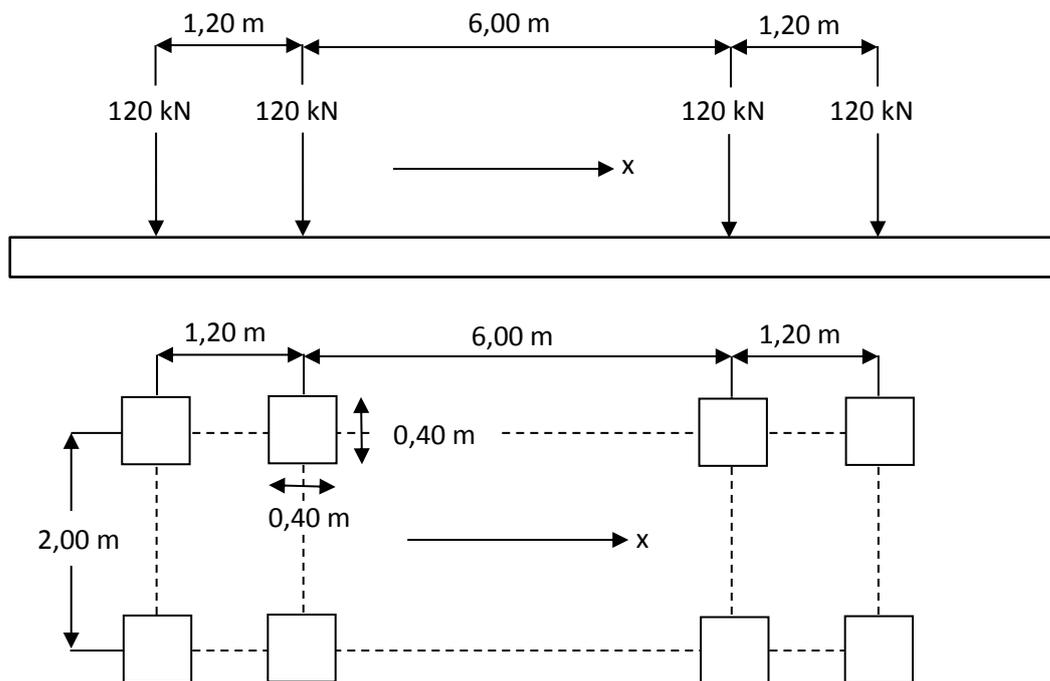


Abbildung 253: Ermüdungslastmodell 3 [9]

Die Achslasten betragen jeweils 120 kN und die Radaufstandsfläche beträgt jeweils $0,4 \times 0,4 \text{ m}^2$. Die Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_p$ aus der Überfahrt des Ermüdungslastmodells 3 am Brückentragwerk wird nach EN 1993-2, Abschnitt 9.4.1 (3) mit

$$\Delta\sigma_p = \Delta\sigma_{ELM3} = |\Delta\sigma_{max} - \Delta\sigma_{min}| \quad \{1\}$$

berechnet (siehe Abbildung 254).

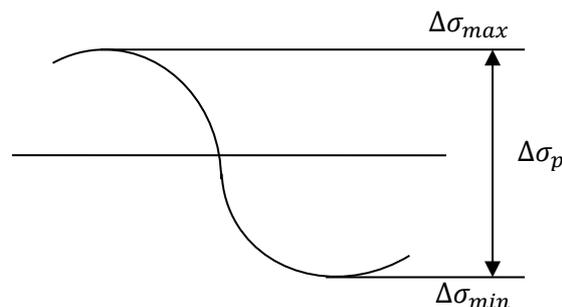


Abbildung 254: Ermittlung der Spannungsschwingbreite aus der Überfahrt von ELM 3

D.2 Ermüdungslastmodell 4

Das Ermüdungslastmodell 4 beinhaltet eine Gruppe von Standardlastkraftwagen, welche Einwirkungen wie auf typischen europäischen Straßen entstehen lassen. In diesem Abschnitt sind die Fahrzeugtypen und deren Radaufstandsflächen für das Ermüdungslastmodell 4 (siehe Tabelle 87) nach EN 1991-2, Abschnitt 4.6.5 sowie ein modifiziertes Ermüdungslastmodell 4 (siehe Tabelle 88) nach [6], welches an die österreichischen Verhältnisse aus "Weigh in Motion"-Messungen angepasst wurde, dargestellt. Der Schwerverkehrsanteil entspricht jenem für große Entfernungen.

