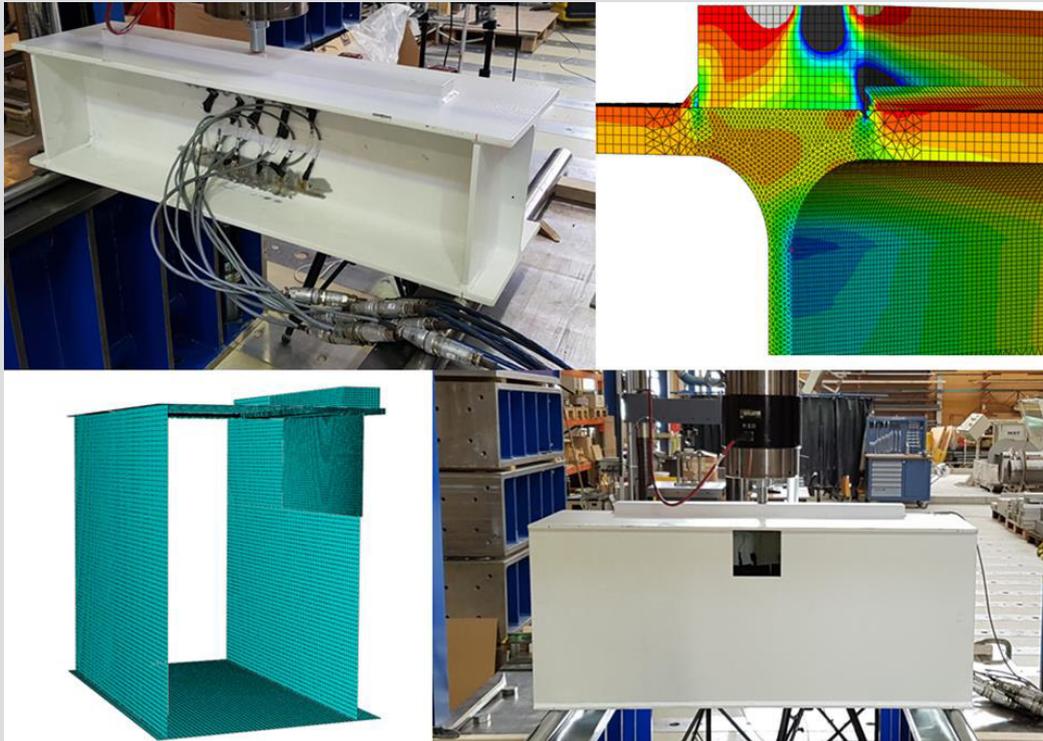


# Lokale Spannungen in Stegen von Kranbahnträgern - Laborversuche und numerische Berechnung



D-5-60/2017

**Andreas Anton Mandl**  
Institut für Stahlbau  
Technische Universität Graz



# **Lokale Spannungen in Stegen von Kranbahnträgern - Laborversuche und numerische Berechnung**

## **Masterarbeit**

verfasst von

**Mandl Andreas Anton**

eingereicht am

**Institut für Stahlbau  
Technische Universität Graz**

Betreuer

**Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Markus Kettler**

**Graz, Juni 2017**

## Eidesstattliche Erklärung

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

Graz, am .....

.....

(Unterschrift)

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich einigen Personen, die mich in meinem Studium begleitet bzw. unterstützt haben, danken.

An erster Stelle möchte ich meinen Eltern danken, weil sie mich jederzeit in meinem Ausbildungsweg unterstützt haben und diesen dadurch möglich gemacht haben. Des Weiteren möchte ich mich bei meiner Partnerin Tanja für die Unterstützung und für die bisherige tolle Zeit bedanken.

Auch meine StudienkollegInnen und FreundInnen, mit denen ich eine unvergessliche Studienzeit verbracht habe, möchte ich an dieser Stelle großen Dank aussprechen. Im Besonderen danke Philipp, für die Unterstützung bei dieser Arbeit und allem anderen.

Zuletzt möchte ich noch meinen Betreuer Herrn Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Markus Kettler für die ausgezeichnete Betreuung dieser Arbeit und dem Stahlbauinstitut der TU Graz unter der Leitung von Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn Harald Unterweger, welches die Räumlichkeiten zum Erstellen dieser Arbeit zur Verfügung gestellt hat, bedanken.

## **Kurzfassung**

Die durch Radlasten entstehenden lokalen Spannungen in Stegen von Kranbahnen können durch Materialermüdung zu Schäden führen. Die Berechnung dieses Problems wird in EN 1993-6 beschrieben. Dort wird bei der Berechnung zwischen einer schubstarrten und einer nicht schubstarrten Verbindung zwischen Schiene und Träger unterschieden. Im Zuge dieser Arbeit, werden die lokalen Spannungen sowohl mittels Versuchen als auch durch Finite Elemente Berechnungen ermittelt und mit dem Eurocode verglichen. Die Versuche werden mit zwei verschiedenen Profilen durchgeführt (HEA 300 und Kastenquerschnitt). Die numerischen Berechnungen umfassen neben den zwei Querschnitten aus den Versuchen auch ein geschweißtes I-Profil und einen weiteren Kastenquerschnitt. Durch zahlreiche Ergebnisvergleiche können die unterschiedlichen Auswirkungen der Schienenbefestigung sowie die der verschiedenen Schientypen (Blockschiene und Type A Schiene) aufgezeigt werden.

## **Abstract**

Wheel loads cause local stresses in the webs of crane runway girders. These stresses generate can lead to material fatigue. In EN 1993-6, the calculation of this problem is described. The calculation distinguishes between rigid or not rigid connections between crane rail and runway beams. In this thesis, these local stresses are determined by experiments on the one hand and numerical finite element calculations on the other hand. Two different cross sections are used for the experiments (HEA 300 and a box cross section). The parametric study comprises four cross sections: the HEA 300, a welded I cross section and two different box cross sections. The effects of the different crane rail connections and types of rails are presented.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG UND ÜBERBLICK.....</b>	<b>1</b>
1.1	Allgemein .....	1
1.2	Problemstellung und Ziel .....	1
1.3	Umfang der Arbeit .....	1
1.3.1	Versuche .....	1
1.3.2	Parameterstudie .....	2
<b>2</b>	<b>KRANBAHNEN.....</b>	<b>3</b>
2.1	Querschnitte von Kranbahnträgern [2][3].....	3
2.2	Schienentypen [2][3].....	3
2.3	Untersuchte Querschnitte.....	4
2.3.1	HEA 300 (Querschnitt 1) .....	4
2.3.2	Geschweißtes I Profil (Querschnitt 2) .....	5
2.3.3	Kastenquerschnitt 1 für Versuch (Querschnitt 3) .....	5
2.3.4	Kastenquerschnitt 2 (Querschnitt 4).....	6
2.4	Bezeichnung der Systeme .....	6
<b>3</b>	<b>BERECHNUNG DER LOKALEN SPANNUNGEN.....</b>	<b>7</b>
3.1	Nach EN 1993-6 Abschnitt 5.7 [1] .....	7
3.1.1	Lokale vertikale Druckspannungen .....	7
3.1.2	Lokale Biegespannungen infolge exzentrischer Radlasten .....	9
3.2	Berechnungsbeispiele nach EN 1993-6 [1] .....	10
3.2.1	Bsp. 1 schubstarr verbundene Schiene.....	10
3.2.2	Bsp. 2 nicht schubstarr verbundene Schiene.....	13
3.3	Berechnung nach Osterrieder und Oxfort [4][8][9][10] .....	15
3.4	Berechnung nach Vögele [5].....	16
<b>4</b>	<b>MODELLBILDUNG DER FE-ANALYSE .....</b>	<b>20</b>
4.1	Modellierung .....	20
4.2	Material.....	21
4.3	Randbedingungen bzw. Interaktionsbedingungen .....	21
4.3.1	Verbindung Schiene und Oberflansch.....	22
4.3.2	Auflagerbedingungen.....	22

4.3.3	Lasten.....	24
<b>4.4</b>	<b>FE Netz .....</b>	<b>25</b>
<b>5</b>	<b>LABORVERSUCHE .....</b>	<b>26</b>
<b>5.1</b>	<b>Umfang der Laborversuche .....</b>	<b>27</b>
<b>5.2</b>	<b>Probekörper 1 - HEA 300 .....</b>	<b>28</b>
<b>5.3</b>	<b>Probekörper 2 Kastenquerschnitt.....</b>	<b>32</b>
<b>5.4</b>	<b>Laststellungen.....</b>	<b>36</b>
<b>5.5</b>	<b>Prüfkörper nach Traglastversuch.....</b>	<b>37</b>
<b>5.6</b>	<b>Vergleich der Ergebnisse mit der FE – Analyse .....</b>	<b>39</b>
5.6.1	Umrechnung der Normspannungen in Dehnungen HEA300.....	39
5.6.2	HEA 300 ohne Schiene, System 1.0.0.....	40
5.6.3	HEA300 mit loser Schiene, System 1.1A.0 .....	42
5.6.4	HEA300 mit aufgeschweißter Blockschiene und Zentrischer Belastung 1.1C.0.....	44
5.6.5	HEA 300 mit aufgeschweißter Blockschiene und exzentrischer Belastung 1.1C.1-5 .....	49
5.6.6	Vergleich der Lasteinleitung mittels FE Berechnung .....	57
5.6.7	Kastenquerschnitt ohne Schiene, System 3.0.0 .....	58
5.6.8	Kastenquerschnitt mit loser Schiene, System 3.1A.0.....	60
5.6.9	Kastenquerschnitt mit aufgeschweißter Blockschiene und zentrischer Belastung, System 3.1C.0.061	
5.6.10	FE-Ergebnisse Lasteinleitungsfall 1 (mit vollflächigem Kontakt) .....	64
5.6.11	Ergebnisse Lasteinleitungsfall 2 (ohne Kontakt).....	66
5.6.12	FE-Ergebnisse Lasteinleitungsfall 3 (mit gleichmäßiger Fuge).....	68
5.6.13	FE-Ergebnisse Lasteinleitungsfall 4 (mit schräger Fuge).....	70
5.6.14	FE Ergebnisse exzentrische Lasteinleitung, Systeme 3.1C.1, 3.1C.2, 3.1C.3, 3.1C.4.....	72
<b>6</b>	<b>PARAMETERSTUDIE MITTELS FE – ANALYSE.....</b>	<b>75</b>
<b>6.1</b>	<b>FE-Analyse HEA 300 (Querschnitt 1) [6] .....</b>	<b>76</b>
6.1.1	System für 1.1D.0, 1.1D.3, 1.1C.0, 1.1C.3, 1.1A.0, 1.1A.3.....	76
6.1.2	Spannungsbilder aus Abaqus [7].....	77
6.1.3	Ergebnisse HEA300 Blockschiene mit starrem Verbund 1.1D.0 bzw. 1.1D.3.....	78
6.1.4	Spannungsverteilung über die Stegdicke.....	79
6.1.5	Ergebnisse HEA300 mit aufgeschweißter Blockschiene 1.1C.0 bzw. 1.1C.3 .....	81
6.1.6	Ergebnisse HEA300 mit lose aufliegender Blockschiene 1.1A.0 bzw. 1.1A.3.....	83
6.1.7	Ergebnisse HEA300 mit A45 Schiene 1.45B.0 bzw. 1.45B.3.....	85
6.1.8	Ergebnisse HEA300 mit A75 Schiene 1.75B.0 bzw. 1.75B.3.....	89
<b>6.2</b>	<b>FE Analyse I-Profil geschweißt (Querschnitt 2)[6] .....</b>	<b>93</b>
6.2.1	System für 2.1D.0, 2.1D.3, 2.1C.0, 2.1C.3, 2.1A.0, 2.1A.3.....	93
6.2.2	Ergebnisse geschw. I Profil Blockschiene mit starrem Verbund 2.1D.0 bzw. 2.1D.3 .....	95
6.2.3	Ergebnisse geschw. I Profil mit aufgeschweißter Blockschiene 2.1C.0 bzw. 2.1C.3 .....	96
6.2.4	Ergebnisse geschw. I Profil mit lose aufliegender Blockschiene 2.1A.0 bzw. 2.1A.3 .....	97
6.2.5	Ergebnisse geschw. I Profil mit A45 Schiene 2.45B.0 bzw. 2.45B.3 .....	99

6.2.6	Ergebnisse geschw. I Profil mit A75 Schiene 2.75B.0 bzw. 2.75B.3 .....	102
<b>6.3</b>	<b>FE-Analyse Kastenquerschnitt 1 (Querschnitt 3) .....</b>	<b>106</b>
6.3.1	System mit Blockschiene.....	106
6.3.2	Spannungsverteilung über die Stegdicke.....	108
6.3.3	Ergebnisse Kastenquerschnitt 1 Blockschiene mit starrem Verbund 3.1D.0 bzw. 3.1D.3 .....	109
6.3.4	Ergebnisse Kastenquerschnitt 1 mit aufgeschweißter Blockschiene 3.1C.0 bzw. 3.1C.3 .....	110
6.3.5	Ergebnisse Kastenquerschnitt 1 mit loser Blockschiene 3.1A.0 bzw. 3.1A.3 .....	112
<b>6.4</b>	<b>FE-Analyse Kastenquerschnitt 2 (Querschnitt 4).....</b>	<b>114</b>
6.4.1	System mit Blockschiene.....	114
6.4.2	Ergebnisse Kastenquerschnitt 2 mit aufgeschweißter Blockschiene 4.1C10.....	116
6.4.3	Ergebnisse Kastenquerschnitt 2 mit loser Blockschiene 4.1A.0 bzw. 4.1A.3 .....	117
6.4.4	Ergebnisse Kastenquerschnitt 2 mit A45 4.45B.0 bzw. 4.45B.3.....	118
6.4.5	Ergebnisse Kastenquerschnitt 2 mit A75 4.75B.0 bzw. 4.75B.3.....	120
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>122</b>
<b>7.1</b>	<b>Versuche.....</b>	<b>122</b>
<b>7.2</b>	<b>Parameterstudie .....</b>	<b>122</b>
7.2.1	HEA 300 Querschnitt 1.....	122
7.2.2	Geschweißtes I-Profil (Querschnitt 2).....	123
7.2.3	Kastenquerschnitt 1 (Querschnitt 3).....	123
7.2.4	Kastenquerschnitt 2 (Querschnitt 4).....	123
<b>8</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>124</b>

# 1 Einleitung und Überblick

## 1.1 Allgemein

Im Zuge dieser Arbeit werden die lokalen Vertikalspannungen im Steg, welche infolge Radlasten bei Kranbahnträgern entstehen, untersucht. Die auftretenden Vertikalspannungen werden mithilfe der FEM Software ABAQUS [7], dem Eurocode EN 1993-6 [1] Abschnitt 5.7, sowie durch Versuche an der TU Graz bestimmt. Bei den Berechnungen, wie auch bei den Versuchen, wird das Hauptaugenmerk auf die verschiedenen Befestigungsarten der Schienen (schubstarr, nicht schubstarr), sowie Laststellungen des Rades (zentrisch, exzentrisch) gelegt.

Um die in der Praxis meist verwendeten Kranbahnträgertypen abzudecken, wurde die FEM Analyse an einem Walzprofil, zwei Kastenquerschnitten und an einem geschweißten I-Profil durchgeführt. Die Versuche werden an einem Walzprofil und an einem geschweißten Kastenquerschnitt realisiert.

## 1.2 Problemstellung und Ziel

Die nach Eurocode EN 1993-6 [1] Abschnitt 5.7 berechneten lokalen Druckspannungen im Steg von Walzprofilen bzw. in der K-Naht von geschweißten Profilen, stellen oft ein Problem im Ermüdungsnachweis bei Kranbahnträgern mit hoher Krankklasse dar. Die meist vergleichsweise hohen lokalen Spannungen kombiniert mit einem ungünstigen Kerbfall führen oft zu dicken Stegblechen. Die für den Ermüdungsnachweis relevanten Spannungen setzen sich aus einem Normalspannungsanteil und einem Biegespannungsanteil, welcher aus der möglichen exzentrischen Lasteinwirkung der Radlast entsteht, zusammen.

Die Spannungen, welche nach dem Eurocode [1] berechnet werden, basieren auf den Formeln von Oxford und Osterrieder [4] (siehe Abschnitt 3.3). Diese Formeln sind auf Basis der Scheibentheorie hergeleitet.

Ziel dieser Arbeit ist die Berechnung laut EN 1993-6 [1] sowohl mit den Ergebnissen aus dem Versuch und jenen aus der numerischen Berechnung zu vergleichen, um Abweichungen aufzuzeigen.

## 1.3 Umfang der Arbeit

### 1.3.1 Versuche

Parallel zu dieser Arbeit werden an der TU Graz vom Institut für Stahlbau Versuche mit zwei Querschnitten durchgeführt. Dabei werden wie in Abschnitt 3.4 beschrieben zwei Probekörper mit verschiedenen Lasteinleitungsfällen und Schienenlagerungen geprüft. In dieser Arbeit werden die aus den Versuchen erhaltenen Dehnungen mit jenen aus der FE Berechnung und dem Eurocode (EN 1993-6) verglichen. In Abschnitt 5 sind die Versuche näher beschrieben.

### 1.3.2 Parameterstudie

Im Zuge dieser Arbeit wurden mehrere verschiedene Querschnitte und Querschnittstypen, welche in Kapitel 2.1.1 beschrieben sind betrachtet. Kranbahnen werden mit unterschiedlichen Schientypen und Lagerungsarten (siehe 2.2) hergestellt. Die Schienenbefestigung und der Typ der Schiene haben einen erheblichen Einfluss auf die lokal auftretenden Maximalspannungen im Steg. Um diese Auswirkungen vergleichen zu können, werden bei allen Querschnitten folgende Fälle unterschieden:

- Blockschiene starr mit Obergurt verbunden
- Blockschiene mittels Kehlnaht an Obergurt verschweißt
- Blockschiene lose auf Obergurt aufgelegt
- A45 Schiene auf Obergurt geklemmt
- A75 Schiene auf Obergurt geklemmt

Die Schienen vom Typ A (siehe 2.2) werden aufgrund ihrer häufigen Verwendung in der Praxis gewählt. Die A45 ist die kleinste gängige Schiene vom Typ A und die A75 wurde als baupraktischer oberer Grenzwert für das untersuchte Walzprofil (HEA 300) gewählt..

Auf Schienen, welche auf Elastomer-Unterlagen gelagert sind, wird in Zuge dieser Arbeit nicht eingegangen.

Des Weiteren spielt die Position der Lasteinleitung der Radlast in die Schiene eine Rolle, deswegen wird in EN 1993-6 [1] zwischen Normalspannungen aus zentrischer und Biegespannungen aus exzentrischer Lasteinleitung unterschieden. Zur Ermittlung der maßgebenden Spannung für den Ermüdungsnachweis, werden Biege- und Normalspannungen überlagert.

Um die Vergleichbarkeit mit dem Eurocode herzustellen, werden alle FEM Analysen jeweils mit zentrischer und exzentrischer Lasteinleitung, wie in EN 1993-6 [1] Abschnitt 5.7 beschrieben, durchgeführt.

## 2 Kranbahnen

### 2.1 Querschnitte von Kranbahnträgern [2][3]

In der Praxis werden als Kranbahnträger für leichte Kranbahnen hauptsächlich gewalzte I-Profile (HEA bzw. HEB), sowie für den schweren Kranbetrieb geschweißte I-Profile verwendet. Vereinzelt kommen auch Kastenquerschnitte zum Einsatz. Diese eignen sich durch ihre hohe Torsionssteifigkeit und durch die Möglichkeit zum Betreiben von 2 unabhängigen Kranbahnen nebeneinander sehr gut. In Abbildung 2-1 sind exemplarisch Querschnitte von Kranbahnträgern dargestellt.

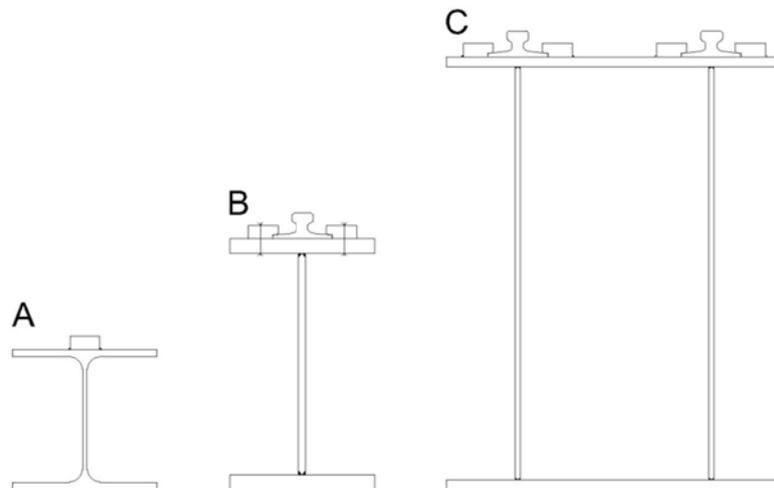


Abbildung 2-1: Beispiele für Querschnitte von Kranbahnträgern (A: Walzprofil; B: geschw. I-Profil; C: Kastenquerschnitt)

Um möglichst praxisrelevante und sinnvoll vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, werden ein HEA 300, ein geschweißtes Profil, sowie zwei Kastenquerschnitte untersucht.. (siehe 2.3)

### 2.2 Schientypen [2][3]

Bei Kranbahnen werden unterschiedliche Schientypen eingesetzt. Der einfachste Schientyp ist die Blockschiene, diese besteht aus einem rechteckigen Stahlblock und wird auf den Obergurt des Trägers aufgeschweißt. Aufgrund der schubfesten Verbindung mit dem Kranbahnträger, dürfen Blockschienen in die statische Berechnung miteinbezogen werden. Blockschienen eignen sich gut für niedrige bis mittlere Radrücke, da ein Austausch der Schiene innerhalb der Lebensdauer der Kranbahn (i.d.R. 25 Jahre) nur schwierig zu bewerkstelligen ist. Schienen mit starren Befestigungen werden nur in den Beanspruchungsklassen  $S_0 - S_3$  empfohlen.

Für Kranbahnen mit höheren Beanspruchungsklassen und großen Radlasten werden häufig A-Schienen verwendet. Diese werden mittels geschraubten oder geschweißten Klemmen auf den Obergurt geklemmt. Laut EN 1993-6 [1] muss die Höhe der Schiene zur Bestimmung der Querschnittswerte aufgrund eines möglichen Verschleißes um 25% abgemindert werden. In

dieser Arbeit werden alle Berechnungen und Versuche mit Schienen ohne Verschleiß durchgeführt.

Es gibt noch einige andere spezielle Schientypen, auf welche an dieser Stelle nicht eingegangen wird, da sie für die folgenden Untersuchungen nicht herangezogen werden. Folgende Abbildung zeigt die für die Versuche und FE Berechnung verwendeten Schientypen.

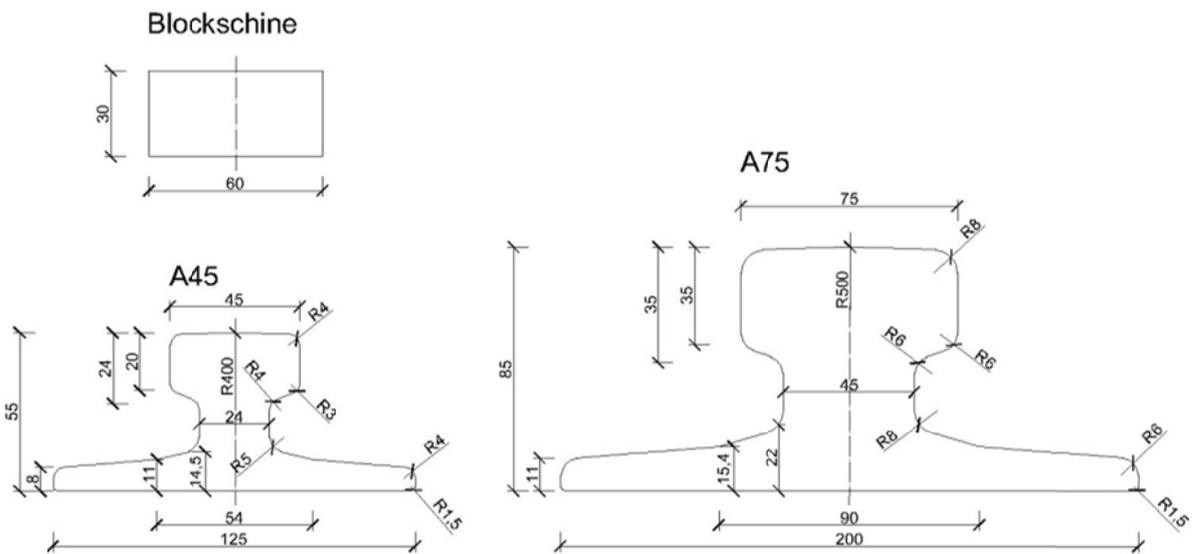


Abbildung 2-2: Verwendete Schientypen (Abmessungen in [mm])

## 2.3 Untersuchte Querschnitte

### 2.3.1 HEA 300 (Querschnitt 1)

Folgende Abbildung zeigt die untersuchten HEA 300 Querschnitte mit den verschiedenen Schientypen.