D.2.1 Ermüdungslastmodell 4 (Gruppe von "Standardlastkraftwagen")

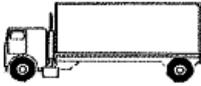
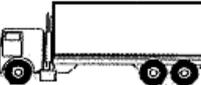
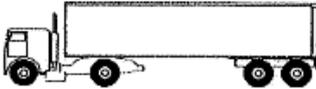
Typ	Schwerfahrzeug	Achsabstand [m]	Achslast [kN]	Schwerverkehrsanteil [%]	Reifenart
T1		4,5	70 130	20	A B
T2		4,20 1,30	70 120 120	5	A B B
T3		3,20 5,20 1,30 1,30	70 150 90 90 90	50	A B C C C
T4		3,40 6,00 1,80	70 140 90 90	15	A B B B
T5		4,80 3,60 4,40 1,30	70 130 90 80 80	10	A B C C C

Tabelle 87: Ermüdungslastmodell ELM 4 nach EN 1991-2, Abschnitt 4.6.5, Tabelle 4.7

D.2.2 Ermüdungslastmodell 4_mod

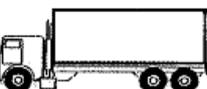
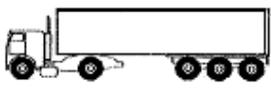
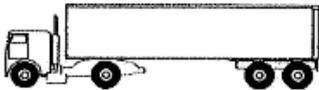
Typ	Schwerfahrzeug	Achsabstand [m]	Achslast [kN]	Schwerverkehrsanteil [%]	Reifenart
T1		4,5	49,7 92,3	20	A B
T2		4,20 1,30	61,6 105,7 105,7	5	A B B
T3		3,20 5,20 1,30 1,30	51,4 110,2 66,1 66,1 66,1	50	A B C C C
T4		3,40 6,00 1,80	52,1 104,1 66,9 66,9	15	A B B B
T5		4,80 3,60 4,40 1,30	49,9 92,7 64,2 57,1 57,1	10	A B C C C

Tabelle 88: Modifiziertes Ermüdungslastmodell ELM 4_mod nach [6]

D.2.3 Definition der Reifenarten/Achsabstände

Tabelle 89 zeigt die geometrischen Abmessungen der Radaufstandsflächen nach EN 1991-2, welche in den Tabellen 87 und 88 als Reifenart angeführt sind.

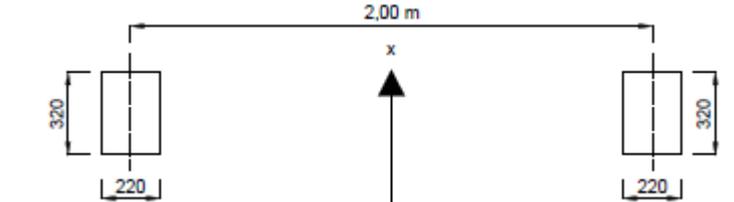
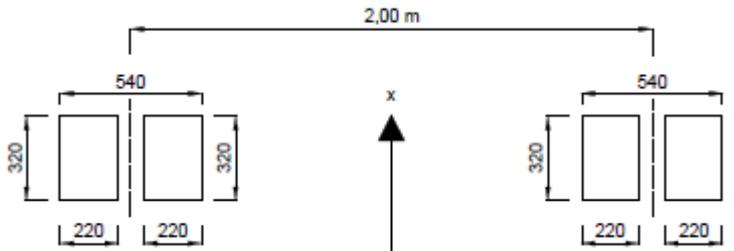
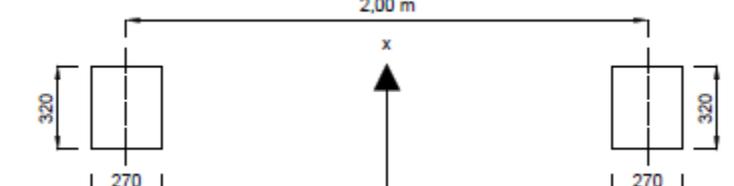
Reifen/Achsart	Geometrische Abmessungen
A	
B	
C	

Tabelle 89: Definition der Reifenarten nach EN 1991-2, Abschnitt 4.6.5, Tabelle 4-8

D.3 Lastaufstellung unter Berücksichtigung des Fahrbahnbelages

Zur Berücksichtigung eines Asphaltbelages erlaubt die ÖNORM EN 1991-2 in Abschnitt 4.3.6 (3) [9] die Verwendung von verbreiterten Lastaufstandsflächen aufgrund der lastverteilenden Wirkung des Belages unter einem Winkel von 45° .

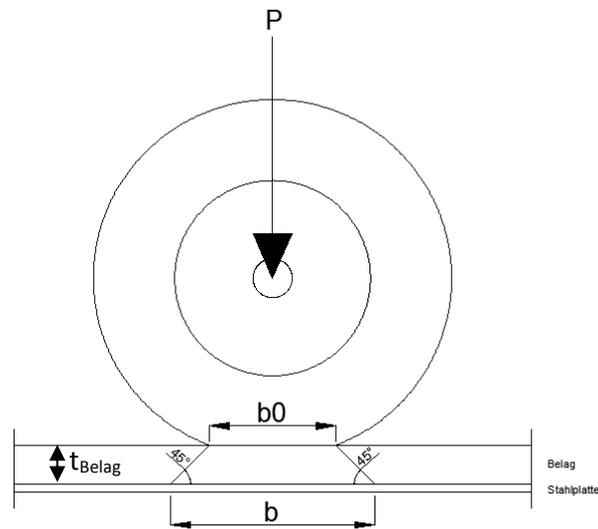


Abbildung 255: Lastausbreitung von Einzellasten durch Belag nach EN 1991-2, Abschnitt 4.3.6 (3)

Somit ergibt sich die anzusetzende Flächenbreite in beiden Richtungen zu $b = b_0 + 2 \cdot t_{\text{Belag}}$

Das Aufbringen der Achs- bzw. Radlasten erfolgt somit für die betrachteten Fahrzeugtypen mit den erweiterten Radaufstandsflächen aus Tabelle 90.