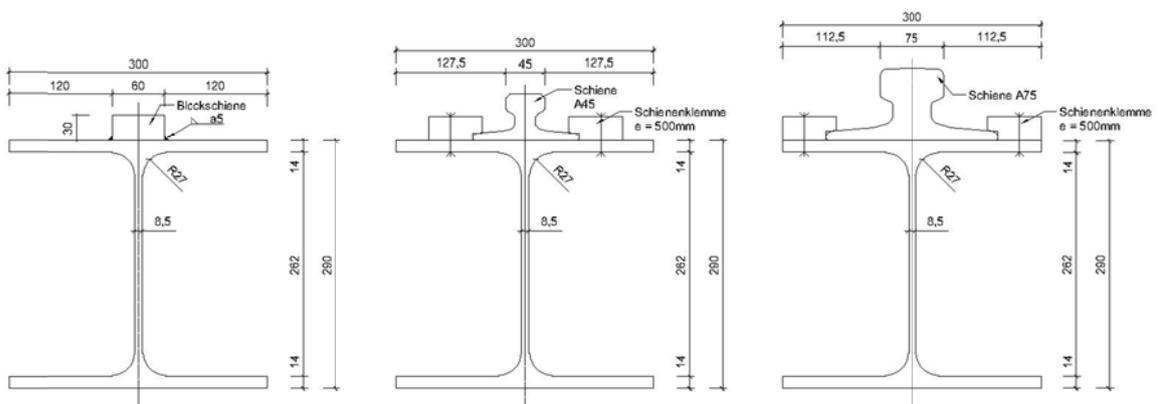


Abbildung 2-3: HEA300 mit Blockschiene, A45 und A75 Abmessungen in [mm]

### 2.3.2 Geschweißtes I Profil (Querschnitt 2)

Folgende Abbildung zeigt die untersuchten geschweißten I Querschnitte mit den verschiedenen Schienentypen.

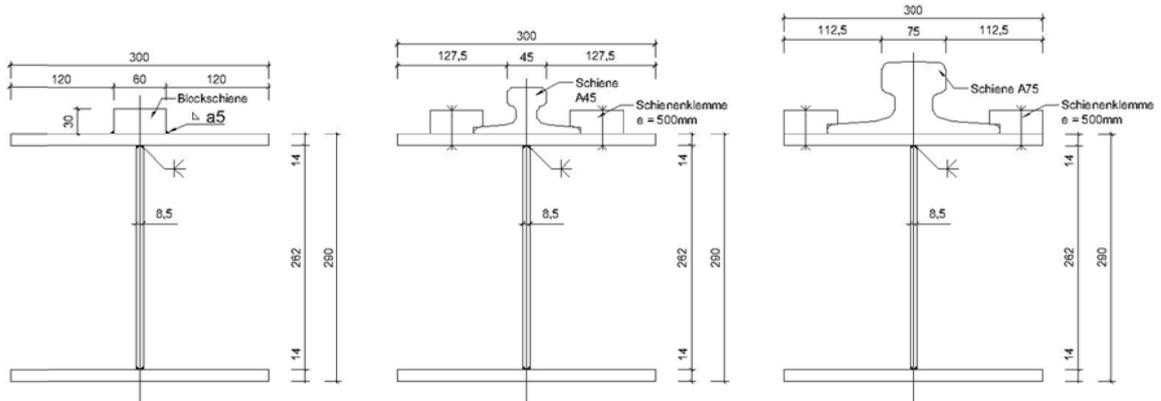


Abbildung 2-4: geschweißtes I-Profil mit Blockschiene, A45 und A75 (Abmessungen in [mm])

### 2.3.3 Kastenquerschnitt 1 für Versuch (Querschnitt 3)

Folgende Abbildung zeigt den untersuchten Kastenquerschnitt 1 mit der Blockschiene.

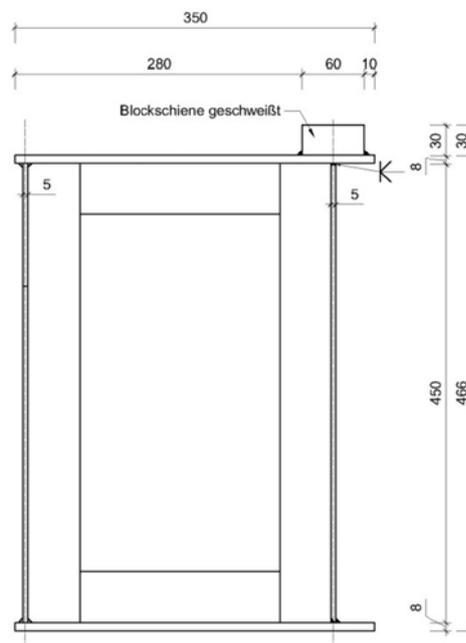


Abbildung 2-5: Kastenquerschnitt 1 mit Blockschiene (Abmessungen in [mm])

### 2.3.4 Kastenquerschnitt 2 (Querschnitt 4)

Folgende Abbildung zeigt den untersuchten Kastenquerschnitt 2 mit den verschiedenen Schienentypen.

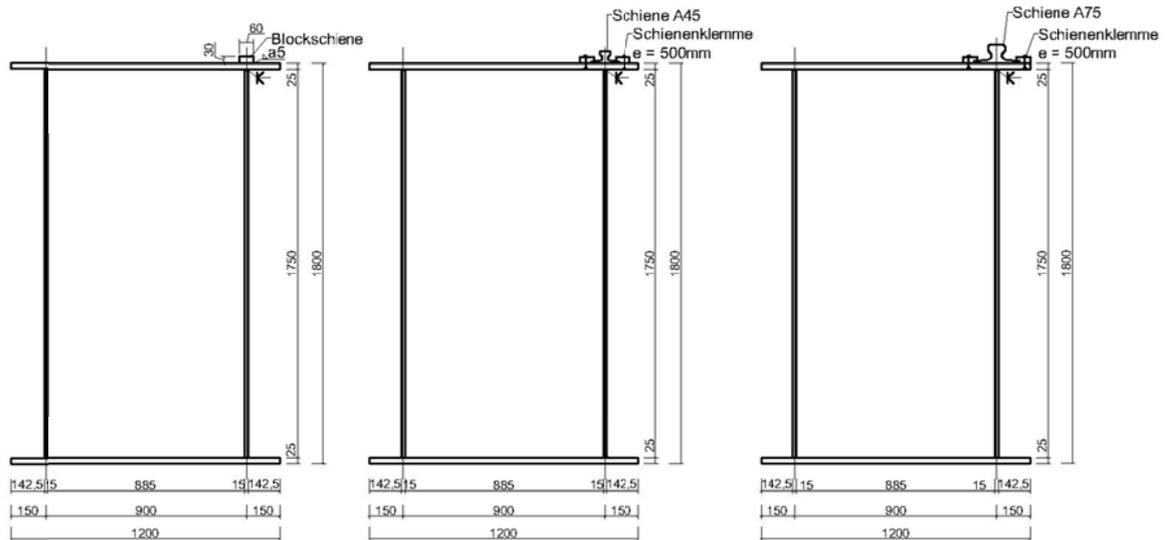


Abbildung 2-6: Kastenquerschnitt 2 mit Blockschiene, A45 und A75 (Abmessungen in [mm])

## 2.4 Bezeichnung der Systeme

Um die Übersichtlichkeit der in den nachfolgenden Abschnitten dargestellten Ergebnisse zu gewährleisten, werden die in Abschnitt 2.3 zusammengefassten vier Querschnitte, die Schienentypen, ihre Befestigung und die Art der Belastung (zentrisch bzw. exzentrisch) mit folgenden Kurzbezeichnungen versehen:

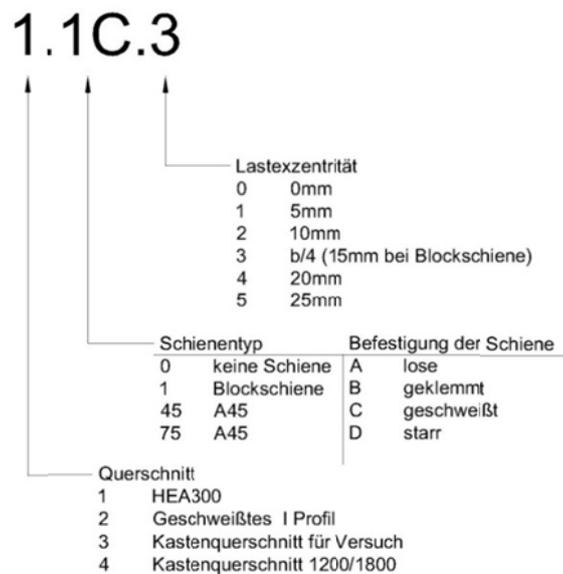


Abbildung 2-7: Nummernschlüssel

Das System 1.1C.3 ist demnach ein HEA 300 Querschnitt mit einer Blockschiene welche auf den Träger angeschweißt ist und im k/4 (bei der Blockschiene (b=60mm h=30mm) e=15mm) Punkt belastet wird.

### 3 Berechnung der lokalen Spannungen

#### 3.1 Nach EN 1993-6 Abschnitt 5.7 [1]

Nach EN 1993-6 [1] Abschnitt 5.7 werden die lokal im Steg auftretenden Spannungen, in lokale vertikale Druck- und Biegespannungen aufgeteilt.

##### 3.1.1 Lokale vertikale Druckspannungen

Die lokalen vertikalen Druckspannungen  $\sigma_{0z,Ed}$  werden nach folgender Formel bestimmt:

$$\sigma_{0z,Ed} = - \frac{F_{z,Ed}}{l_{eff} * t_w} \quad \text{GL. 3.1}$$

Dabei ist:

- $F_{z,Ed}$ ..... maximale Radlast
- $l_{eff}$  ..... effektive Lastausbreitungslänge
- $t_w$ ..... Stegdicke

Wobei die bei der effektiven Lastausbreitungslänge zwischen schubstarr und nicht schubstarr verbunden Kranbahnschienen unterschieden wird.

Tabelle 3-1: Effektive Lastausbreitungslänge nach EN 1993-6 [1]

Beschreibung	Effektive Lastausbreitung $l_{eff}$	
Kranschiene schubstarr mit Flansch verbunden	$l_{eff} = 3,25 \left( \frac{I_{rf}}{t_w} \right)^{\frac{1}{3}}$	GL. 3.2
Kranschiene <b>nicht</b> schubstarr mit Flansch verbunden	$l_{eff} = 3,25 \left( \frac{I_r + I_{f,eff}}{t_w} \right)^{\frac{1}{3}}$	GL. 3.3

$I_{rf}$ ..... Trägheitsmoment zweiten Grades um die horizontale Schwerlinie des zusammengesetzten Querschnittes aus Schiene und Flansch mit der effektiven Breite  $b_{eff}$ .

$I_r$ ..... Trägheitsmoment zweiten Grades um die horizontale Schwerlinie der Schiene.

$I_{f,eff}$ ..... Trägheitsmoment zweiten Grades um die horizontale Schwerlinie des Flansches mit der effektiven Breite  $b_{eff}$ .

mit:

$$b_{eff} = b_{fr} + h_r + t_f \text{ aber } b_{eff} \leq b$$

GL. 3.4

$b_{fr}$ .....Breite des Schienenfußes siehe Abbildung 3-1

$h_r$ .....Schienenhöhe siehe Abbildung 3-1

$t_f$ .....Dicke des Flansches

$b$ .....Gesamtbreite des Obergurtes

In Abbildung 3-1 ist die Spannungsverteilung im Steg sowie die Lastausbreitungslänge  $l_{eff}$  dargestellt.

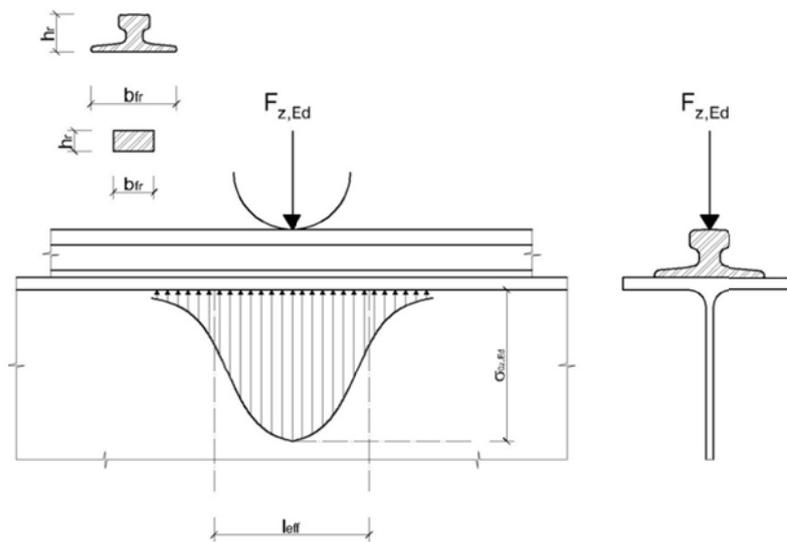


Abbildung 3-1: Effektive Lastausbreitungslänge  $l_{eff}$

Die effektive Lastausbreitungslänge  $l_{eff}$  ist an der Unterkante des Flansches definiert. Zur Bestimmung von  $l_{eff}$  am Ende des Ausrundungsradius und an einer beliebigen Tiefe  $z$  des Steges darf, laut EN 1993-6 [1] eine Lastausbreitung von  $45^\circ$  angenommen werden.

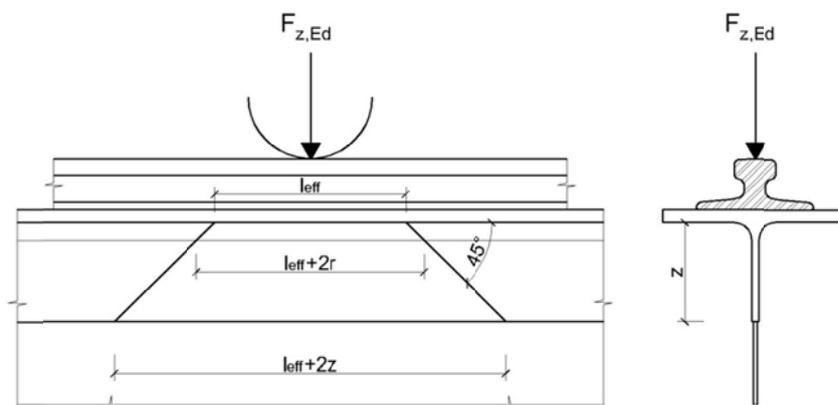


Abbildung 3-2: Lastausbreitungslänge unter  $45^\circ$

### 3.1.2 Lokale Biegespannungen infolge exzentrischer Radlasten

Die lokale Biegespannungen infolge exzentrischer Radlasten  $\sigma_{T,Ed}$  werden wie folgt ermittelt:

$$\sigma_{T,Ed} = \frac{6 \cdot T_{Ed}}{a \cdot t_w^2} * \eta * \tanh(\eta) \quad \text{GL. 3.5}$$

mit:

$$\eta = \left[ \frac{0,75 \cdot a \cdot t_w^3}{I_t} * \frac{\sinh^2\left(\frac{\pi \cdot h_w}{a}\right)}{\sinh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h_w}{a}\right) - \frac{2 \cdot \pi \cdot h_w}{a}} \right]^{0,5} \quad \text{GL. 3.6}$$

mit:

$$T_{Ed} = F_{z,Ed} * e_y \quad \text{GL. 3.7}$$

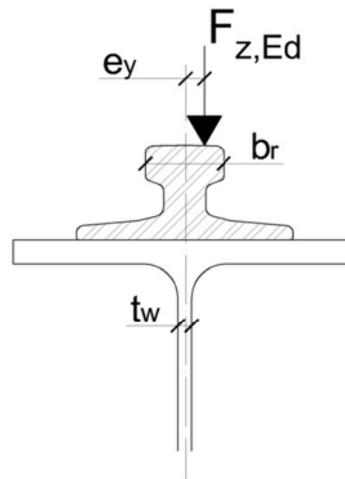


Abbildung 3-3: Bestimmung der Torsion im Obergurt

Die in Abbildung 3-3 beschriebene Lastexzentrizität  $e$  ist nach EN 1991-3

[11] Abschnitt 2.5.2.1 zu bestimmen und wird in der Regel mit  $e = b_r \cdot 0,25$  berechnet.

## 3.2 Berechnungsbeispiele nach EN 1993-6 [1]

Im Anschluss wird die Berechnung der lokalen Spannungen im Steg laut EN 1993-6 [1] an zwei Beispielen durchgeführt. Bei beiden wird die Spannung für den zentrischen und den exzentrischen Belastungsfall berechnet. Die Beispiele unterscheiden sich nur durch die Verbindung zwischen Schiene und Träger (Bsp.1 = schubstarr verbundene Schiene Bsp.2 = nicht schubstarr verbundene Schiene).

### 3.2.1 Bsp. 1 schubstarr verbundene Schiene

Als erstes Beispiel wird die Berechnung nach Eurocode [1] des in Kapitel 2.3.1 dargestellten HEA300 Profils, mit einer schubstarr aufgeschweißten Blockschiene ( $b=60\text{mm}$ ,  $h=30\text{mm}$ ), gezeigt. Die erforderlichen Parameter sind in Tabelle 3-2 zusammengefasst.

Tabelle 3-2: Randbedingungen Normberechnung

Randbedingungen		
Bezeichnung	Formelzeichen	Wert
Maximale Radlast	$F_{z,Ed}$	100 kN
Stegdicke	$t_w$	8,5 mm
Flanschbreite	$b$	300 mm
Flanschdicke	$t_f$	14 mm
Schienenfußbreite	$b_r$	60 mm
Schienenhöhe	$h_r$	30 mm
Abstand der Quersteifen im Steg	$a$	1000 mm
Lichte Höhe des Steges	$h_w$	262 mm
Torsionsträgheitsmoment des Flansches einschließlich der Schiene	$I_T$	814400 mm <sup>4</sup>
Ausrundungsradius	$r$	27 mm
Abstand der Quersteifen	$a$	1000 mm

$$b_{eff} = 6 + 3 + 1,4 = 10,4 \text{ cm} < 30 \text{ cm}$$

Folgende Skizze zeigt die benötigten Abmessungen zur Bestimmung von  $I_{rf}$ .

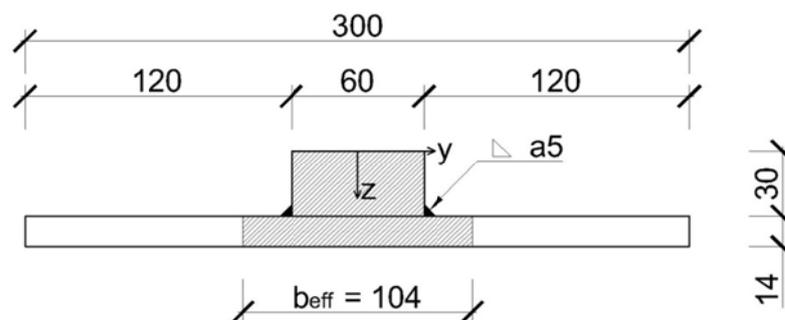


Abbildung 3-4: Skizze des Flansches mit der Schiene zur Bestimmung von  $I_{rf}$  (Abmessungen in [mm])

Tabelle 3-3: Querschnittswerte zur Bestimmung von  $I_{rf}$ 

Bezeichnung	$A_i$ [cm <sup>2</sup> ]	$z_i$ [cm]	$A_i * z_i$ [cm <sup>3</sup> ]	$I_{y_i}$ [cm <sup>4</sup> ]	$s_{z_i}$ [cm]	$A_i * s_{z_i}^2$ [cm <sup>4</sup> ]
Schiene	18	1,5	27	13,5	0,98	17,29
Obergurt mit $b_{eff}$	14,56	3,7	53,87	2,38	1,22	21,67
<b>Summe</b>	<b>32,56</b>	-	<b>80,87</b>	<b>15,88</b>	-	<b>38,96</b>

$$s_z = \frac{80,87}{32,56} = 2,48 \text{ cm}$$

$$I_{rf} = 15,88 + 38,96 = 54,84 \text{ cm}^4$$

Im ersten Beispiel wird eine schubstarr mit den Träger verbundene Schiene betrachtet deswegen kommt folgende Formel zur Anwendung.

$$l_{eff} = 3,25 * \left( \frac{54,84}{0,85} \right)^{\frac{1}{3}} = 13,03 \text{ cm}$$

Im gezeigten Beispiel handelt es sich um ein Walzprofil mit Ausrundungsradius, deshalb wird die Spannung am Ende von diesem bestimmt. Wie in Abbildung 3-2 gezeigt, wird von einer Lastausbreitung unter 45° ausgegangen. Daraus folgt, dass  $l_{eff}$  um  $2r$  erhöht werden darf.

$$l_{eff+2r} = 13,03 + 2 * 2,7 = 18,43 \text{ cm}$$

$$\sigma_{0z,Ed} = - \frac{100}{18,43 * 0,85} = -6,38 \text{ kN/cm}^2$$

Infolge exzentrischer Radlast ergeben sich folgende lokale Spannungen:

$$I_{T,Schiene} = \frac{6 * 3^3}{3} = 54 \text{ cm}^4$$

$$I_{T,Flansch} = \frac{30 * 1,4^3}{3} = 27,44 \text{ cm}^4$$

$$I_T = 54 + 27,44 = 81,44 \text{ cm}^4 \text{ (schubstarr verbunden)}$$

$$\eta = \left[ \frac{0,75 * 100 * 0,85^3}{81,44} * \frac{\sinh^2 \left( \frac{\pi * 26,2}{100} \right)}{\sinh \left( \frac{2 * \pi * 26,2}{100} \right) - \frac{2 * \pi * 26,2}{100}} \right]^{0,5} = 0,7494$$

$$e_y = \frac{b_r}{4} = \frac{6}{4} = 1,5 \text{ cm}$$

$$T_{Ed} = 100 * 1,5 = 150 \text{ kNcm}$$

$$\sigma_{T,Ed} = -\frac{6 * 150}{100 * 0,85^2} * 0,7494 * \tanh(0,7497) = -3,76 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{ges,Ed} = -6,38 + (-3,76) = -10,14 \text{ kN/cm}^2$$

Laut EN 1993-6 [1] Abschnitt 5.7 beträgt die lokale Spannung im Steg am Ende des Ausrundungsradius **10,14 kN/cm<sup>2</sup>**.

Auf folgender Skizze sind die Spannungen aus der zentrischen und exzentrischen Belastung sowie die Kombination dargestellt.

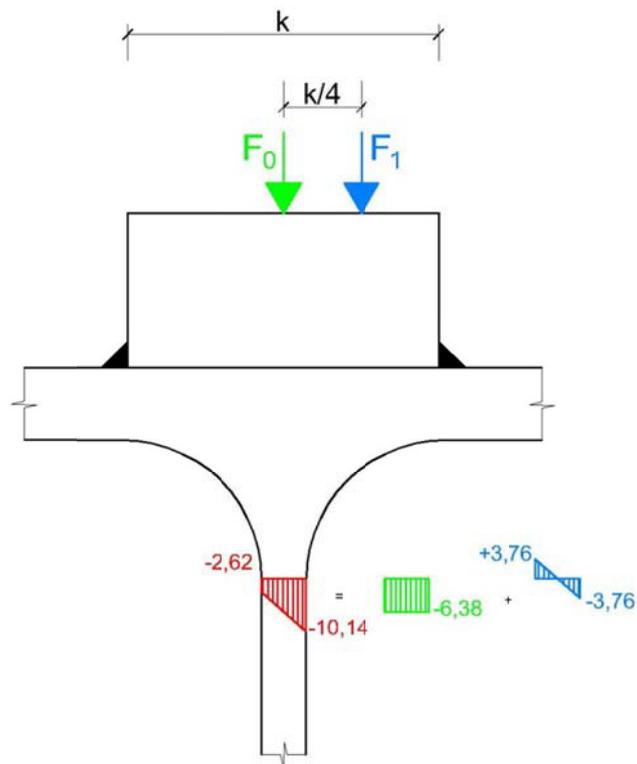


Abbildung 3-5: Spannungen im Steg Bsp.1

### 3.2.2 Bsp. 2 nicht schubstarr verbundene Schiene

In Beispiel 2 wird die Berechnung mit denselben Randbedingungen wie in Beispiel 1 (Tabelle 3-2), jedoch mit einer nicht schubstarr verbundenen Schiene, durchgeführt.

$$b_{eff} = 6 + 3 + 1,4 = 10,4 \text{ cm} < 30 \text{ cm}$$

$$I_{f,eff} = \frac{10,4 * 1,4^3}{12} = 2,38 \text{ cm}^4$$

$$I_r = \frac{6 * 3^3}{12} = 13,5 \text{ cm}^4$$

$$l_{eff} = 3,25 * \left( \frac{2,38 + 13,5}{0,85} \right)^{\frac{1}{3}} = 8,62 \text{ cm}$$

Wie in Bsp. 1 wird auch hier  $l_{eff}$  wie in Abbildung 3-2 gezeigt am Ende des Ausrundungsradius bestimmt.

$$l_{eff+2r} = 8,62 + 2 * 2,7 = 14,02 \text{ cm}$$

$$\sigma_{0z,Ed} = -\frac{100}{14,02 * 0,85} = -8,39 \text{ kN/cm}^2$$

Infolge exzentrischer Radlast ergeben sich folgende Spannungen:

Anders als in Bsp.1 darf bei nicht schubstarr verbundenen Schienen gemäß Eurocode nur noch das  $I_T$  des Flansches berücksichtigt.

$$I_{T,Flansch} = \frac{30 * 1,4^3}{3} = 27,44 \text{ cm}^4$$

$$\eta = \left[ \frac{0,75 * 100 * 0,85^3}{27,44} * \frac{\sinh^2\left(\frac{\pi * 26,2}{100}\right)}{\sinh\left(\frac{2 * \pi * 26,2}{100}\right) - \frac{2 * \pi * 26,2}{100}} \right]^{0,5} = 1,29$$

$$e_y = \frac{b_r}{4} = \frac{6}{4} = 1,5 \text{ cm}$$

$$T_{Ed} = 100 * 1,5 = 150 \text{ kNcm}$$

$$\sigma_{T,Ed} = -\frac{6 * 150}{100 * 0,85^2} * 1,29 * \tanh(1,29) = -13,80 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{ges,Ed} = -8,39 + (-13,80) = 22,19 \text{ kN/cm}^2$$

Laut EN 1993-6 [1] Abschnitt 5.7 beträgt in diesem Fall die lokale Spannung im Steg am Ende des Ausrundungsradius mit einer nicht schubstarr verbundenen Schiene **22,19 kN/cm<sup>2</sup>**.

Auf folgender Skizze sind die Spannungen aus der zentrischen und exzentrischen Belastung sowie die Kombination dargestellt.

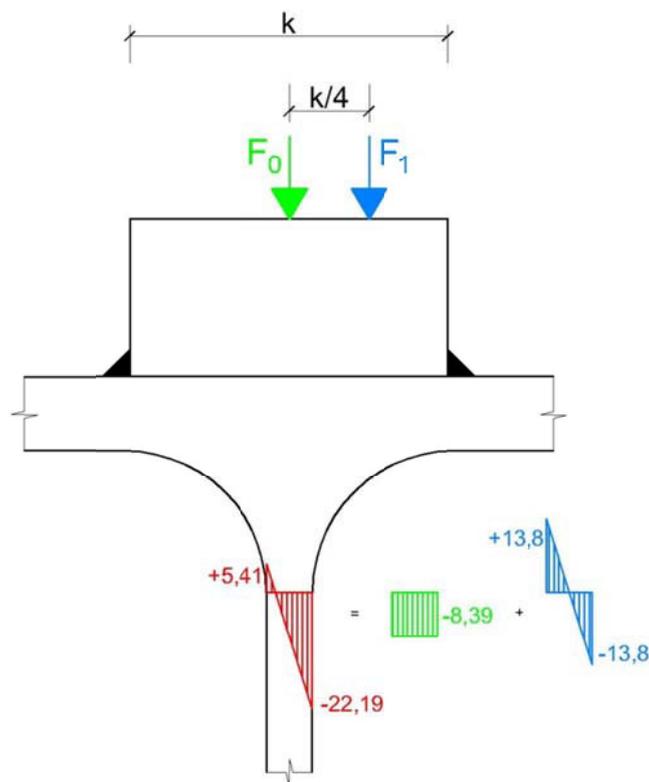


Abbildung 3-6: Spannungen im Steg Bsp.2

### 3.3 Berechnung nach Osterrieder und Oxfort [4][8][9][10]

Die in der EN 1993-6 [1] beschriebenen Formel zur Bestimmung der vertikalen Spannungen aus Radlasten in Kranbahnträgern basiert unter anderem auf der Arbeit von Osterrieder und Oxfort [4]. Die Veröffentlichung von Osterrieder und Oxfort beruht auf den Arbeiten von Rieve [8], Girkmann [9] und Parkes [10]. In diesen Arbeiten wird der Obergurt als Biegeträger auf einer Halbscheibe (dem Stegblech) aufgelagert. Osterrieder und Oxfort vereinfachten die früheren Formeln, indem sie die Fläche  $A$  des Obergurtes unendlich groß und den Abstand  $a$  der Stegoberkante vom Schwerpunkt des schubsteif angeschlossenen Gurtquerschnittes auf null setzten. Die vertikale Druckspannung kann (unter Berücksichtigung der beiden Parameter  $A$  bzw.  $a$ ) mit folgender Formel bestimmt werden.

$$\overline{\sigma_z} = \frac{2R}{l} \sum_{k=1}^{\infty} \cos \eta z \frac{t + 2\eta A + \eta^2 (1 - \mu) A a}{N} \quad \text{GL. 3.8}$$

mit

$$N = t^2 + 2\eta A t + 2(1 - \mu)\eta^2 a A t + 2\eta^3 (I + a^2 A) t + \eta^4 A I (1 + \mu)(3 - \mu)$$

$$\eta = \frac{(2k - 1) * \pi}{l}$$

$A$  = Fläche des schubsteif an den Steg angeschlossenen Gurtquerschnitts

$I = I_G + I_s$  bei nicht schubstarr verbundenen Kranschiene bzw.  $I_{GS}$  bei starr verbundener Schiene

$l$  = gewählte halbe Periodendauer für die Darstellung der Belastung

$a$  = Abstand der Stegoberkante vom Schwerpunkt des schubsteif angeschlossenen Gurtquerschnittes

$I_G$  und  $I_s$  sind die Einzelträgheitsmomente von Obergurt und Kranschiene,  $I_{GS}$  das Trägheitsmoment des aus Gurt und Schiene bestehenden Gesamtquerschnittes.

$\mu$  = Querkontraktionszahl = 0,3 (für Stahl)

$R$  = Radlast

$t$  = Stegdicke

Durch lösen der Fourierreihe mithilfe des Fourierintegrals ergibt sich folgende Formel für die maximale Spannung.

$$\max \overline{\sigma_z} = 0,3055 \frac{R}{t} \sqrt[3]{\frac{t}{I}} \quad \text{GL. 3.9}$$

Löst man das Fourieintegral mit  $A=\infty$  und  $a = 0$  erhält man folgende Formel für die Maximalspannung

$$\max \bar{\sigma}_z = 0,319 \frac{R}{t} \sqrt[3]{\frac{t}{I}} \quad \text{GL. 3.10}$$

Setzt man in die Werte aus 3.2 in die Gleichung 3.9 und 3.10 ein, erhält man folgendes Ergebnis:

$$0,3055 \frac{100}{0,85} \sqrt[3]{\frac{0,85}{54,84}} = \mathbf{8,96 \text{ kN/cm}^2}$$

$$0,319 \frac{100}{0,85} \sqrt[3]{\frac{0,85}{54,84}} = \mathbf{9,35 \text{ kN/cm}^2}$$

Die Berechnung der Spannung nach EN 1993-6 [1] ohne Ausrundungsradius liefert folgendes Ergebnis:

$$\sigma_{0z,Ed} = \frac{100}{13,03 * 0,85} = \mathbf{9,02 \text{ kN/cm}^2}$$

Die Formel aus dem Eurocode ist von der Gleichung 3.9 abgeleitet.

### 3.4 Berechnung nach Vögele [5]

Aufbauend auf den ursprünglichen Arbeiten von Osterrieder und Oxfort [4] entwickelte Vögele mithilfe der Airyschen Spannungsfunktion für die Scheibe ein Formelwerk, welches in der Veröffentlichung [5] beschrieben wird. Mithilfe dieses Formelwerks ist es möglich die lokalen vertikalen Spannungen infolge einer Einzellast in jedem beliebigen Punkt des Stegbleches eines I Profils zu bestimmen.

Die folgenden Grafiken sind im Zuge eines Masterprojektes [6] an der TU Graz am Institut für Stahlbau parallel zu dieser Arbeit erstellt und zur Verfügung gestellt worden. Sie zeigen ein geschweißtes I Profil mit den Abmessungen des Querschnittes 2 (siehe 2.3.2), mit einer schubstarr bzw. nicht schubstarr befestigten Blockschiene (siehe 2.2)

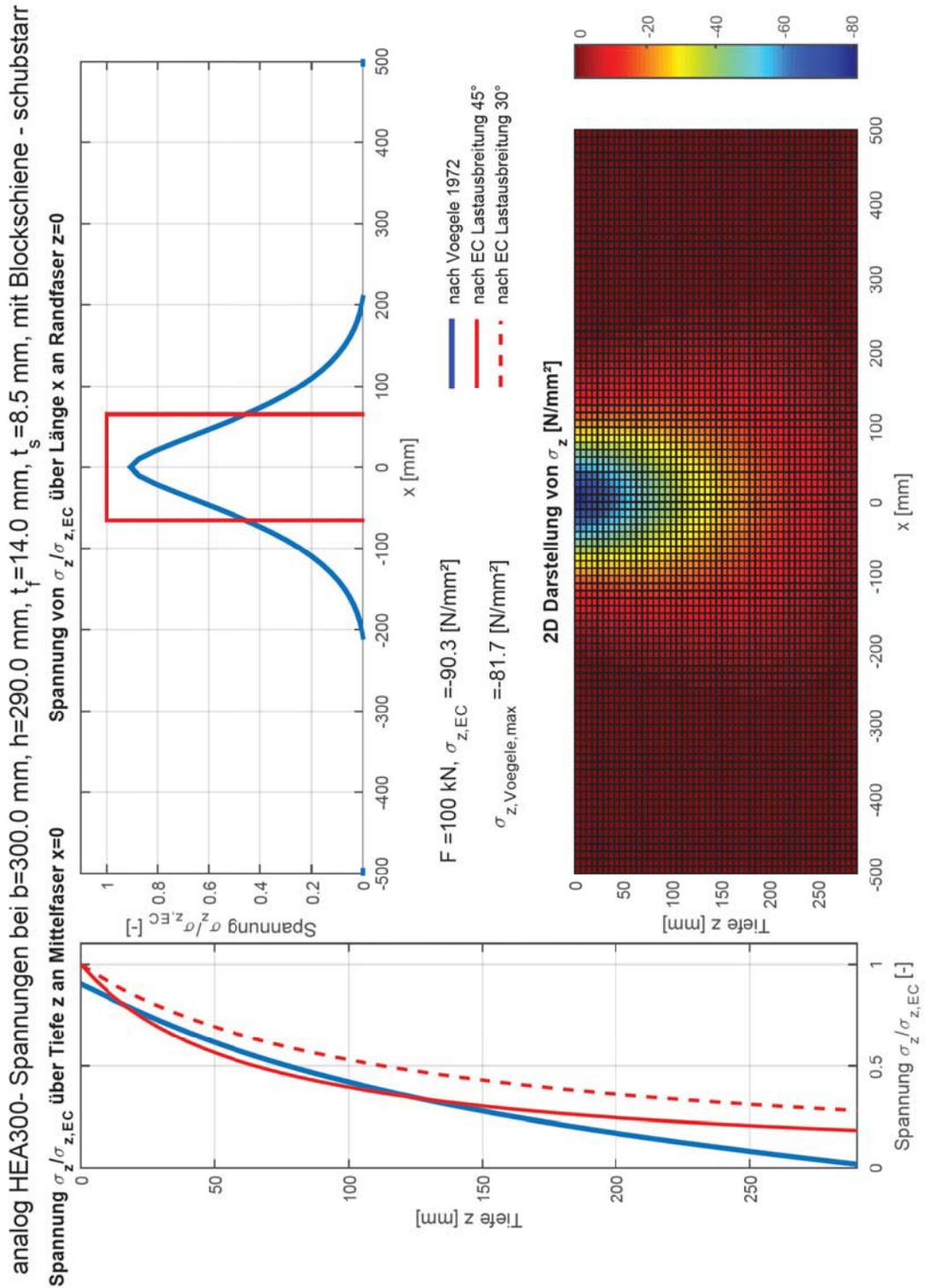


Abbildung 3-7: Berechnung Querschnitt 2 mit schubstarr verbundener Blockschiene nach Vögele [6]

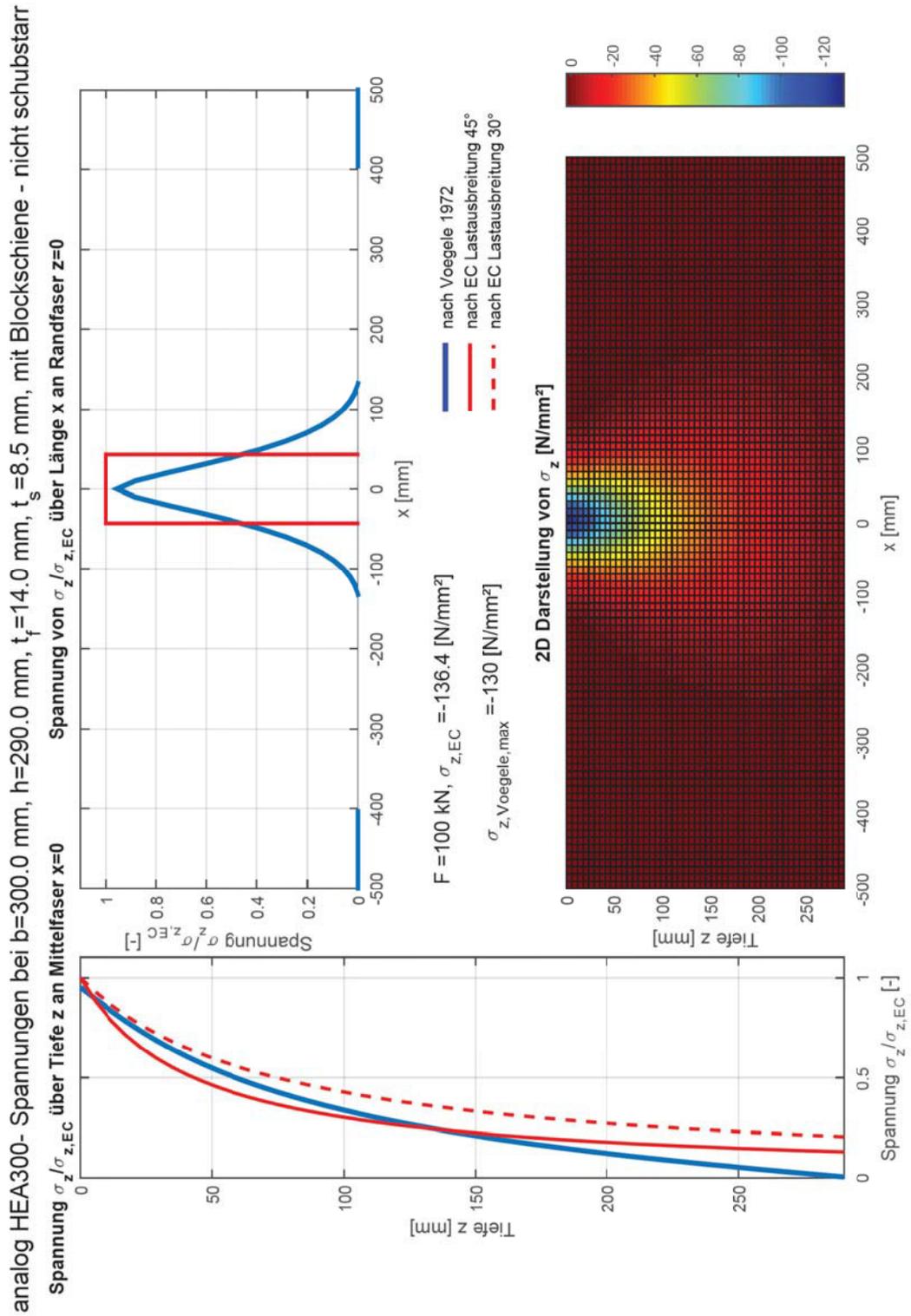


Abbildung 3-8: Berechnung Querschnitt 2 mit nicht Schubstarr verbundener Blockschiene nach Vögele [6]

Die Spannungsberechnung nach Vögele liefert in beiden betrachteten Fällen (schubstarre und nicht substarre Blockschiene) eine kleinere Spannung als die Berechnung laut EN 1993-6 [1]. Das Ergebnis der schubstarr verbundenen Schiene ist 10% niedriger als die Normberechnung. Bei der nicht schubstarr verbundenen Schiene beträgt der Unterschied nur 5%. Es ist zu erkennen, dass sich bei den beiden Berechnungsbeispielen die Länge der Spannungsverteilung (in x Richtung) stark unterscheidet. Die Berechnung nach Vögele [5] liefert auch die Spannung über die Tiefe z in der Mittelfaser  $x = 0$  des untersuchten Trägers. Hierbei ist zu erkennen, dass die Berechnung nach Eurocode [1] (Lastausbreitung von  $45^\circ$ ) bei beiden Fällen im Bereich von  $z = 10$  bis  $z = 100$  niedriger als jene nach Vögele [5] ist.

## 4 Modellbildung der FE-Analyse

Die FE Analyse wird mit der Software Abaqus 6.14 [7] durchgeführt. Bei der Modellierung kommen sowohl Volumenelemente als auch Schalenelemente zum Einsatz. Die Volumenelemente liefern ein genaueres Ergebnis für den lokalen dreidimensionalen Spannungszustand im Bereich der Radlast, benötigen jedoch viele Berechnungsressourcen. Die gewählten Systeme sind um die y-z Ebene symmetrisch, deshalb wird nur der halbe Träger modelliert und mittels einer Symmetriebedingung berechnet (siehe Abbildung 4-4).

### 4.1 Modellierung

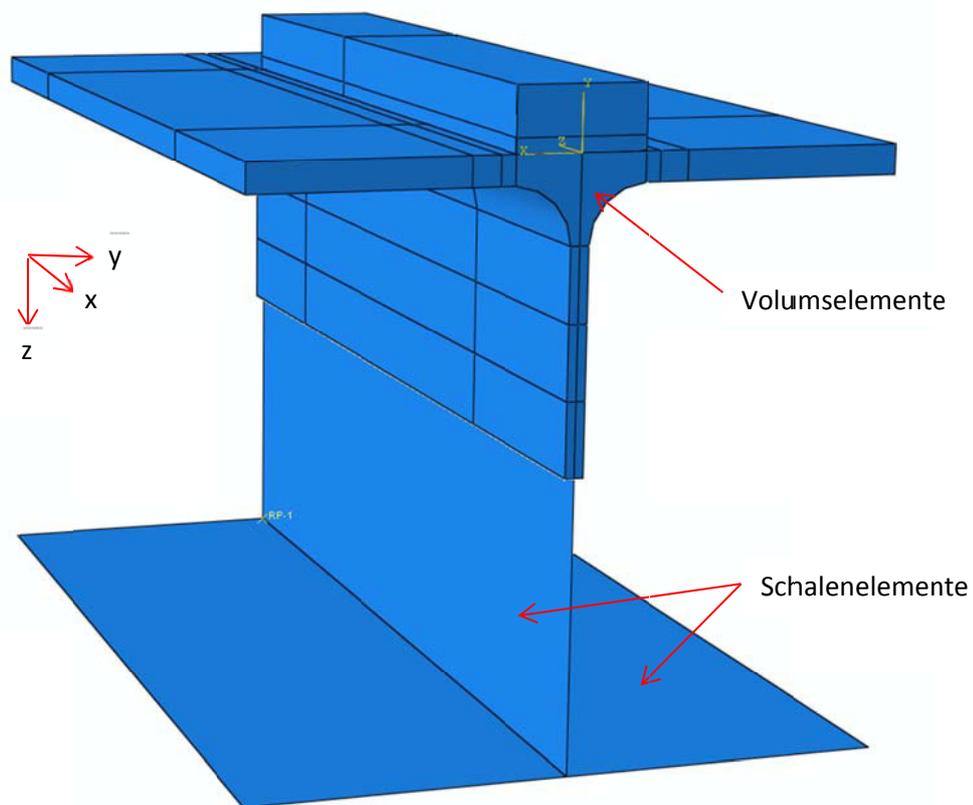


Abbildung 4-1: Übersicht Modellierung HEA 300

Um die Berechnungszeit gering zu halten, wird das HEA Profil in der horizontalen Schwerachse getrennt. Der obere Teil an welchem die maßgebenden Spannungen entstehen, wird mit Volumenelemente modelliert und der Untere mit Schalenelemente.

Das geschweißte I Profil ist analog mit denselben Elementtypen wie der HEA 300 modelliert.

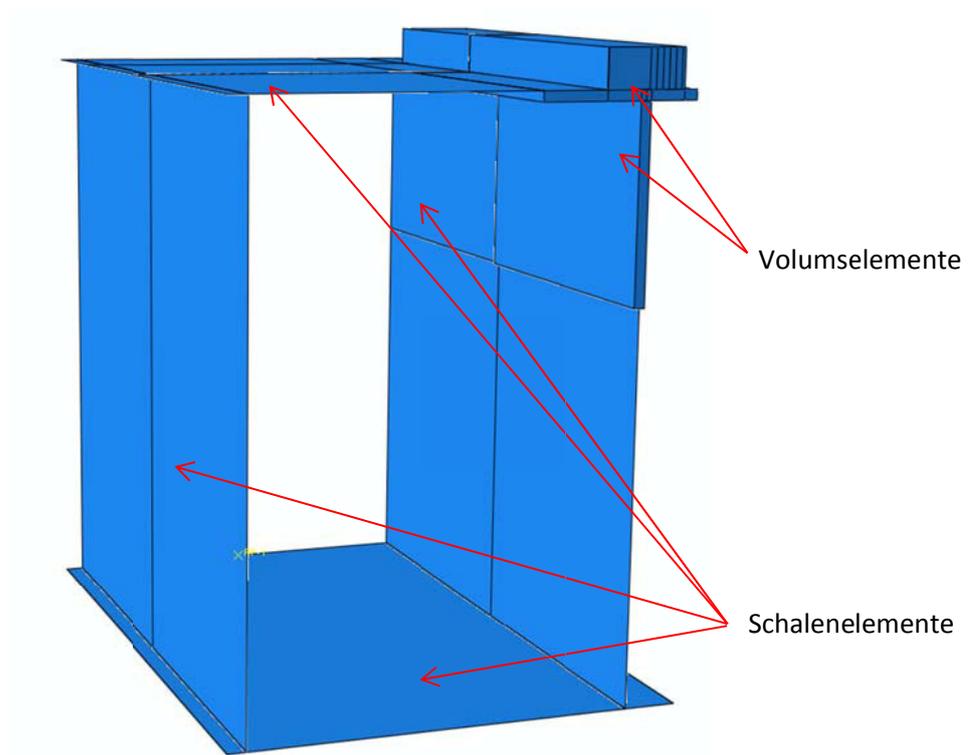


Abbildung 4-2: Übersicht Modellierung Kastenquerschnitte

Bei den Kastenquerschnitten wird, wie beim HEA Profil nur jener Bereich, in welchem sich die relevanten lokalen Spannungen auftreten mit Volumselemente modelliert, der Rest besteht wie abgebildet aus Schalenelementen.

## 4.2 Material

Als Material wird Stahl mit linear elastischen Materialverhalten, mit folgenden Kennwerten, gewählt.

Tabelle 4-1: Materialkennwerte

E Modul	<b>210000</b>	N/mm <sup>2</sup>
Querdehnzahl $\nu$	<b>0,3</b>	[-]

## 4.3 Randbedingungen bzw. Interaktionsbedingungen

Alle Volumselemente des Querschnittes sind über eine „Tie-Verbindung“ starr miteinander verbunden. Die Schalen und Volumselemente mit dem Befehl „Shell to solid coupling“.

Die Modellierung der Randbedingungen und „Interactions“ erfolgt bei allen Systemen identisch, deswegen werden die Bilder nur exemplarisch an einem System gezeigt.

### 4.3.1 Verbindung Schiene und Oberflansch

**Schiene lose auf Träger aufliegend:** Der Kontakt zwischen der Schiene und dem Oberflansch in vertikaler Richtung wird mittels dem Befehl „Hard Contact“ hergestellt. Ein Abheben der Schiene ist ungehindert möglich. In horizontaler Richtung ist eine Reibungsbedingung mit dem Reibbeiwert  $\mu=0,2$  angesetzt.