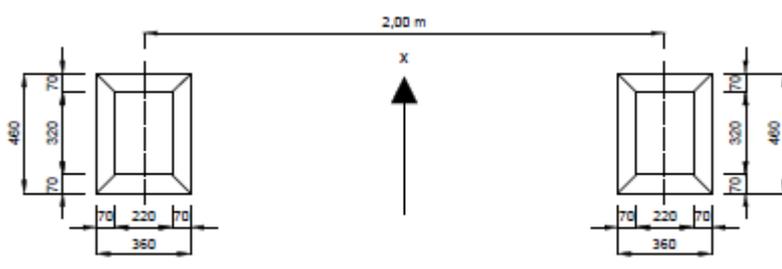
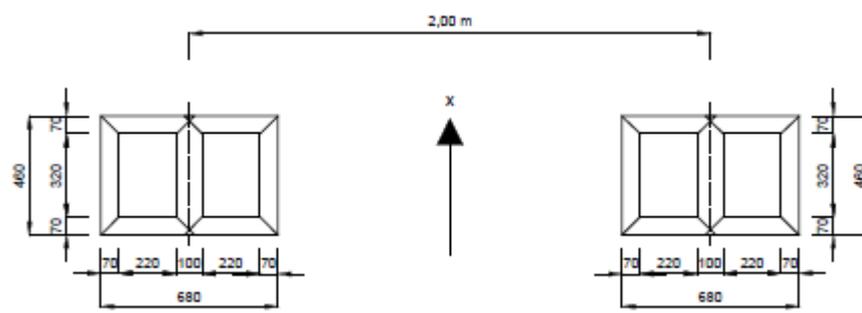
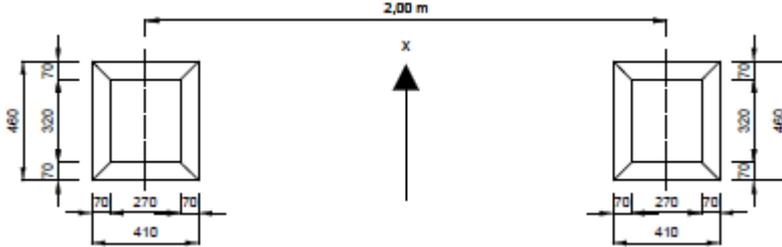
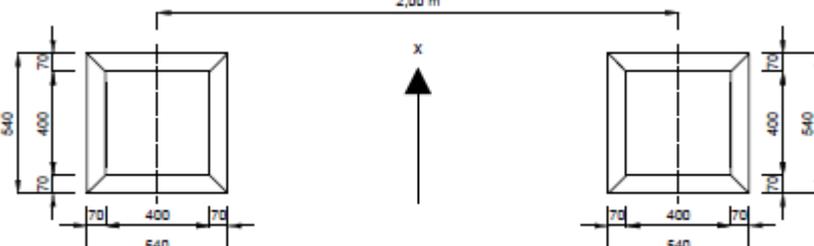
Reifen/Achsart	Geometrische Abmessungen
A	
B	
C	
ELM 3	

Tabelle 90: Definition der verbreiterten Lastaufstandsflächen nach EN 1991-2, Abschnitt 4.6.5, Tabelle 4-8; EN 1991-2, Abschnitt 4.6.4 und EN 1991-2, Abschnitt 4.3.6 (3)

Für alle drei Brückenmodelle wurde die Modellberechnung der Achslasten mit einer Einheitsachslast von 100 kN durchgeführt und in der Auswertung auf die jeweiligen Achslasten umgerechnet. Die angesetzten Flächenlasten je Reifen errechnen sich mit

$$p_i = \frac{P_{\text{Reifen}}}{A_{\text{Reifen}}} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \text{ und } P_{\text{Reifen}} = 50 \text{ kN}$$

zu den in Tabelle 91 ermittelten Flächenlasten p_i

Reifen/Achsart	Fläche A [mm ²]	Flächenlast p_i [N/mm ²]
A	460*360 = 165.600	0,3019
B	460*680 = 312.800	0,1598
C	460*410 = 188.600	0,2651
ELM3	540*540 = 291.600	0,1715

Tabelle 91: Flächenlasten je Reifenart zur Verwendung in den Modellen A, B und C