**Schiene auf Träger aufgeschweißt:** Dabei sind die mit Volumselementen modellierte Schweißnähte mittels einer „Tie Verbindung“ mit dem Träger und der Schiene verbunden. Zwischen der Scheinunterfläche und dem Oberflansch sind dieselben Reibungsbedingungen wie bei der losen Schiene angesetzt (Hard Contact und  $\mu=0,2$ ).

**Typ-A Schienen auf Träger geklemmt:** Die Schienenklemme ist mit einer „Tie Verbindung“ mit dem Obergurt starr verbunden. Die Berührungsflächen der Klemme und Schiene, sowie die Auflagefläche der Schiene am Oberflansch sind wiederum mit einer „Hard Contact“ und Reibungsbedingung ( $\mu=0,2$ ) modelliert. Hier wird nur das Abheben der Schiene verhindert, es wird keine Anpresskraft aufgebracht.

**Träger und Schiene starr miteinander verbunden:** Um eine komplett starre Verbindung zwischen Schiene und Obergurt herzustellen, wird die Schiene mittels einer „Tie Verbindung“ mit dem Oberflansch verbunden. Dieses Modell kam ausschließlich bei Blockschienen zum Einsatz.

### 4.3.2 Auflagerbedingungen

**Ebenbleiben des Querschnittes:** Das ebenbleiben des Querschnittes an den Auflagern, wird mittels eines Referenzpunktes und des Befehls „MPC Beam“ sichergestellt. (siehe Abbildung 4-3). Der „MPC Beam“ Befehl bewirkt, dass sich die mit dem Referenzpunkt verbundenen Flächen ident wie der Referenzpunkt verhalten (Rotation und Verschiebung).

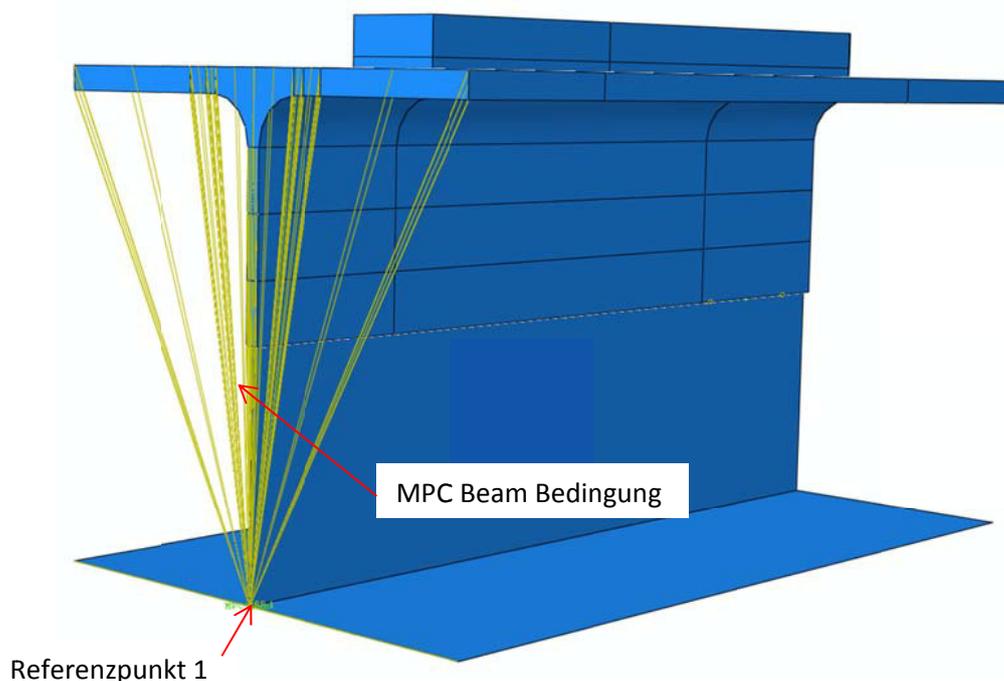


Abbildung 4-3: Referenzpunkt 1 und MPC Beam

**Endauflager:** Das Endauflager ist ein gelenkiges Auflager welches im Referenzpunkt 1 definiert wird. Dabei ist die Verschiebung des Punktes in alle Richtungen gesperrt, die Verdrehung bleibt jedoch frei.

**Symmetriebedingung:** Wie bereits erwähnt, sind die Systeme um die y-z Ebene symmetrisch, deswegen wird nur das halbe System modelliert und ein Symmetrielauger angesetzt (siehe Abbildung 4-4).

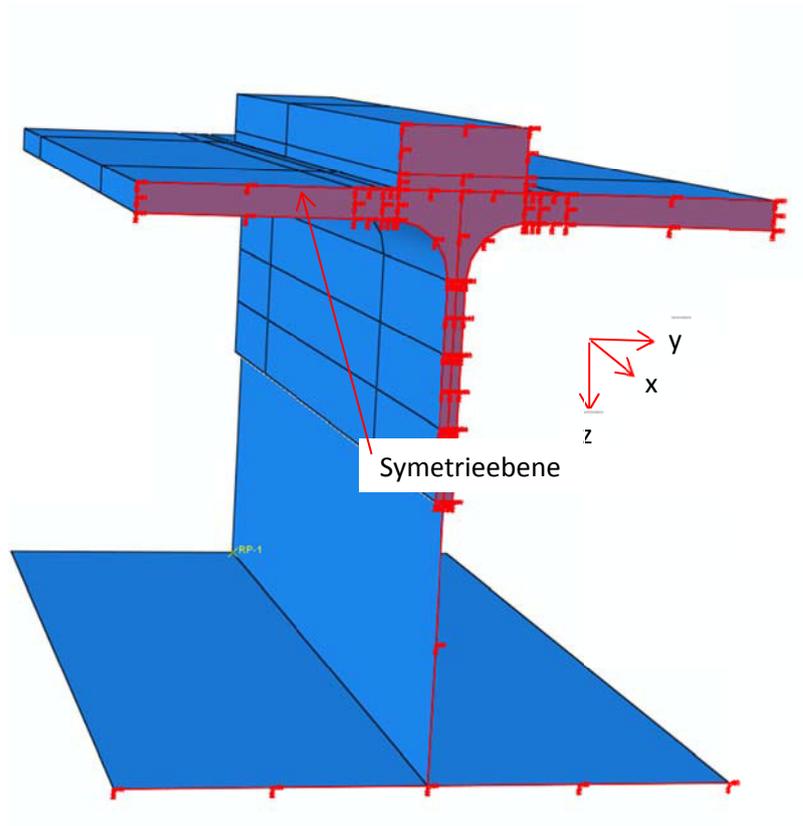


Abbildung 4-4: Symmetrielauger

### 4.3.3 Lasten

Laut EN 1993-6 [1] sind die Lasten welche auf Kranbahnschienen wirken, als Einzellasten zu betrachten. Einzellasten führen bei FE Analyse zu Singularitäten, welche zu großen lokalen Spannungsspitzen führen und somit das Ergebnis verfälschen. Deswegen wird die Last auf eine Fläche aufgebracht. Es wird davon ausgegangen, dass das Rad bei einer zentrischen Belastung über die volle Schienenbreite aufliegt, deswegen wird die Last über die gesamte Breite angesetzt. (siehe Abbildung 4-5)

Die Kontaktfläche der Schiene mit dem Rad wird mittels der Herz'schen Pressung bestimmt. Bei einer fiktiven Annahme eines Rades mit dem Durchmesser von 200 mm erhält man eine Kontaktfläche mit einer Breite von ca. 2mm.

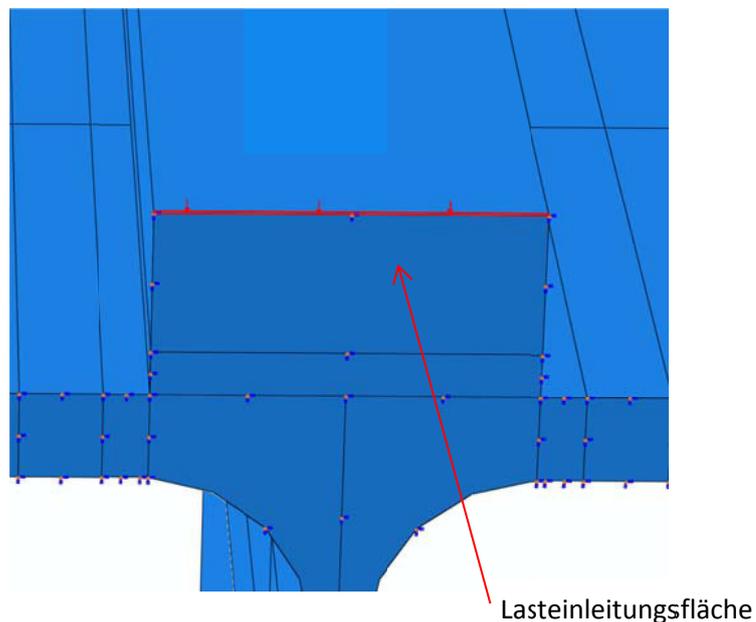


Abbildung 4-5: Fläche der zentrischen Belastung

Die exzentrische Last wird über eine Teilfläche mit einer Breite von 5mm auf die Schiene aufgebracht. (siehe Abbildung 4-6)

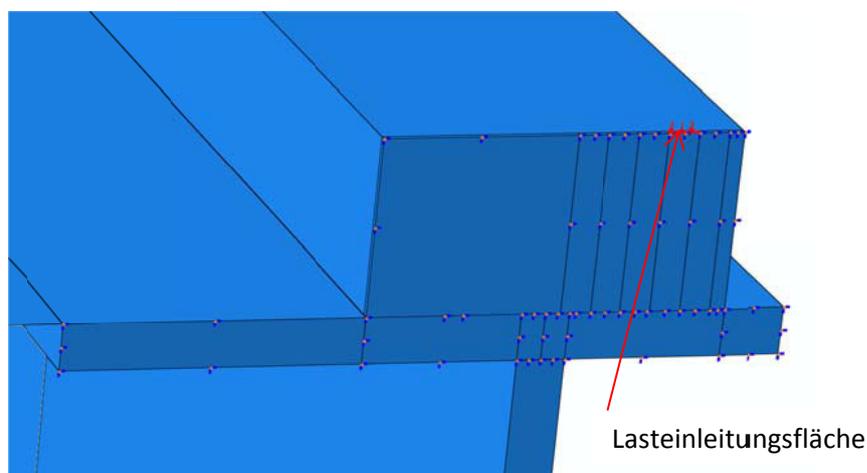


Abbildung 4-6: Last bei exzentrischer Belastung

## 4.4 FE Netz

Bei den Kastenquerschnitten sowie bei dem geschweißten I-Profil wird ausschließlich der Elementtyp „HEX – Structured“ (quaderförmige Elemente) eingesetzt. (siehe Abbildung 4-7)

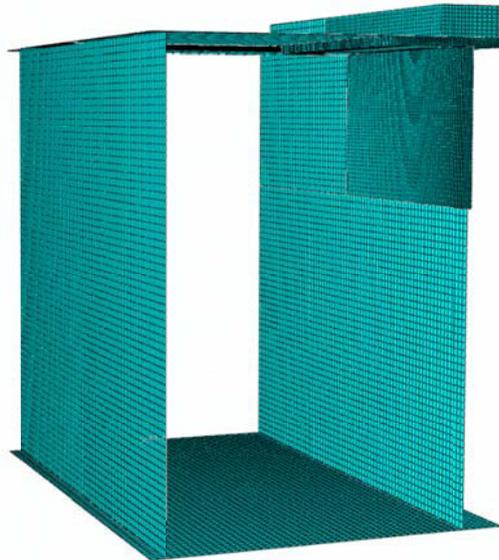


Abbildung 4-7: FE Netz Kastenquerschnitt

Beim gewalzten HEA300 Profil führen die „HEX-Structured“ Elemente im Bereich des Ausrundungsradius zu keinem gleichmäßigen FE Netz, deswegen werden in diesem Bereich Elemente des Type „Wedge-Sweep“ (dreiecksförmige Elemente) eingesetzt. (siehe Abbildung 4-8)

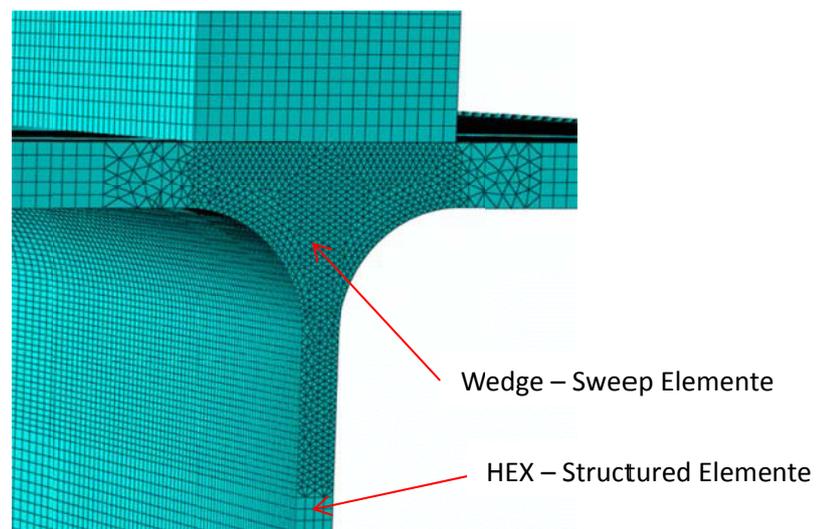


Abbildung 4-8: Wedge Sweep Elemente im Bereich der Ausrundung

Wie in der oberen Abbildung 4-8 erkenntlich ist, sind jene Bereiche, aus welchen die relevanten Spannungen abgelesen werden (Ende des Ausrundungsradius und oberer Bereich des Steges) mit einem feineren FE Netz berechnet. Die Netzgröße beträgt in diesen Bereichen je nach Profil. ca. 1-2 mm.

## 5 Laborversuche

Um mit den FE-Analysen eine bessere Aussage treffen zu können bzw. die Modelle so realitätsnah wie möglich gestalten zu können, werden an der TU Graz zwei Probekörper geprüft. Bei den Prüfungen werden die Dehnungen mittels fünf Dehnmessstreifen (DMS) gemessen. Im Zuge des Versuches werden für die LV „Experimentelle Methoden im Konstruktiven Ingenieurbau“ die Dehnungen auf einer Seite des Steges mittels der „Mercury Methode“ gemessen und mit einem zusätzlichen DMS überprüft. Bei den Vergleichen des Versuches mit der FE-Berechnung werden die Ergebnisse der Mercury Methode zusätzlich gezeigt, das Hauptaugenmerk liegt aber auf den Dehnmessstreifen. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle nicht genauer auf die Mercury Methode eingegangen.

Die beiden Prüfkörper sind so gewählt, dass sie jeweils mit einer aufgeschweißten und einer losen Schiene geprüft werden können. Um das zu bewerkstelligen wird die geschweißte Schiene nicht ganz bis zu den Auflagern gezogen, damit ist es möglich den Prüfkörper umzudrehen und auf der anderen Seite mit einer losen Schiene zu prüfen. (siehe Abbildung 5-2)

Um sicherzustellen, dass die Querschnitte während der Versuche nicht plastizieren, wurden im Vorfeld mittels FE-Berechnungen die maximalen Belastungen der unterschiedlichen Laststellungen bestimmt und während der Versuche laufend die Dehnungen kontrolliert.

Bevor mit den Prüfungen begonnen wurde, werden die Hauptabmessungen der Prüfkörper überprüft. Dabei stellte sich heraus, dass das HEA 300 Profil einen 9mm dicken Steg aufweist. Laut den genormten Werten sollte dieser nur 8.5 mm betragen. Um möglichst genaue Vergleiche zu erhalten, werden die FE-Modelle bei den Vergleichsrechnungen ebenfalls mit 9 mm dicken Stegblechen modelliert.

## 5.1 Umfang der Laborversuche

Die Laborversuche werden mit zwei Prüfkörpern durchgeführt. Jeder dieser Prüfkörper wird mit zwei verschiedenen Schienenbefestigungen (lose und geschweißt), sowie mit verschiedenen Lastexzentrizitäten geprüft. In folgender Tabelle ist der Umfang der Laborversuche dargestellt.

Tabelle 5-1: Umfang der Laborversuche

Bezeichnung	Prüfkörper	Schienenbefestigung	Last Exzentrizität e [mm]
1.0.0	HEA300	keine Schiene	0
1.1A.0	HEA300	lose Schiene	0
1.1C.0	HEA300	geschweißte Schiene	0
1.1C.1	HEA300	geschweißte Schiene	5
1.1C.2	HEA300	geschweißte Schiene	10
1.1C.3	HEA300	geschweißte Schiene	15
1.1C.4	HEA300	geschweißte Schiene	20
1.1C.5	HEA300	geschweißte Schiene	25
3.0.0	Kastenquerschnitt	keine Schiene	0
3.1A.0	Kastenquerschnitt	lose Schiene	0
3.1C.0	Kastenquerschnitt	geschweißte Schiene	0
3.1C.1	Kastenquerschnitt	geschweißte Schiene	5
3.1C.2	Kastenquerschnitt	geschweißte Schiene	10
3.1C.3	Kastenquerschnitt	geschweißte Schiene	15
3.1C.4	Kastenquerschnitt	geschweißte Schiene	20

## 5.2 Probekörper 1 - HEA 300

Am Prüfkörper werden auf einer Seite zehn DMS angebracht, wobei die DMS 1 bis 5, wie in der Abbildung 5-2 dargestellt, für die Messung der ersten beiden Versuche 1.0.0 und 1.1A.0 (ohne Schiene, lose Schiene) vorgesehen sind. In Abbildung 5-1 ist der HEA 300 Prüfkörper mit den aufgeklebten DMS dargestellt.



Abbildung 5-1: Dehnmessstreifen (DMS) mit Nummerierung an HEA300

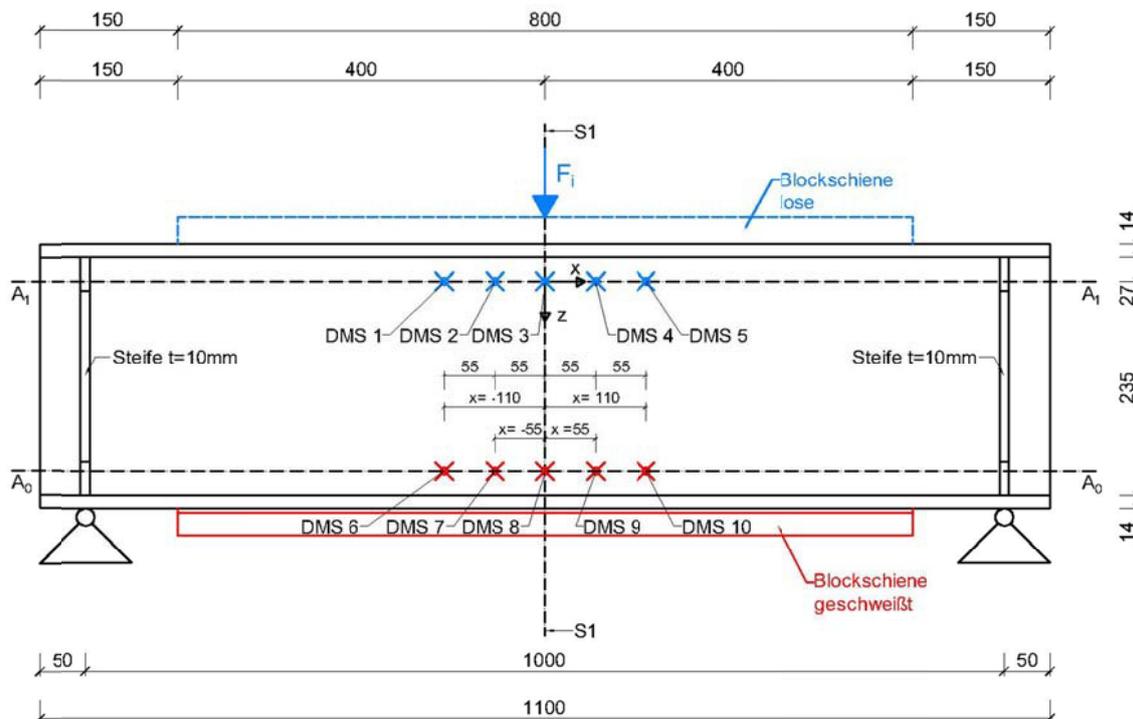


Abbildung 5-2: Probekörper 1 HEA300 für die Versuche 1.0.0 und 1.1A1.0 (ohne Schiene, lose Schiene)

In Abbildung 5-3 wird der Versuchsaufbau des HEA 300 Prüfkörpers für den Versuch 1.0.0 (ohne Schiene) dargestellt.



Abbildung 5-3: Versuchsaufbau HEA300 ohne Schiene

In Abbildung 5-4 ist der Schnitt S1 durch den HEA300 Prüfkörper für die Versuche 1.0.0 und 1.1A.0 (ohne Schiene, lose Schiene) dargestellt.

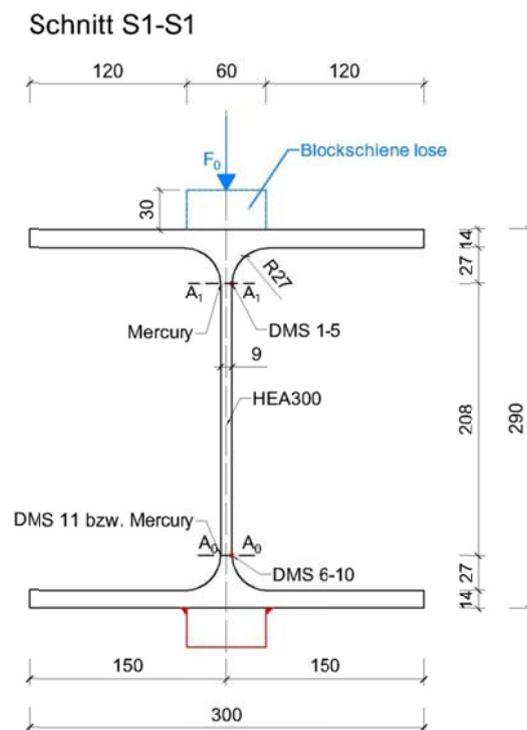


Abbildung 5-4: Schnitt S1

Für die Versuche mit der aufgeschweißten Schiene wird das Profil umgedreht und die Messung erfolgt mit den DMS 6 bis 10. (siehe Abbildung 5-5)

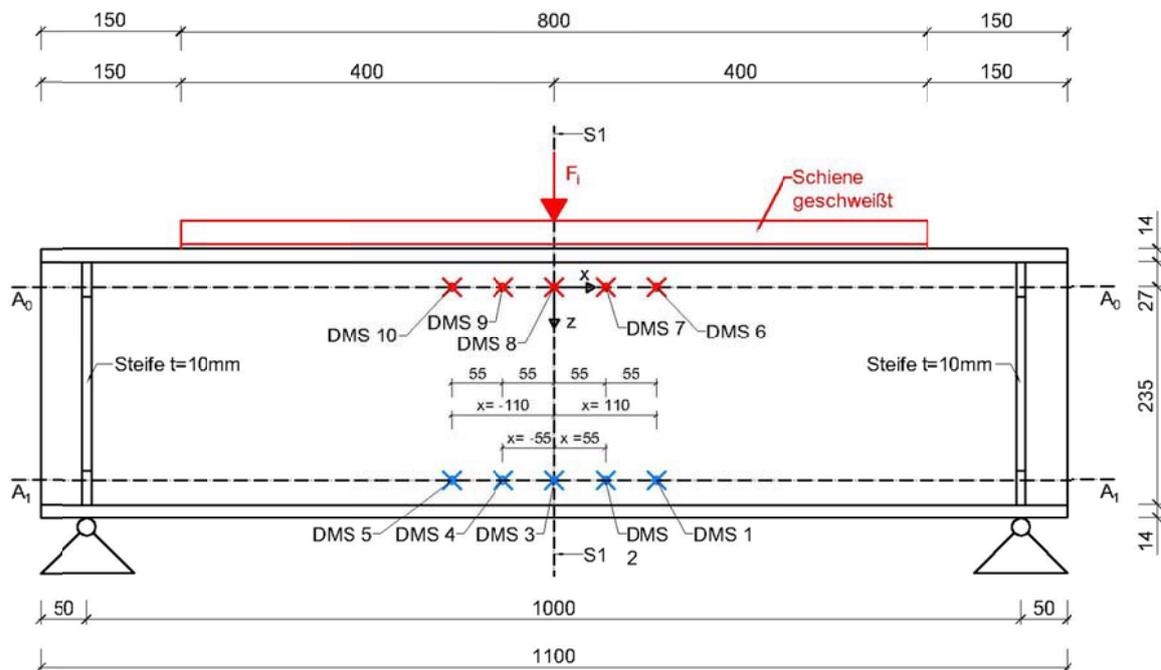


Abbildung 5-5: Probekörper 1 HEA300 für die Versuche mit geschweißter Schiene

In Abbildung 5-6 wird der Versuchsaufbau des HEA 300 Prüfkörpers für die Versuche mit aufgeschweißter Schiene dargestellt.



Abbildung 5-6: Versuchsaufbau HEA300 mit aufgeschweißter Schiene

In Abbildung 5-7 ist der Schnitt S1 durch den HEA300 Prüfkörper für die Versuche mit der aufgeschweißten Schiene dargestellt.

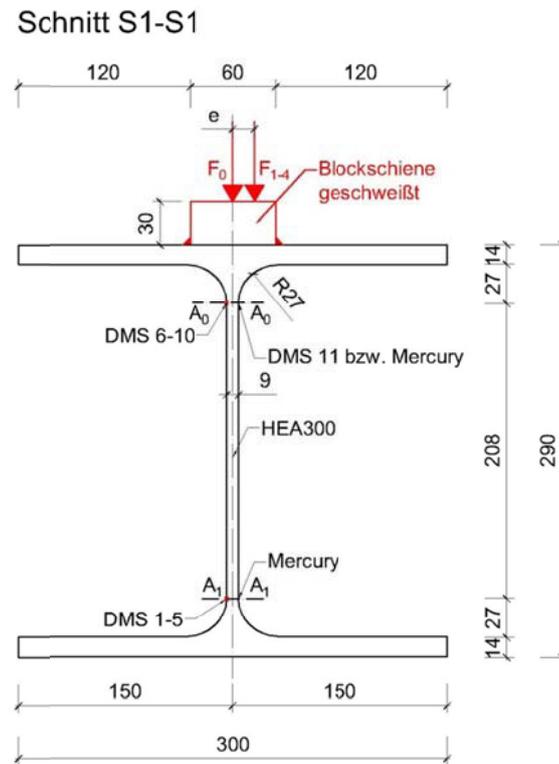


Abbildung 5-7: Schnitt S1

### 5.3 Probekörper 2 Kastenquerschnitt

Analog zum Prüfkörper 1 wird auch der Kastenquerschnitt an der Innenseite des Kastens mit zehn DMS bestückt (jeweils 5 unten und 5 oben), dafür wurde im gegenüberliegenden Steg, welcher nicht geprüft wird eine Öffnung vorgesehen.

Die Abbildung 5-8 und Abbildung 5-9 zeigen die Position der DMS im Kastenquerschnitt.



Abbildung 5-8: Dehnmessstreifen (DMS) im inneren des Hohlkastens

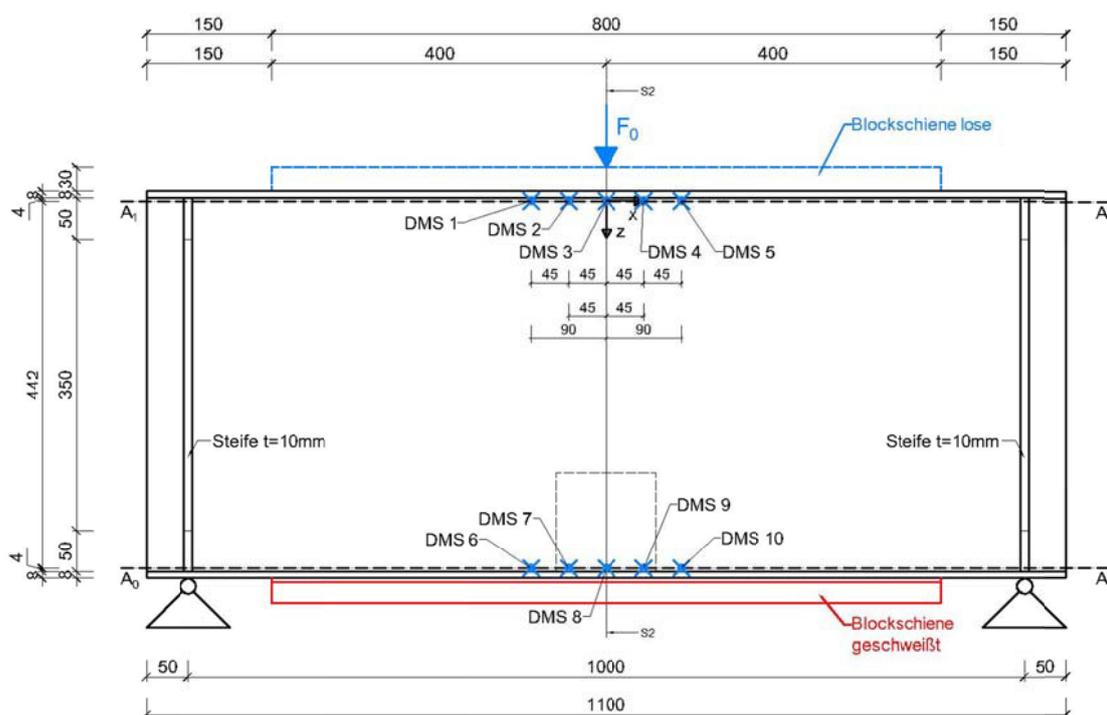


Abbildung 5-9: Probekörper 2 für 3.0.0 und 3.1A.0 (ohne Schiene u. lose Schiene)

In Abbildung 5-10 wird der Versuchsaufbau des Kastenquerschnittes für den Versuch 2.0.0 (ohne Schiene) dargestellt.



Abbildung 5-10: Versuchsaufbau KQ ohne Schiene

In Abbildung 5-11 ist der Schnitt S1 durch den Kastenquerschnitt für die Versuche 2.0.0 und 2.1A.0 (ohne Schiene und lose Schiene) dargestellt.

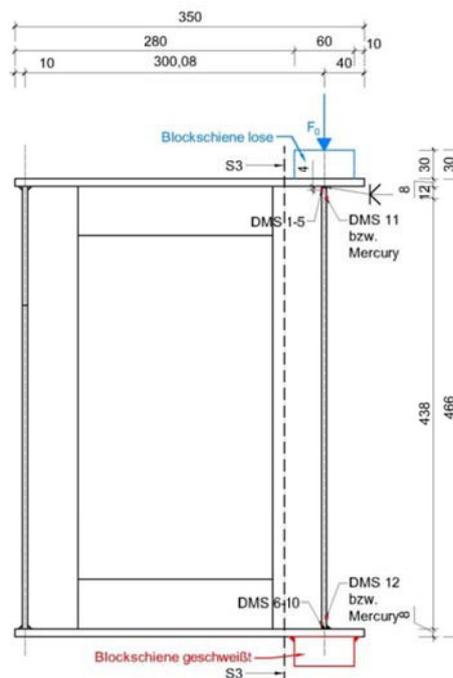


Abbildung 5-11: Schnitt S3 Probekörper2

Für die Versuche mit der aufgeschweißten Schiene wird das Profil umgedreht und die Messung erfolgt mit den DMS 6 bis 10. (siehe Abbildung 5-12)

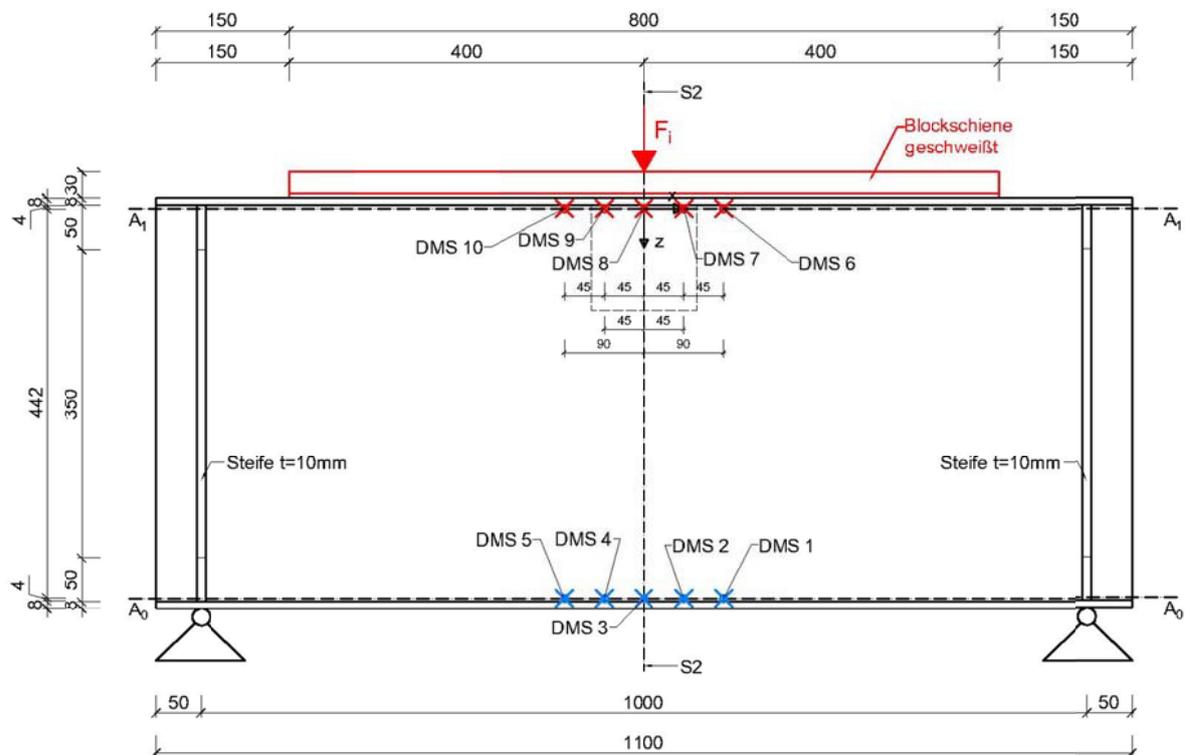


Abbildung 5-12: Prüfkörper 2 für Versuche mit geschweißter Schiene

In Abbildung 5-13 wird der Versuchsaufbau des Kastenquerschnittes für die Versuche mit aufgeschweißter Schiene dargestellt.

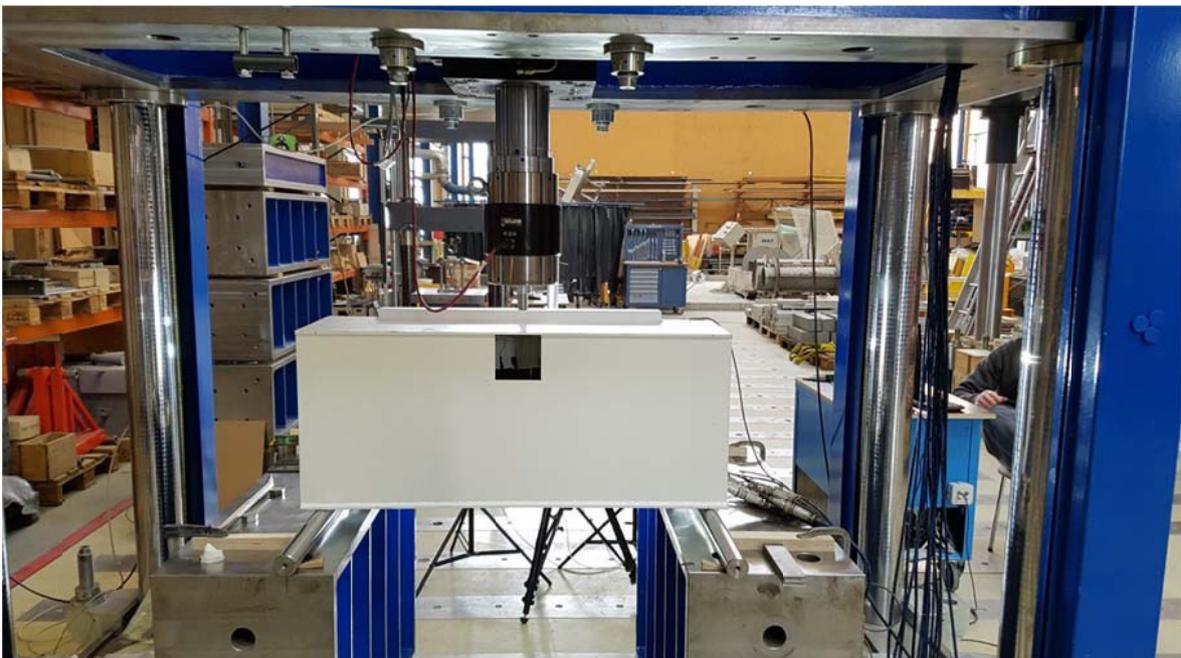


Abbildung 5-13: Versuchsaufbau KQ mit aufgeschweißter Schiene

In Abbildung 5-14 ist der Schnitt S1 durch den Kastenquerschnitt für die Versuche mit aufgeschweißter Schiene dargestellt

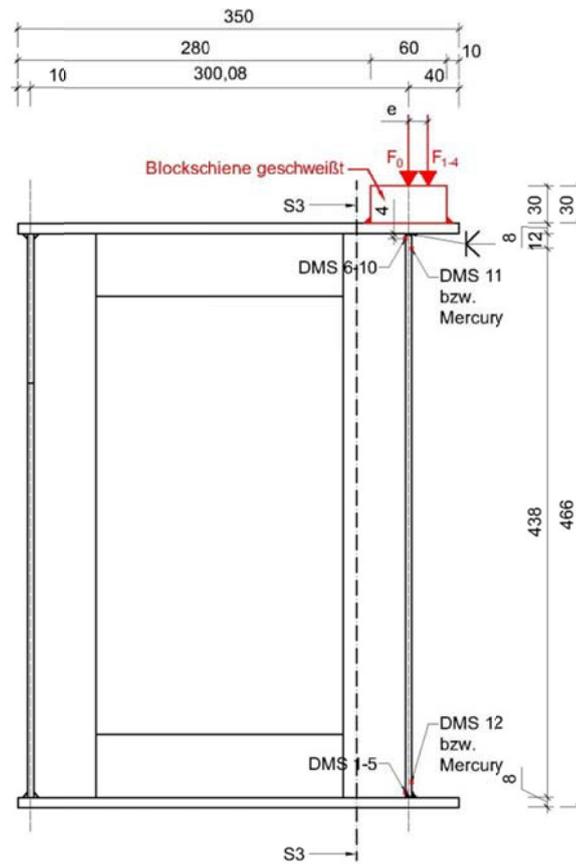


Abbildung 5-14: Schnitt S3 Prüfkörper 2

## 5.4 Laststellungen

Beide Prüfkörper werden mit verschiedenen Lastexzentrizitäten geprüft. Die Versuche ohne Schiene bzw. mit loser Schiene werden nur mit zentrischer Laststellung durchgeführt.

Da die Abmessungen der Blockschiene bei beiden Prüfkörpern gleich sind, wird nur das Belastungsschema des HEA 300 Prüfkörpers dargestellt.

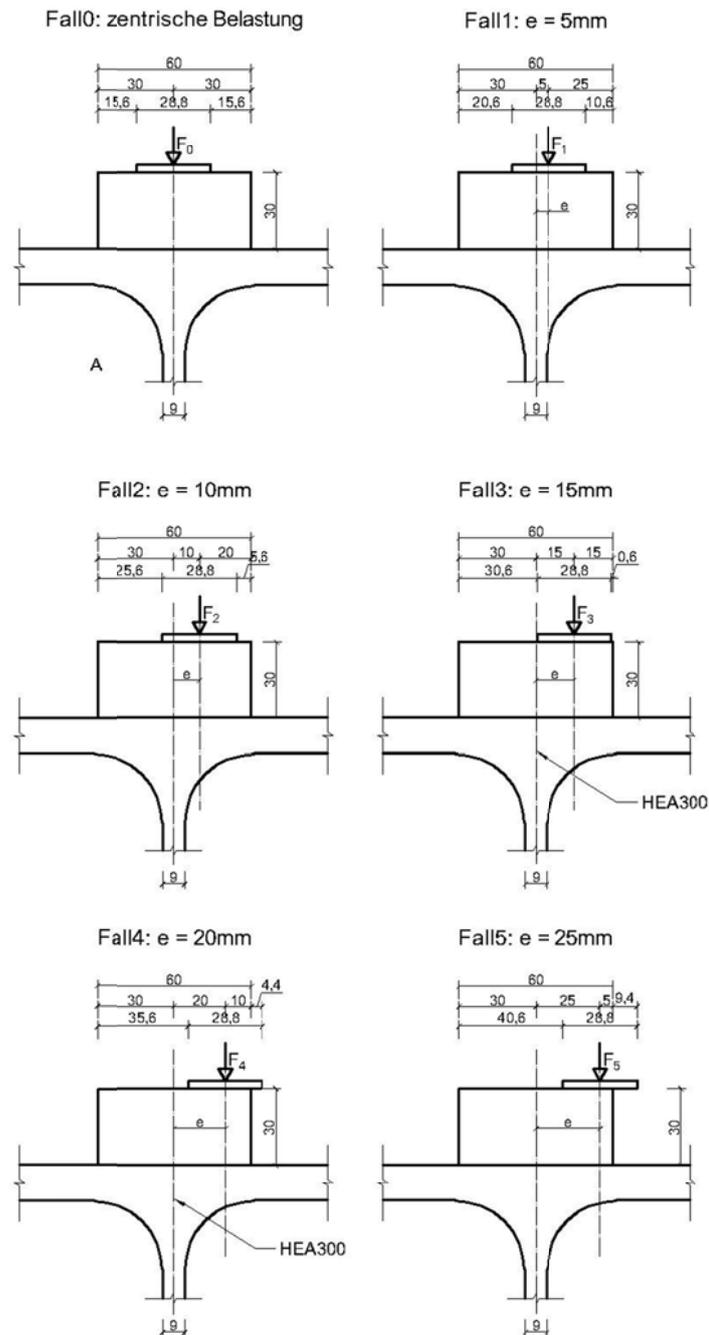


Abbildung 5-15: Laststellung der einzelnen Versuche

## 5.5 Prüfkörper nach Traglastversuch

Bei den Versuchen wird als letzte Prüfung ein Traglastversuch durchgeführt, bei dem der Querschnitt bis zum Versagen (Stegbeulen) belastet wird. Folgende Bilder zeigen einen Schnitt durch die Prüfkörper. Die bleibenden plastischen Verformungen sind deutlich zu erkennen.



Abbildung 5-16: HEA 300 nach Traglastversuch

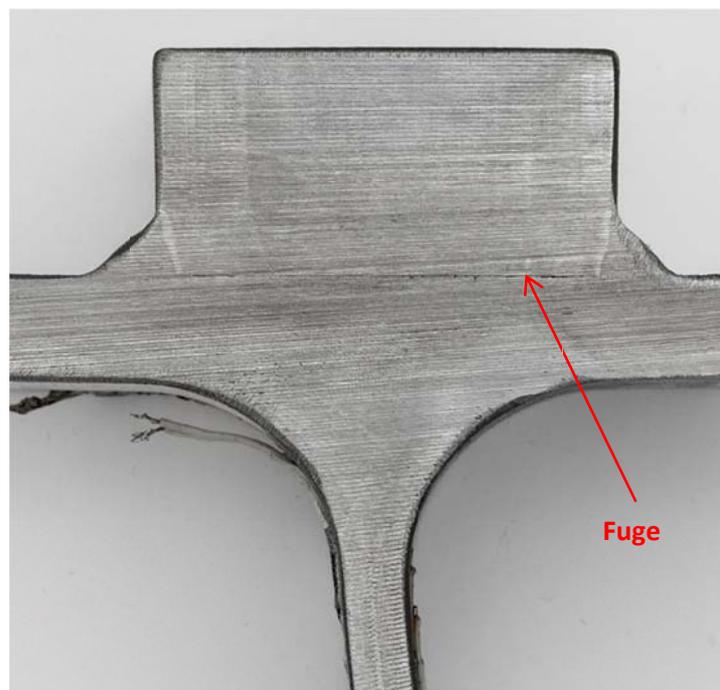


Abbildung 5-17: Schweißverbindung Schiene auf Oberflansch (HEA300)



Abbildung 5-18: Kastenquerschnitt 1 nach Traglastversuch

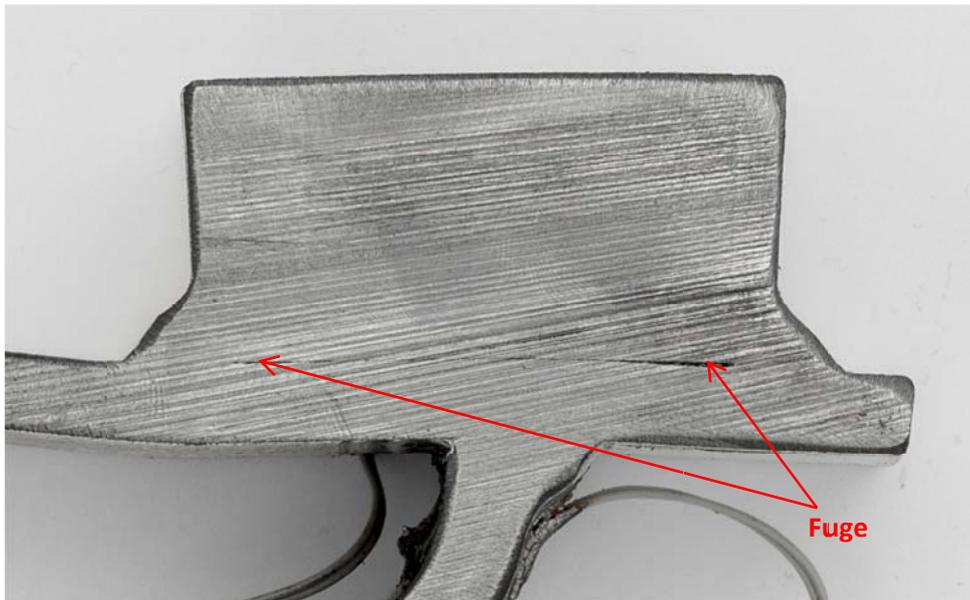


Abbildung 5-19: Schweißverbindung Schiene auf Oberflansch (Kastenquerschnitt 1)

## 5.6 Vergleich der Ergebnisse mit der FE – Analyse

Die bei den Versuchen gemessenen Dehnungen, werden mit jenen aus der FE-Analyse verglichen.

### 5.6.1 Umrechnung der Normspannungen in Dehnungen HEA300

Laut EN 1993-6 [1] werden die maximalen lokalen Spannungen im Steg (wie in 3.1 beschrieben) bestimmt und nicht wie beim Versuch die Dehnungen. Bei der Umrechnung der Spannungen, muss die Querkontraktion berücksichtigt werden. Dies kann näherungsweise über einen Korrekturfaktor erfolgen, welcher beispielhaft mit den Ergebnissen der Normberechnung des HEA Querschnittes ohne Schiene, wie folgt bestimmt wird.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xz} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\vartheta & 0 \\ -\frac{\vartheta}{E} & \frac{1}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} * \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xz} \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

Daraus folgt:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} * (\sigma_z - \vartheta * \sigma_x) \quad (4.2)$$

Bestimmung des Korrekturfaktors für Prüfkörper 1 (siehe Abbildung 5-2):

Die Spannungen im Schnitt A<sub>0</sub>, sind in folgender Tabelle aufgelistet.

Tabelle 5-2: Parameter zur Bestimmung des Korrekturfaktors

Bezeichnung	
F	120 kN
$\sigma_{x,max}$	17,07 N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{z,max}$	173,10 N/mm <sup>2</sup>
$\nu$	0,3
E	210000 N/mm <sup>2</sup>

$$\sigma_x = \frac{17,07}{173,10} * \sigma_y = 0,0986 * \sigma_y$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{210000} * (\sigma_z - 0,3 * 0,0986 * \sigma_x) \rightarrow \varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} * \mathbf{0,9704}$$

Die in den folgenden Ergebnissen gezeigten Dehnungen basierend auf der Normberechnung sind mit dem berechneten Faktor **0,9704** korrigiert.

### 5.6.2 HEA 300 ohne Schiene, System 1.0.0

Abbildung 5-20 zeigt das Ergebnis der FE-Berechnung und den für die Auswertung abgelesenen Pfad.

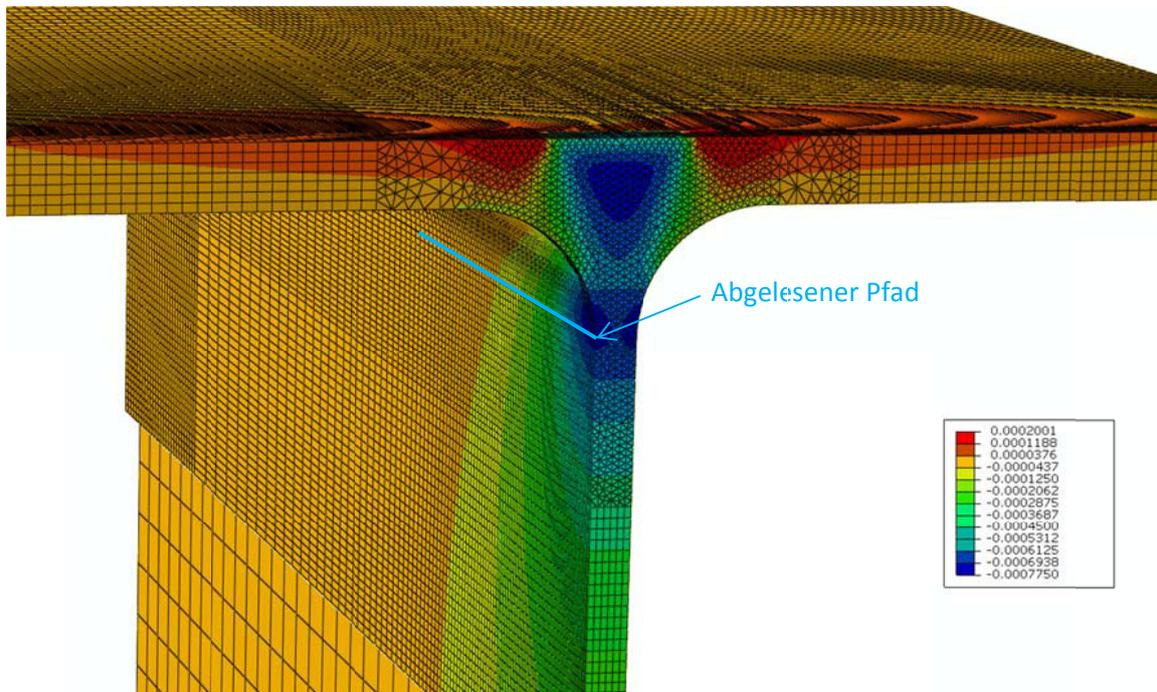


Abbildung 5-20: Dehnungen  $\varepsilon_y$  aus FE-Analyse mit 120 kN (Träger in  $x = 0$  vertikal geschnitten)

Folgendes Diagramm zeigt den Vergleich der Dehnungen aus dem Laborversuch und der Dehnungen aus der FE-Berechnung sowie die maximale Dehnung nach EC.

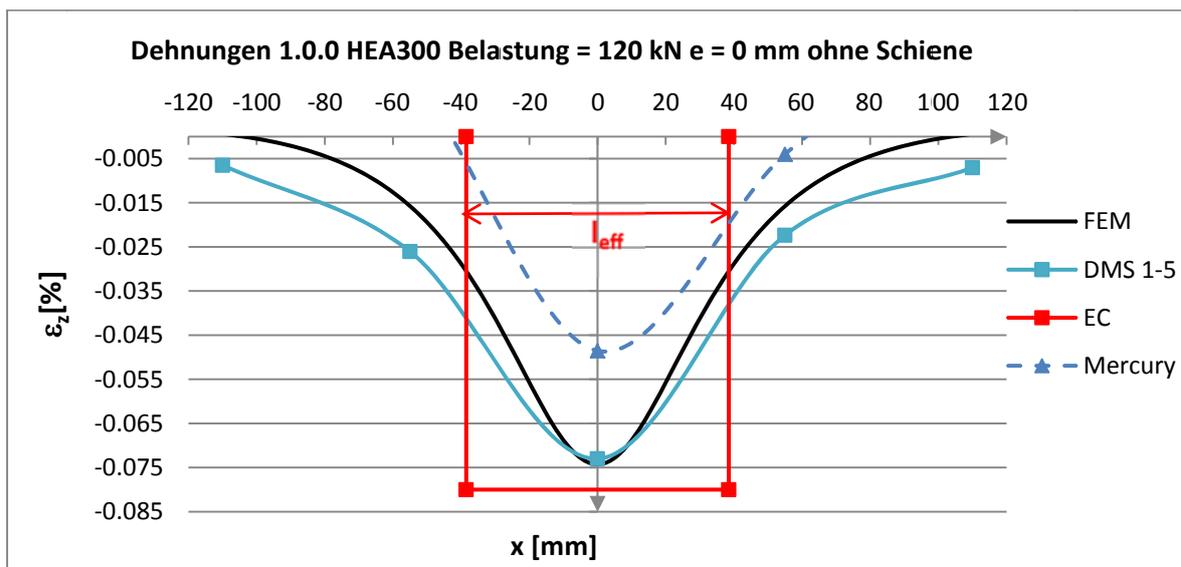


Abbildung 5-21: Vergleich der Dehnungen von 1.0.0 (ohne Schiene)

Der Vergleich der maximalen Dehnungen ist in Tabelle 5-3 dargestellt.

Tabelle 5-3: Vergleich der Maximalwerte

Maximale Dehnungen $\varepsilon_z$		
FE-Analyse	[%]	-0,07426
Versuch	[%]	-0,07299
Eurocode	[%]	-0,07998
Abweichung Versuch zu FE	[ $\Delta$ %]	<b>-1,71</b>
Abweichung Versuch zu Eurocode	[ $\Delta$ %]	<b>-8,73</b>

Die in Abbildung 5-21 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die Dehnungen der FE-Analyse mit jenen aus dem Versuch im Bereich des Maximalwertes ( $x = 0$ ) sehr gut übereinstimmen. Der nach EN 1993-6 [1] berechnete Dehnungswert liegt 8,73% über jenem aus dem Versuch, dies kann daran liegen, dass bei der Berechnung nach Eurocode [1] von einer Punktlast ausgegangen wird und die Belastung beim Versuch, sowie bei der FE Berechnung über eine kreisförmige Fläche von 651.44 mm<sup>2</sup> (Fläche des Stempels beim Versuch) eingeleitet wird. Bei den weiteren Ergebnissen mit der Blockschiene hat die Lasteinleitungsfläche weniger Einfluss, da die Schiene lastverteilend mitwirkt.

### 5.6.3 HEA300 mit loser Schiene, System 1.1A.0

Abbildung 5-22 zeigt das Ergebnis der FE-Berechnung und den für die Auswertung abgelesenen Pfad.

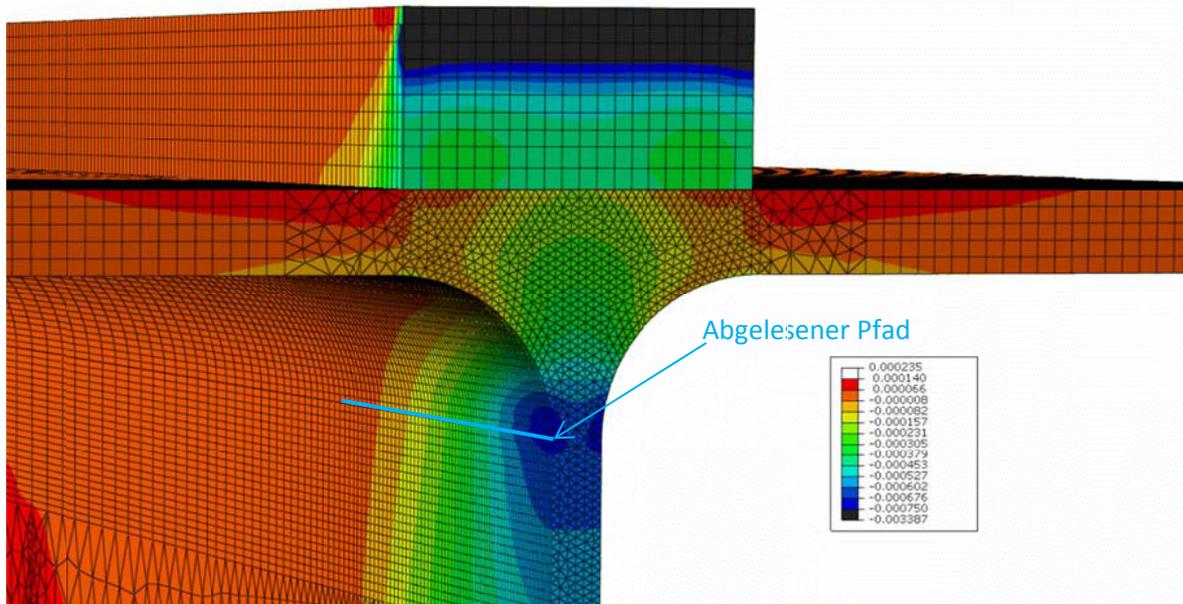


Abbildung 5-22: Absolute Dehnungen  $\varepsilon_y$  mit 150 kN (Träger in  $x = 0$  vertikal geschnitten)

Folgendes Diagramm zeigt den Vergleich der Dehnungen aus dem Laborversuch und der Dehnungen aus der FE-Berechnung sowie die maximale Dehnung nach EC.

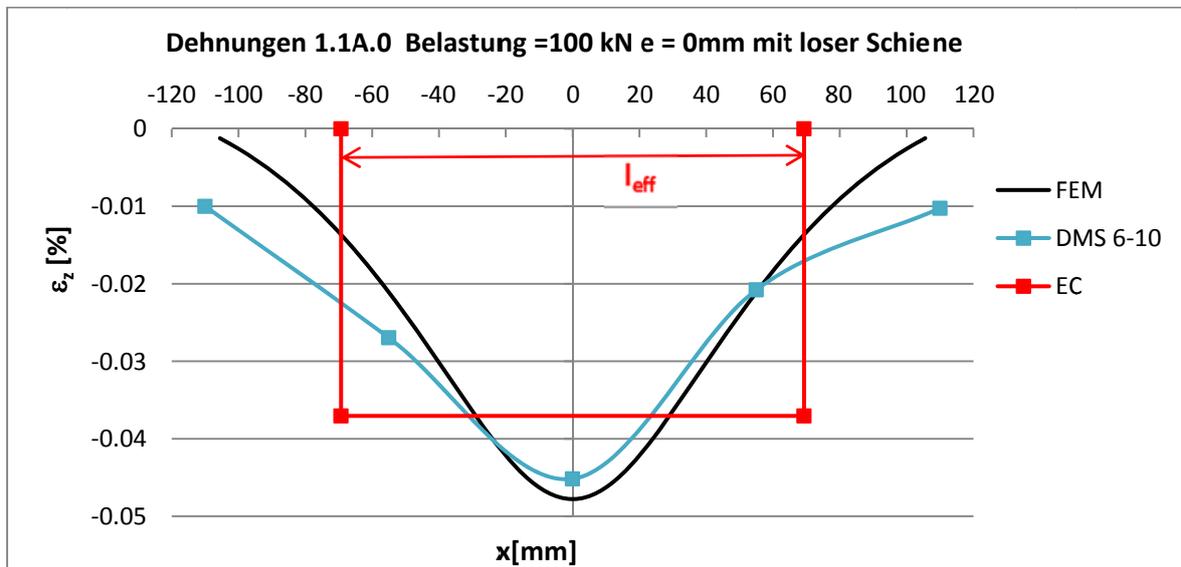


Abbildung 5-23: Vergleich der Dehnungen von 1.1A.0 (mit loser Schiene)

Der Vergleich der maximalen Dehnungen ist in Tabelle 5-4 dargestellt.

Tabelle 5-4: Vergleich der Maximalwerte

Maximale Dehnungen $\varepsilon_z$		
FE-Analyse	[%]	-0,0478
Versuch	[%]	-0,0452
Eurocode	[%]	-0,0370
Abweichung Versuch zu FE	[ $\Delta$ %]	<b>-5,47</b>
Abweichung Versuch zu Eurocode	[ $\Delta$ %]	<b>22,16</b>

Die Berechnung der Dehnungen, welche in Abbildung 5-22 gezeigt werden, wurden mit einer Belastung von 150 kN durchgeführt, der Versuch jedoch nur mit 100 kN, deswegen sind die Werte nicht mit jenen von Abbildung 5-23 ident. Durch das linearelastische Materialverhalten können diese aber auf eine beliebige Belastung umgerechnet werden.

Aufgrund der geringen Dehnungen führt die Messung mittels Mercury Methode hier zu keinem brauchbaren Ergebnis. Auf eine Darstellung der entsprechenden Messergebnisse wurde daher verzichtet.

## 5.6.4 HEA300 mit aufgeschweißter Blockschiene und Zentrischer Belastung

### 1.1C.0

Beim Vermessen des HEA 300 Prüfkörpers, hat sich herausgestellt, dass aufgrund der Querschnitts- und Schweißimperfectionen die Flansche leicht nach oben geneigt sind. Aus diesem Grund entsteht zwischen der Blockschiene und der Flanschoberfläche ein geringer Spalt und die Lasteinleitung in das Profil erfolgt größtenteils über die Schweißnähte, siehe Abbildung 5-24 und Abbildung 5-25.



Abbildung 5-24: HEA 300 schräge Flansche am Auflager

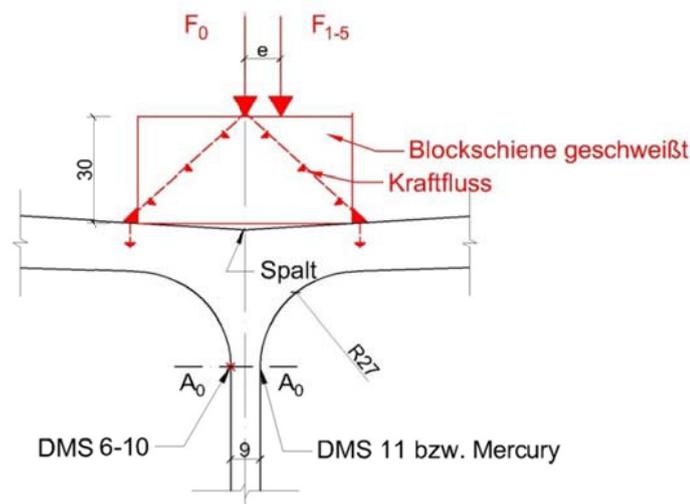


Abbildung 5-25: HEA300 mit Imperfectionen überhöht dargestellt

Um diesen Effekt in der FE-Analyse näherungsweise durch eine Grenzwertbetrachtung zu berücksichtigen, wurden bei allen Berechnungen zwei Fälle unterschieden.

Fall1: Schiene hat keinen Kontakt mit Oberflansch (FEM\_ohneKontakt)

Fall2: Schiene hat vollflächigen Kontakt mit Oberflansch (FEM\_mitKontakt)

Abbildung 5-26 zeigt exemplarisch das Ergebnis der FE-Berechnung mit 150 kN und den für die Auswertung abgelesenen Pfad.

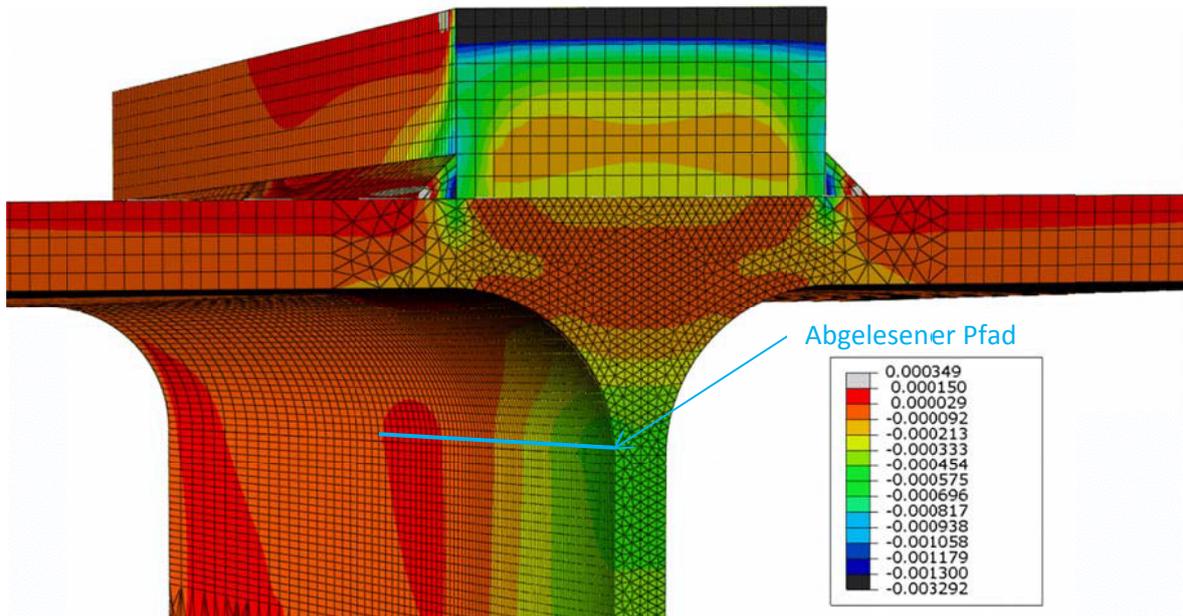


Abbildung 5-26: Absolute Dehnungen  $\varepsilon_z$  mit zentraler Belastung Krafteinleitung über Schweißnähte (ohne Kontakt) mit 150 kN

Die folgenden vier Diagramme zeigen den Vergleich der mittels FE-Berechnung ermittelten Dehnungen für die beiden oben beschriebenen Fälle und der gemessenen Daten aus dem Versuch. Zusätzlich ist der nach EN 1993-6 [1] ermittelte Maximalwert und  $l_{\text{eff}}$  aufgetragen.

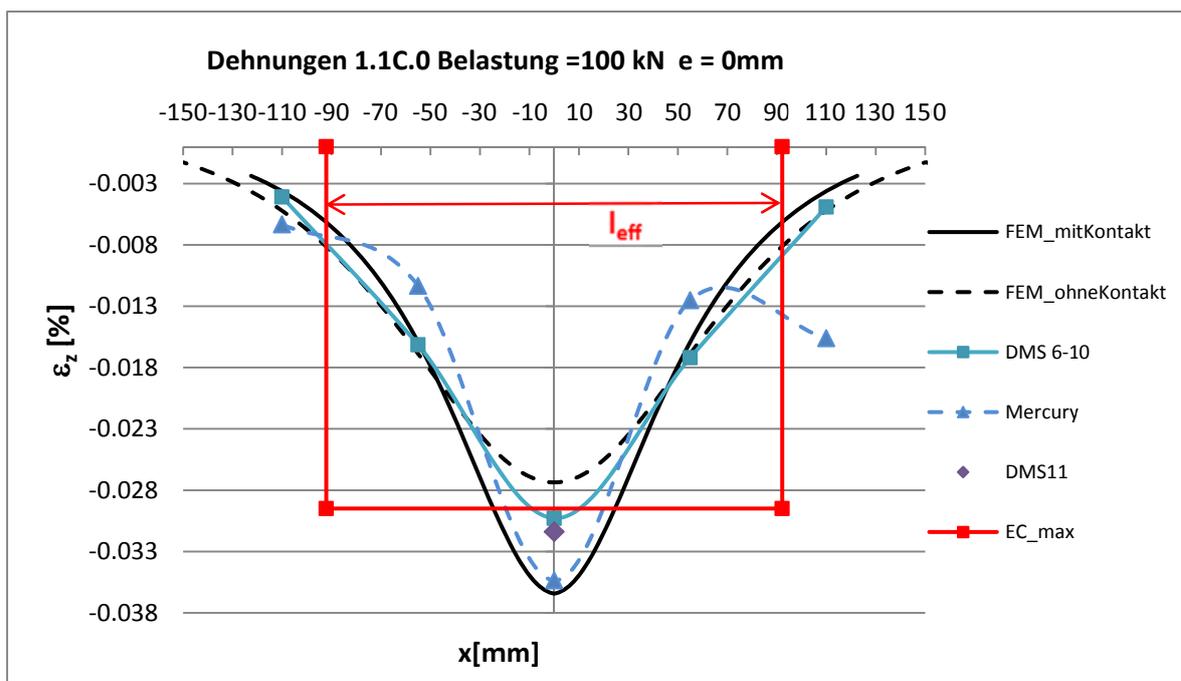


Abbildung 5-27: Vergleich FE-Analyse mit Versuch bei zentraler Belastung mit 100 kN (geschweißte Schiene)

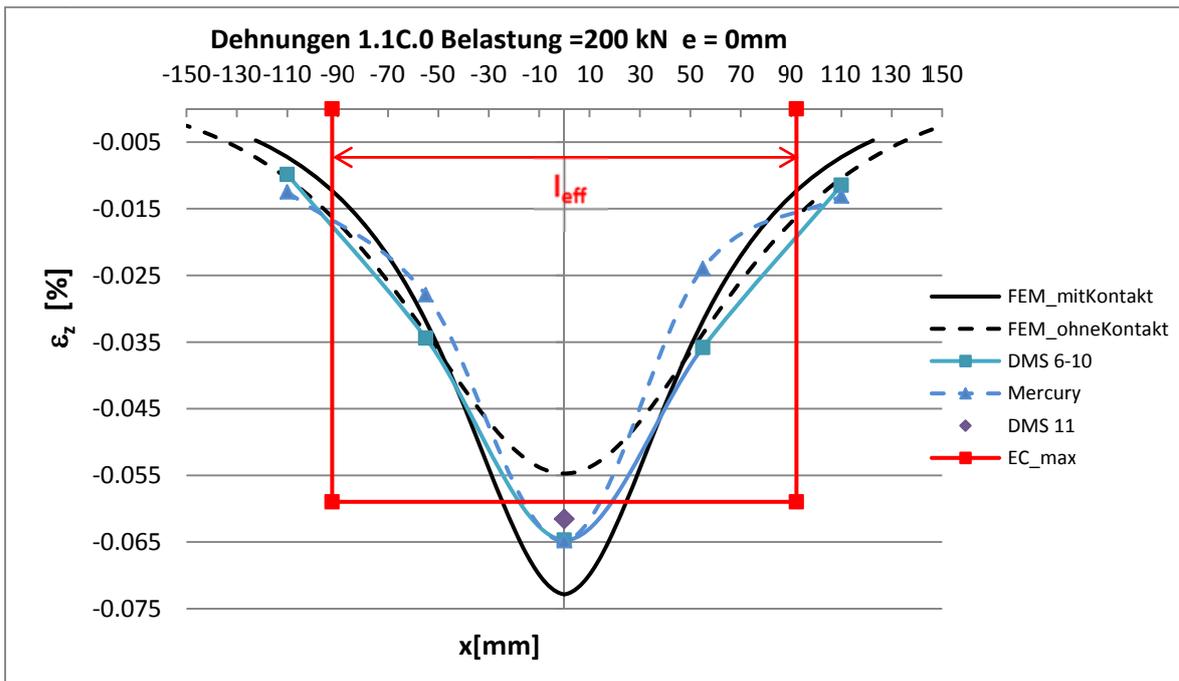


Abbildung 5-28: Vergleich FE-Analyse mit Versuch bei zentrischer Belastung mit 200 kN (geschweißte Schiene)

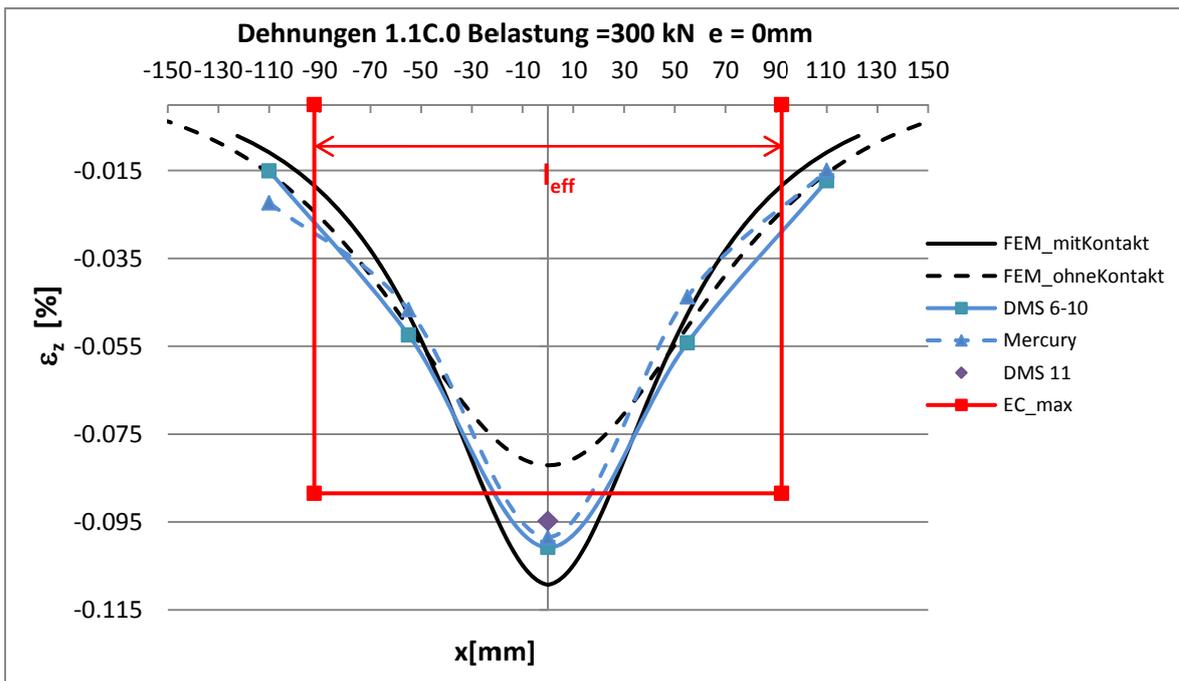


Abbildung 5-29: Vergleich FE-Analyse mit Versuch bei zentrischer Belastung mit 300 kN (geschweißte Schiene)

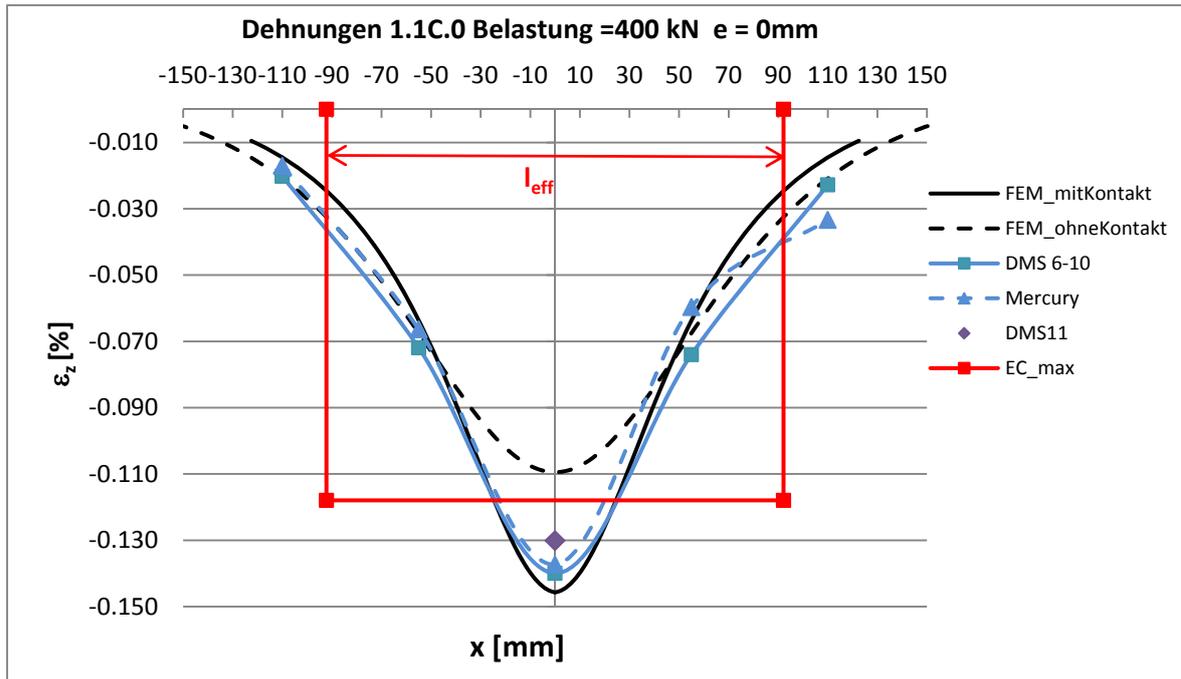


Abbildung 5-30: Vergleich FE-Analyse mit Versuch bei zentraler Belastung mit 400 kN (geschweißte Schiene)

Tabelle 5-5: Zusammenfassung der Ergebnisse zentrischer Versuch 1.1A.0

<b>Zusammenfassung der Ergebnisse HEA300 zentrische Belastung</b>					
		Belastung [kN]			
<b>Dehnung</b>		<b>100</b>	<b>200</b>	<b>300</b>	<b>400</b>
DMS 8	[%]	-0.0303	-0.0647	-0.1008	-0.1399
DMS 11	[%]	-0.0314	-0.0615	-0.0948	-0.1301
FEM ohne Kontakt	[%]	-0.0274	-0.0547	-0.0821	-0.1095
FEM mit Kontakt	[%]	-0.0364	-0.0729	-0.1093	-0.1457
EC	[%]	-0.0295	-0.0590	-0.0885	-0.1180
<b>Vergleiche</b>					
Vergleich DMS 8 zu FEM ohne Kontakt	[%]	<b>10.7</b>	<b>18.2</b>	<b>22.8</b>	<b>27.9</b>
Vergleich DMS 8 zu FEM mit Kontakt	[%]	<b>-16.9</b>	<b>-11.2</b>	<b>-7.8</b>	<b>-4.0</b>
Vergleich DMS 8 zu EC	[%]	<b>2.7</b>	<b>9.7</b>	<b>13.9</b>	<b>18.6</b>
Vergleich FEM ohne Kontakt zu EC	[%]	<b>-7.2</b>	<b>-7.2</b>	<b>-7.2</b>	<b>-7.2</b>
Vergleich FEM mit Kontakt zu EC	[%]	<b>23.6</b>	<b>23.6</b>	<b>23.6</b>	<b>23.6</b>

Die in den Abbildung 5-27 bis Abbildung 5-30 und in Tabelle 5-5 ersichtlichen Ergebnisse zeigen, dass die Messergebnisse bei einer niedrigen Belastung (100kN) eher mit jenen aus der Berechnung, in welcher die Last über die Schweißnähte (Schiene ohne Kontakt mit Flansch) eingeleitet wird, übereinstimmen. Bei dem Versuch mit der höchsten Belastung (400 kN) beträgt die Dehnung des DMS 8 Messpunktes nur noch 4% weniger als die Dehnung der Berechnung mit vollem Kontakt.

Die berechneten Ergebnisse nach EN 1993-6 [1] sind bei allen vier verglichenen Belastungen geringer als die Messergebnisse. Bei der maximalen untersuchten Belastung (400 kN) beträgt die Differenz zur Messung bereits 18,6%.

Es muss davon ausgegangen werden, dass die Schiene bei einer Kranbahn an mehreren Stellen vollen Kontakt zum Flansch hat. Die Berechnung mit vollem Kontakt von Schiene und Oberflansch ergeben die maximalen Spannungen. Aus diesem Grund werden die Berechnungen für die Parameterstudie immer mit vollem Kontakt durchgeführt, damit wird sichergestellt, dass die Ergebnisse der FE-Berechnung ein konservatives Ergebnis ergeben.

## 5.6.5 HEA 300 mit aufgeschweißter Blockschiene und exzentrischer Belastung

### 1.1C.1-5

Bei der FE-Analyse wurden auch hier wie im Abschnitt 5.6.4 beschrieben für jede Belastung 2 Fälle unterschieden.

Fall1: Schiene hat keinen Kontakt mit Oberflansch (FEM\_ohneKontakt)

Fall2: Schiene hat vollflächigen Kontakt mit Oberflansch (FEM\_mitKontakt)

Abbildung 5-3 zeigt exemplarisch das Ergebnis der FE-Berechnung für das System 1.1C.3 mit 99 kN und den für die Auswertung abgelesenen Pfade.

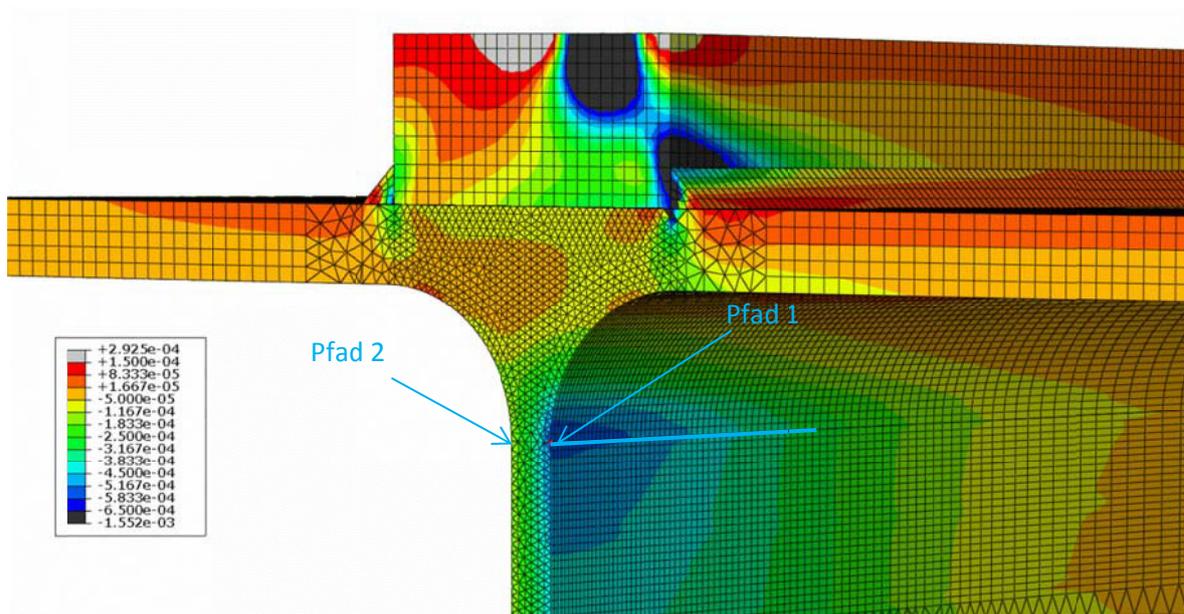


Abbildung 5-31: Dehnungen für System 1.1C.3 mit  $e=15\text{mm}$  und 99kN

Aus der FE Berechnung werden jeweils 2 Pfade für den Vergleich ausgelesen (siehe Abbildung 5-31 und Abbildung 5-32). Wobei der Pfad 1 (P1) die maximale Dehnung (FEM\_max...) und der Pfad 2 (P2) die minimale Dehnung (FEM\_min...) wiedergibt.

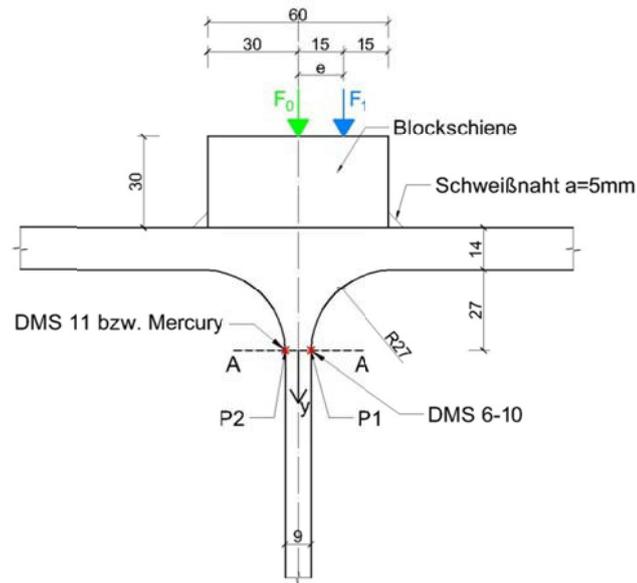
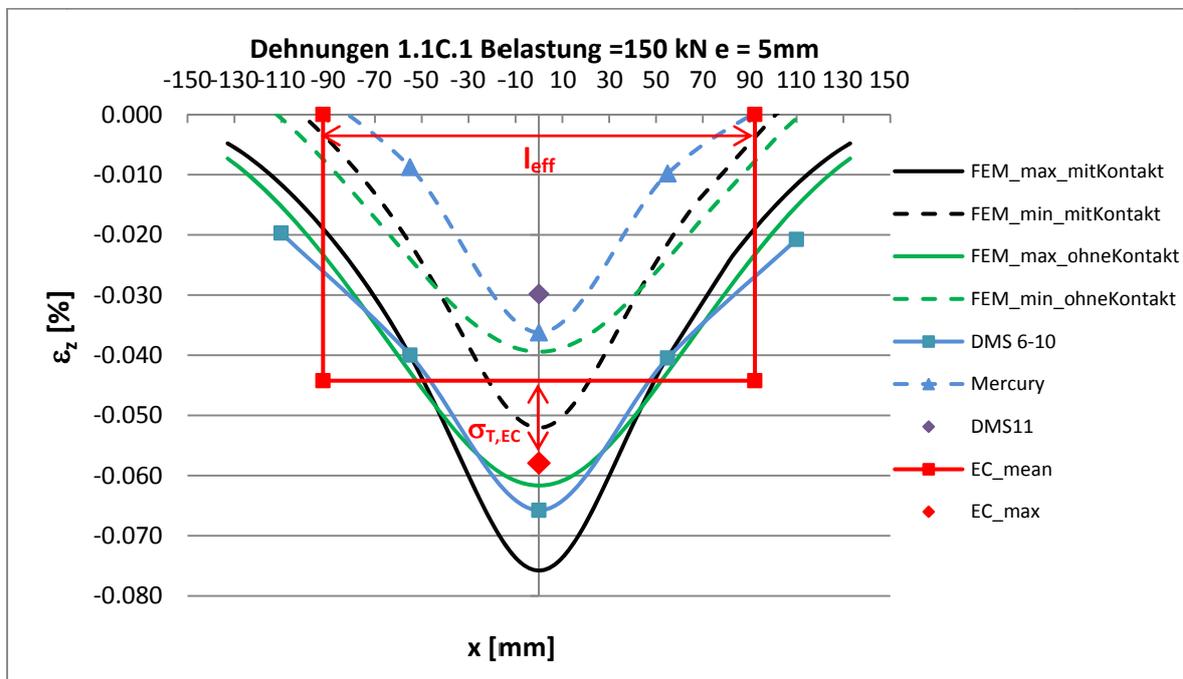


Abbildung 5-32: Ausgewertete Pfade

Folgende fünf Diagramme, zeigen den Vergleich der Dehnungen aus dem Versuch, mit jene aus der FE-Berechnung (für Fall1 und Fall2 siehe 5.6.4), sowie den Vergleich mit der Normberechnung für den exzentrischen Fall. Die Ergebnisse sind dabei auf die Drucknormalspannung aus der Normberechnung bezogen.


 Abbildung 5-33: Vergleich FE-Analyse mit Versuch bei exzentrischer Belastung mit 150 kN und  $e = 5\text{ mm}$  (geschweißte Schiene)

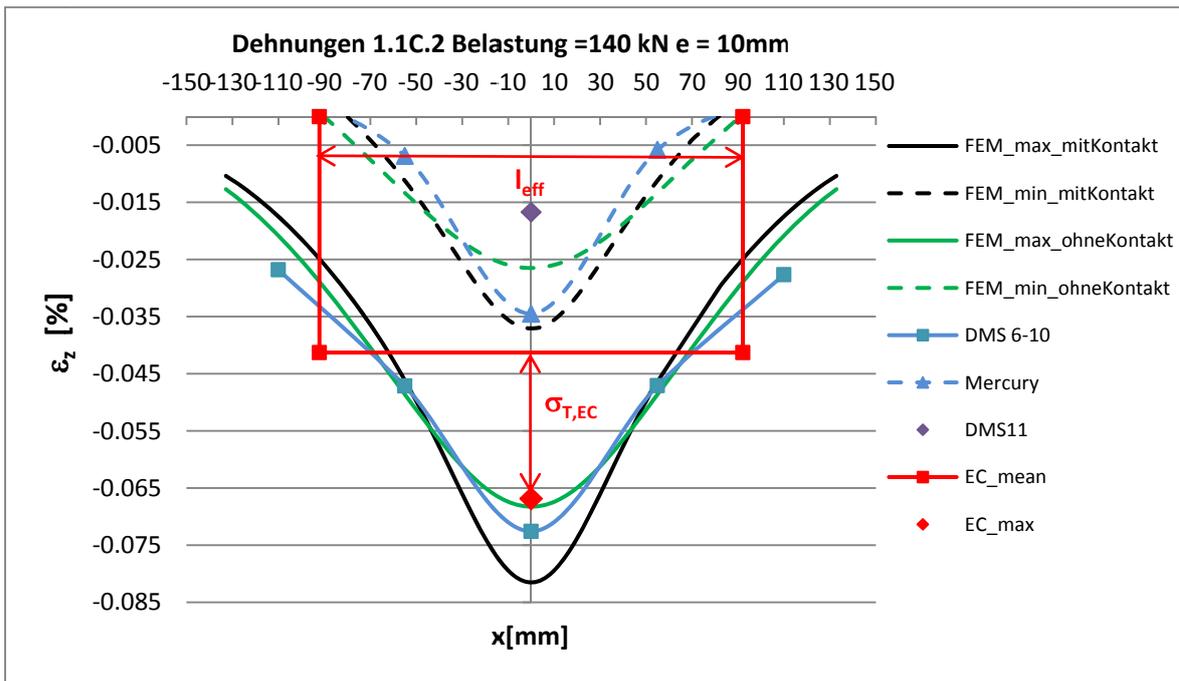


Abbildung 5-34: Vergleich FE-Analyse mit Versuch bei exzentrischer Belastung mit 140 kN und  $e = 10\text{mm}$  (geschweißte Schiene)

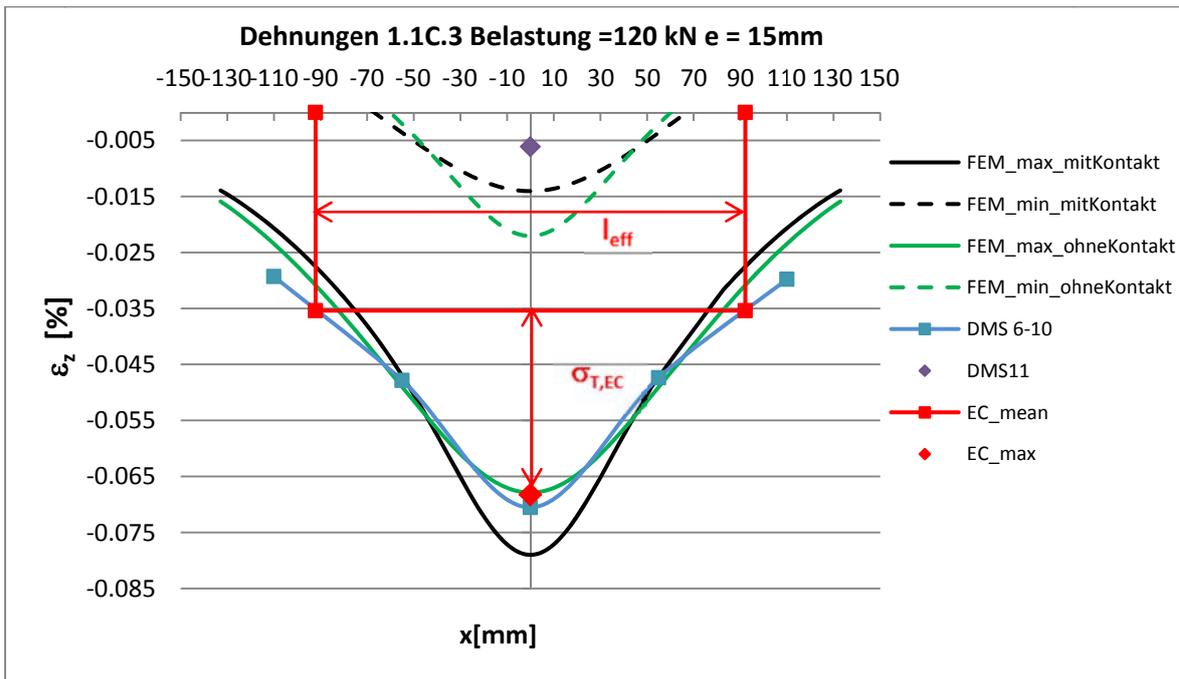


Abbildung 5-35: Vergleich FE-Analyse mit Versuch bei exzentrischer Belastung mit 120 kN und  $e = 15\text{mm}$  (geschweißte Schiene)

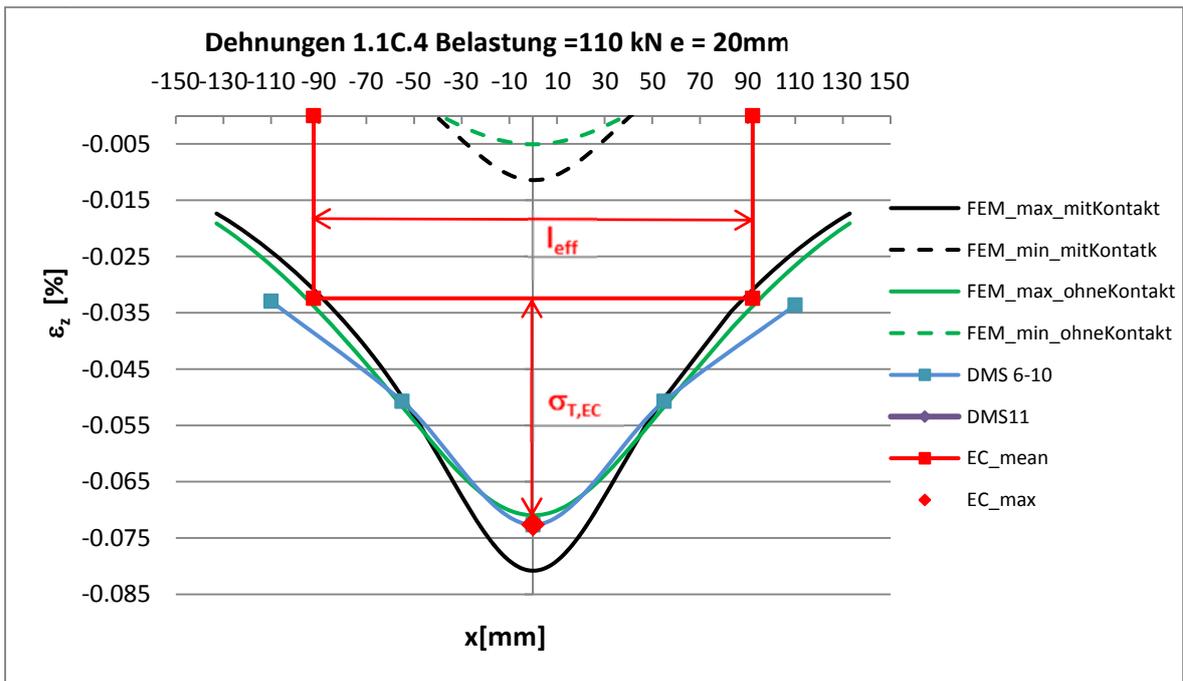


Abbildung 5-36: Vergleich FE-Analyse mit Versuch bei exzentrischer Belastung mit 110 kN und  $e = 20\text{mm}$  (geschweißte Schiene)

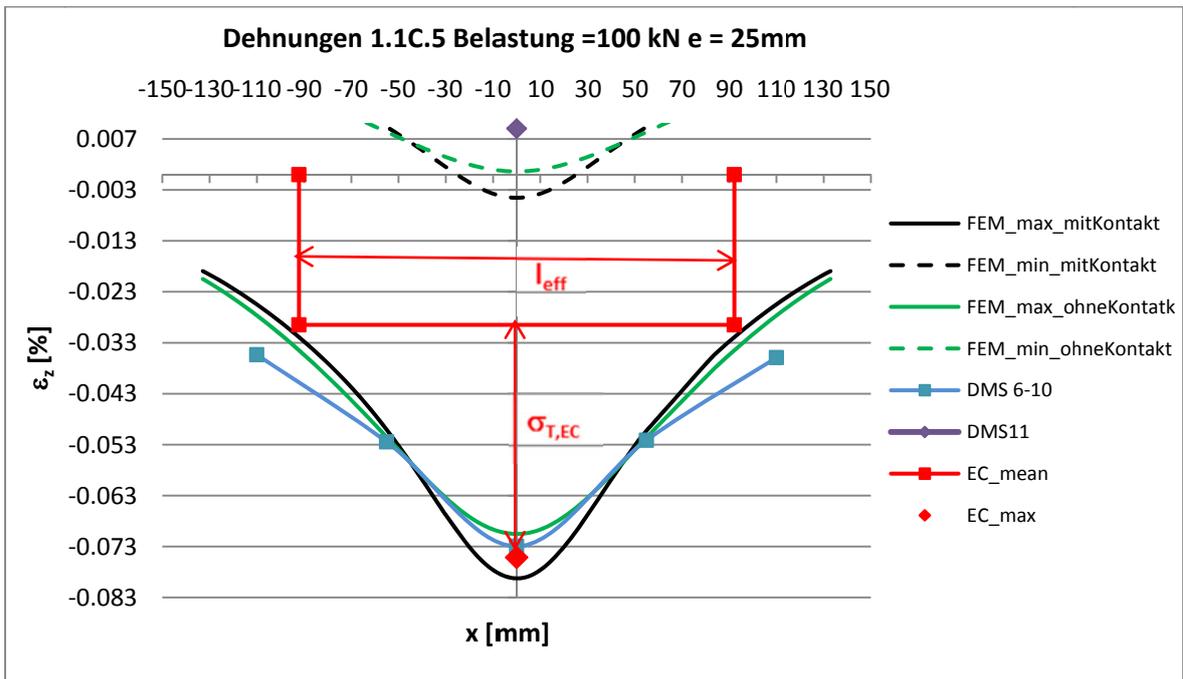


Abbildung 5-37: Vergleich FE-Analyse mit Versuch bei exzentrischer Belastung mit 100 kN und  $e = 25\text{mm}$  (geschweißte Schiene)

In der Tabelle 5-6 sind die maximalen Dehnungen, welche in Abbildung 5-33 bis Abbildung 5-37 dargestellt sind, aufgelistet.

Tabelle 5-6: Zusammenfassung der Dehnungen bei exzentrischer Belastung

Zusammenfassung der Dehnungen an der Stelle $x = 0$ bei exzentrischer Belastung						
		Exzentrizität $e$ [mm]				
	$e=$	5	10	15	20	25
DMS 8	[%]	-0.0658	-0.0726	-0.0705	-0.0727	-0.0729
FEM max ohne Kontakt	[%]	-0.0617	-0.0683	-0.0679	-0.0710	-0.0705
FEM max mit Kontakt	[%]	-0.0758	-0.0815	-0.0790	-0.0808	-0.0793
EC_max	[%]	-0.0579	-0.0668	-0.0682	-0.0726	-0.0751
DMS 11	[%]	-0.0298	-0.0167	-0.0061	0.0024	0.0090
FEM min ohne Kontakt	[%]	-0.0394	-0.0265	-0.0141	-0.0048	0.0006
FEM min mit Kontakt	[%]	-0.0521	-0.0370	-0.0220	-0.0115	-0.0046

In der Tabelle 5-7 bzw. Tabelle 5-8 werden die maximalen Dehnungen, welche in Tabelle 5-6 beschrieben sind, miteinander verglichen. Die jeweilige Abweichung ist in  $\Delta\%$  aufgetragen. Dabei ist die prozentuelle Abweichung immer auf den in der Zeile beschriebene Wert bezogen.

Beispielhaft wird der Vergleich zwischen dem Ergebnis der Messung mittels DMS8 und dem FE-Ergebnis der maximalen Dehnungen vom Berechnungsfall 1 (Schiene ohne Kontakt) mit einer Lastexzentrizität von 5mm näher beschrieben.

In der ersten Zeile der Tabelle 5-7 steht „DMS 8“ und in der zweiten Spalte steht „FEM max ohne Kontakt“. Die prozentuelle Abweichung der beiden verglichenen Werte bei einer Exzentrizität von 5 mm beträgt -6,7% (in Tabelle 5-7 violett markiert), das heißt, der mittels DMS gemessene Wert (-0,0658 %) ist um 6,7 % kleiner als jener der FEM-Berechnung (-0,0617 %).

Werden jedoch die gleichen Werte betrachtet und auf den mittels FEM berechneten Wert (Zeile 2 „FEM max ohne Kontakt“ zu Spalte 1 „DMS8“) bezogen, so kann man ablesen, dass der beim Laborversuch ermittelte Wert („DMS8“) um 6,3% (in Tabelle 5-7 orange markiert), größer ist als jener der FE-Berechnung („FEM max ohne Kontakt“).

	DMS 8					FEM max ohne Kontakt					FEM max mit Kontakt					FC_max				
	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25
e =	-	-	-	-	-	-6.7	-6.3	-3.9	-2.4	-3.4	13.2	11.0	10.7	10.1	8.0	-13.5	-8.6	-3.4	-0.1	2.9
<b>FEM max ohne Kontakt</b>	6.3	6.0	3.8	2.3	3.3	-	-	-	-	-	18.6	16.3	14.1	12.2	11.0	-6.4	-2.1	0.5	2.2	6.1
<b>FEM max mit Kontakt</b>	13.2	11.0	10.7	10.1	8.0	-22.9	-19.4	-16.4	-13.9	-12.4	-	-	-	-	-	-30.8	-21.9	-15.8	-11.3	-5.5
<b>FC_max</b>	11.9	7.9	3.2	0.1	-3.0	6.1	2.1	-0.5	-2.3	-6.5	23.6	18.0	13.6	10.2	5.2	-	-	-	-	-

 Tabelle 5-7: Vergleich der maximalen Dehnungen bei exzentrischer Belastung in  $\Delta$  %

Tabelle 5-8: Vergleich der minimalen Dehnungen bei exzentrischer Belastung in  $\Delta\%$ 

	DMS 11					FEM min ohne Kontakt					FEM min mit Kontakt				
	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25
e =	-	-	-	-	-	24.4	37.0	56.6	150	-1329	42.7	54.9	72.3	121	299
DMS 11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24.3	28.5	36.3	58.0	114
FEM min ohne Kontakt	-32.2	-58.7	-130	301	93.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FEM min mit Kontakt	-74.5	-122	-261	580	150	-32.0	-39.8	-56.9	-138	819	-	-	-	-	-

Die Ergebnisse aus dem exzentrischen Versuch zeigen, dass die maximal gemessenen Dehnungen bei jedem Laststellungsfall niedriger als jene des Berechnungsfalls 1 (Schiene liegt vollflächig auf Oberflansch auf) sind. Die Messergebnisse sind jedoch in jedem Belastungsfall größer als jene aus Berechnungsfall 2 (Schiene liegt nicht auf Oberflansch auf, Lasteinleitung nur über Schweißnähte). Wie bereits bei den zentrischen Versuchen zeigt sich, dass die Schiene beim Versuch nur teilweise aufgelegt ist.

Der Vergleich der Messergebnisse mit den Berechneten nach Eurocode zeigt, dass diese vor allem bei einer Exzentrizität von 15mm (in diesem Fall  $k/4$ ) und darüber hinaus sehr gut übereinstimmen. Die Abweichung beträgt (bei  $e = 15\text{mm}$ ) 3,2% (in Tabelle 5-7 blau markiert).

Da wiederum davon ausgegangen werden muss, dass die Schiene bei einem Kranbahnträger an mehreren Stellen vollflächig auf dem Oberflansch aufliegt, ist auch der Vergleich der maximalen mittels FE-Analyse berechneten Dehnungen und jenen nach Eurocode interessant. Hierbei zeigt sich, dass die mittels FE –Analyse ermittelten Dehnungen bei allen Exzentrizitätsfällen größer als jene nach Eurocode [1] sind. Bei einer Exzentrizität von 15mm ( $k/4$  der Schiene) ist die mittels Eurocode [1] berechnete Spannung um 13,6% größer als jene aus der FE-Berechnung (in Tabelle 5-7 grün markiert).

### 5.6.6 Vergleich der Lasteinleitung mittels FE Berechnung

Die Ergebnisse des Versuches mit dem HEA300 Profil zeigen, dass die Art der Lasteinleitung in das Profil einen erheblichen Einfluss auf die Spannungen in Steg hat.

Das folgende Diagramm zeigt einen Vergleich zwischen 3 Lasteinleitungsfällen

- Fall1: Starrer Verbund der Schiene mit dem Oberflansch (Annahme laut EN 1993-6 [1])
- Fall2: Schiene mittels 5mm Schweißnaht auf den Oberflansch aufgeschweißt und mit Kontakt. (Reibbeiwert  $\mu=0.2$ )
- Fall3: Schiene hat keinen Kontakt mit Oberflansch die Lasteinleitung erfolgt ausschließlich über die Schweißnähte

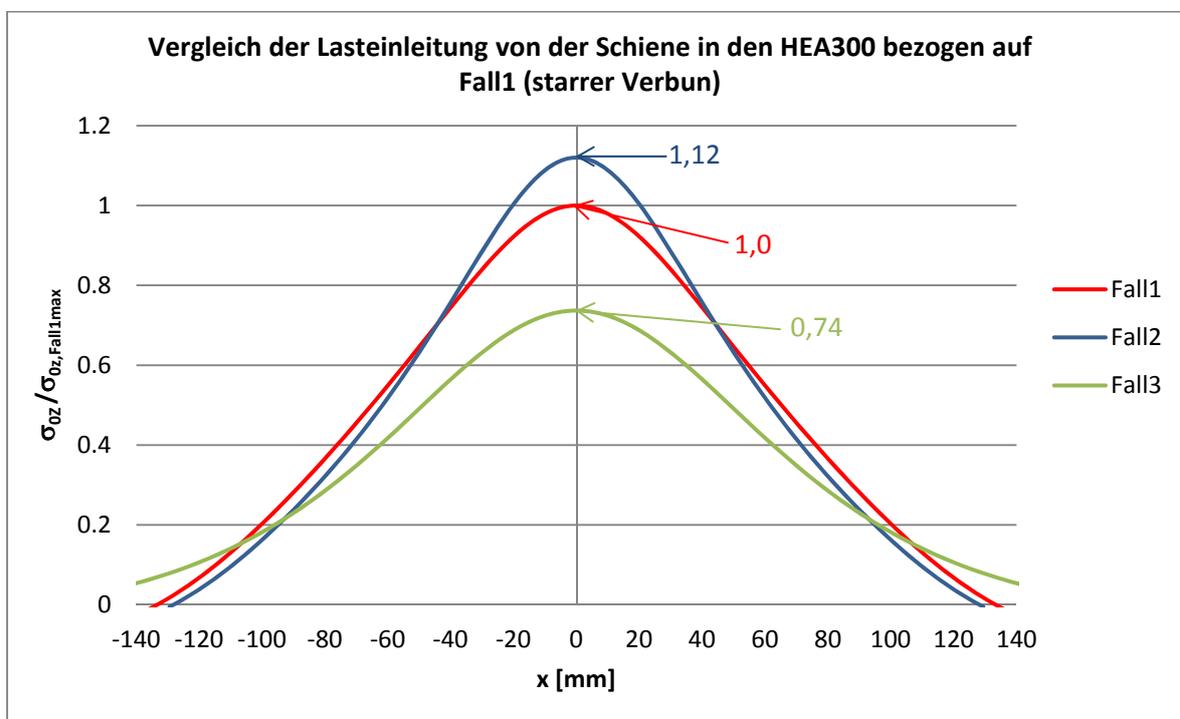


Abbildung 5-38: Vergleich der Lasteinleitung in den HEA300

Laut EN 1993-6 [1] kann eine angeschweißte Schiene als starr angenommen werden, dabei wird die Steifigkeit des Kranbahnträgers mit der Schiene überschätzt; im konkreten Fall um 12%.

Wird die Last nur durch die Schweißnähte eingeleitet, nimmt die Spannung im Steg deutlich ab; hier um 27%.

### 5.6.7 Kastenquerschnitt ohne Schiene, System 3.0.0

Wie in Abbildung 5-11 dargestellt, werden die Dehnungen beim Probekörper 2 jeweils mit fünf DMS an der Kasten Innenseite und mit einem DMS an der Kasten Außenseite gemessen. Die fünf innenliegenden DMS konnten mit einem Abstand von 4 mm zum Oberflansch angebracht werden. An der Außenseite muss aufgrund der Schweißnaht ein Abstand von 12mm zum Oberflansch gewählt werden. Um eine Vergleichbarkeit zwischen FE-Analyse und Versuch herstellen zu können, werden die FE-Ergebnisse auch an zwei Pfaden mit unterschiedlichen Abstand zum Oberflansch abgelesen (4mm bzw. 12mm siehe Abbildung 5-39). Der Vergleich zeigt deshalb nicht die Maximalwerte, welche direkt bei der Schweißnaht an der Oberflanschunterkante auftreten.

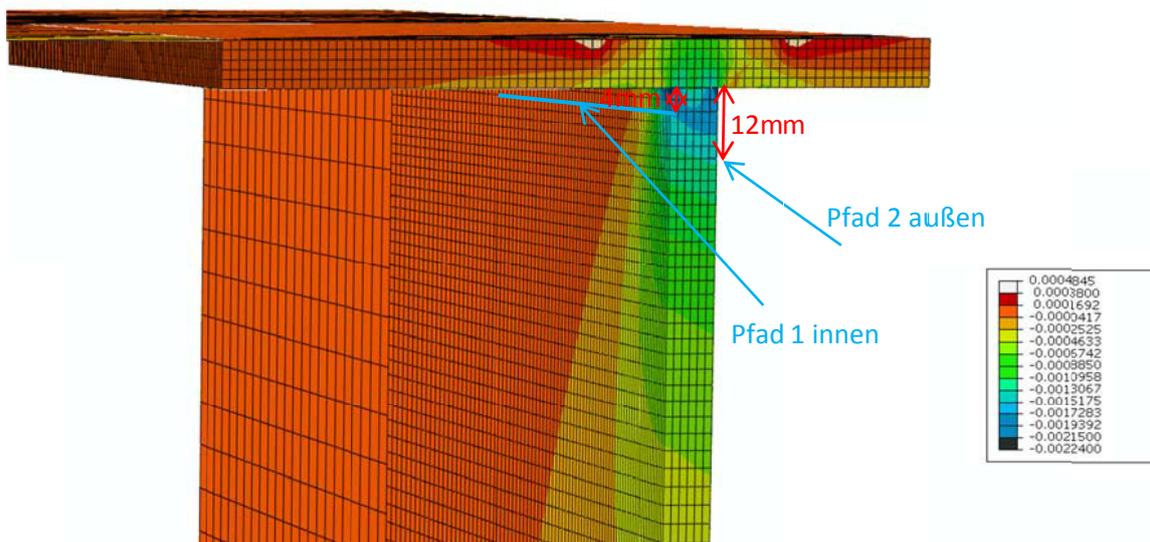


Abbildung 5-39: Dehnungen Kastenquerschnitt 3.0.0 mit 99kN

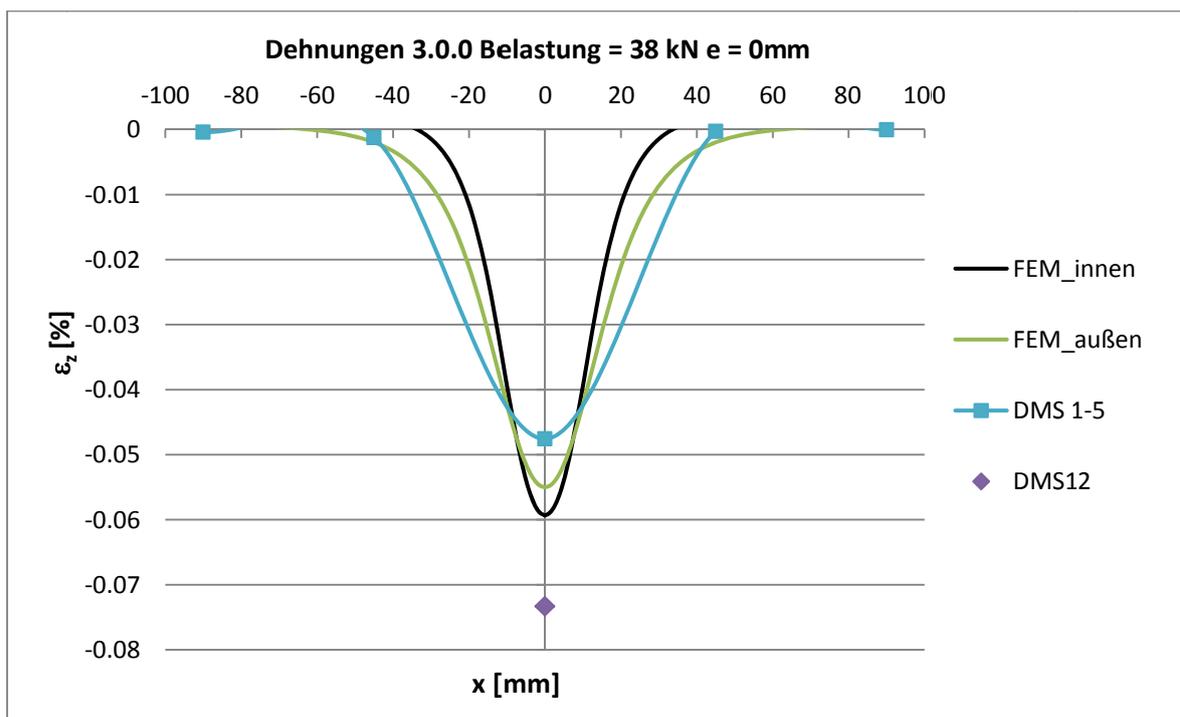


Abbildung 5-40: Ergebnisse für System 3.0.0 mit 38 kN ohne Schiene

Bei den in Abbildung 5-40 gezeigten Ergebnissen wird kein Vergleich mit dem Eurocode gezeigt. Die Berechnung nach Eurocode [1] sieht keinen Fall ohne Schiene vor, da dieser für Kranbahnen nicht relevant ist. Aufgrund der hohen gemessenen Dehnung an der Außenseite des Kastenquerschnittes konnte der Versuch nur bis zu einer Belastung von 38kN geführt werden. Diese vergleichsweise niedrige Belastung führt zu einem großen Einfluss der Imperfektionen des Querschnitts auf das Messergebnis. Die hohen Dehnungen an der Außenseite lassen darauf schließen, dass der Prüfcylinder, mit welchen die Versuche durchgeführt wurden, zuerst außen Kontakt mit dem Oberflansch hat und erst nach einer gewissen Belastung die Last mittig eingeleitet wird. Da dieser Versuch wenig Bedeutung für die Praxisanwendung hat, wird nicht mehr näher darauf eingegangen.

### 5.6.8 Kastenquerschnitt mit loser Schiene, System 3.1A.0

Die folgende Abbildung zeigt das FE-Ergebnis für das System 3.1A0.0 mit einer Belastung von 150 kN, sowie die beiden im Diagramm (Abbildung 5-42) abgebildeten Pfade.

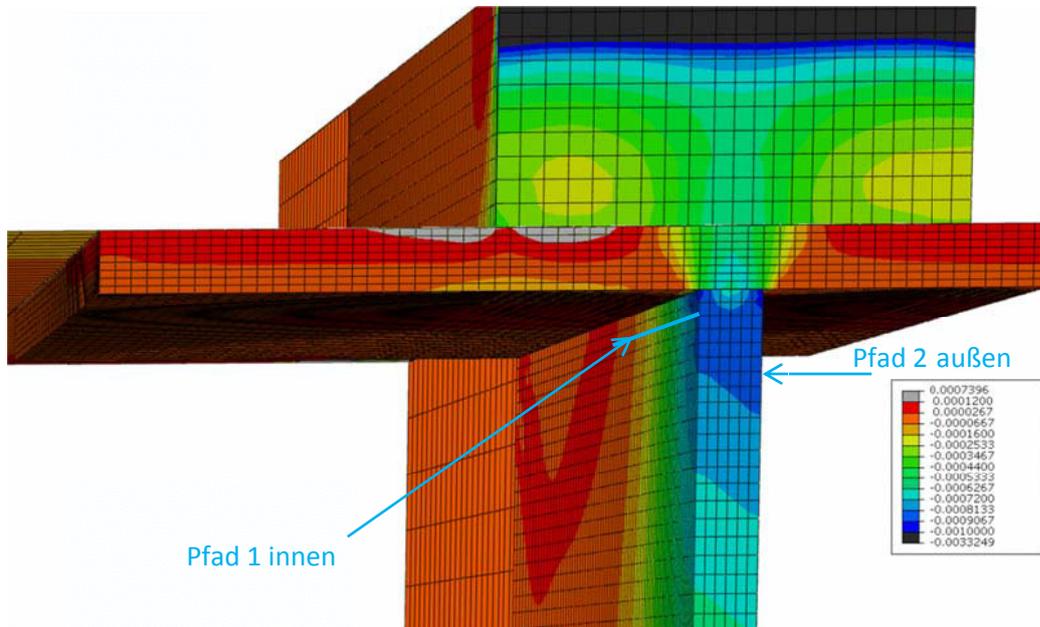


Abbildung 5-41: Kastenquerschnitt mit loser Schiene für das System 3.1A.0 Belastung = 150kN

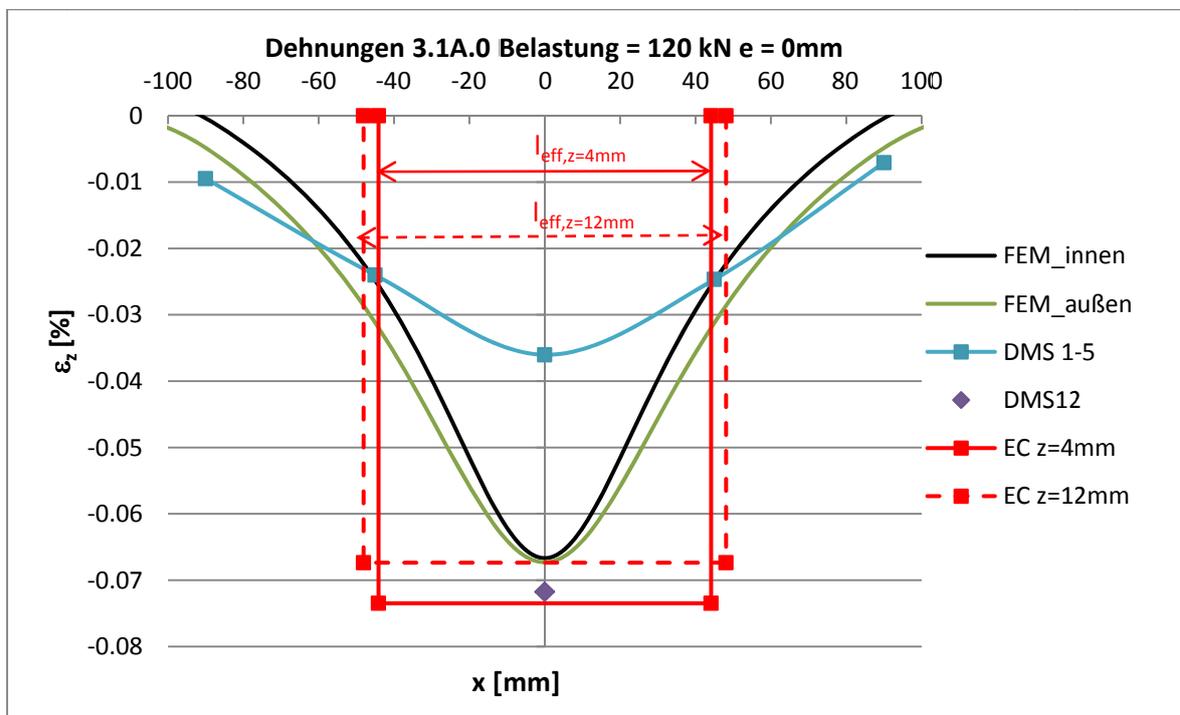


Abbildung 5-42: Ergebnisse für System 3.1A.0 (starre Schiene)

### 5.6.9 Kastenquerschnitt mit aufgeschweißter Blockschiene und zentrischer Belastung, System 3.1C.0

Wie beim HEA300 Querschnitt werden auch beim Kastenquerschnitt zwei verschiedene Lasteinleitungsfälle zwischen Schiene und Oberflansch unterschieden.

Lasteinleitungsfall 1: vollflächiger Kontakt zwischen Schiene und Oberflansch, Last wird direkt in den Steg eingeleitet.

Lasteinleitungsfall 2: kein Kontakt zwischen Schiene und Oberflansch, Last wird über Schweißnähte in Oberflansche eingeleitet.

Abbildung 5-43 zeigt das Ergebnis der FE-Berechnung vom System 3.1C.0.

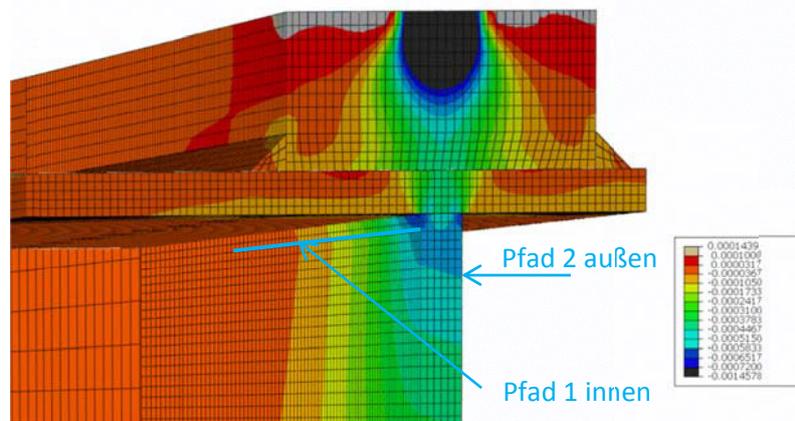


Abbildung 5-43: Dehnungen aus FE-Ergebnis zentrische Belastung mit Kontakt und 99kN

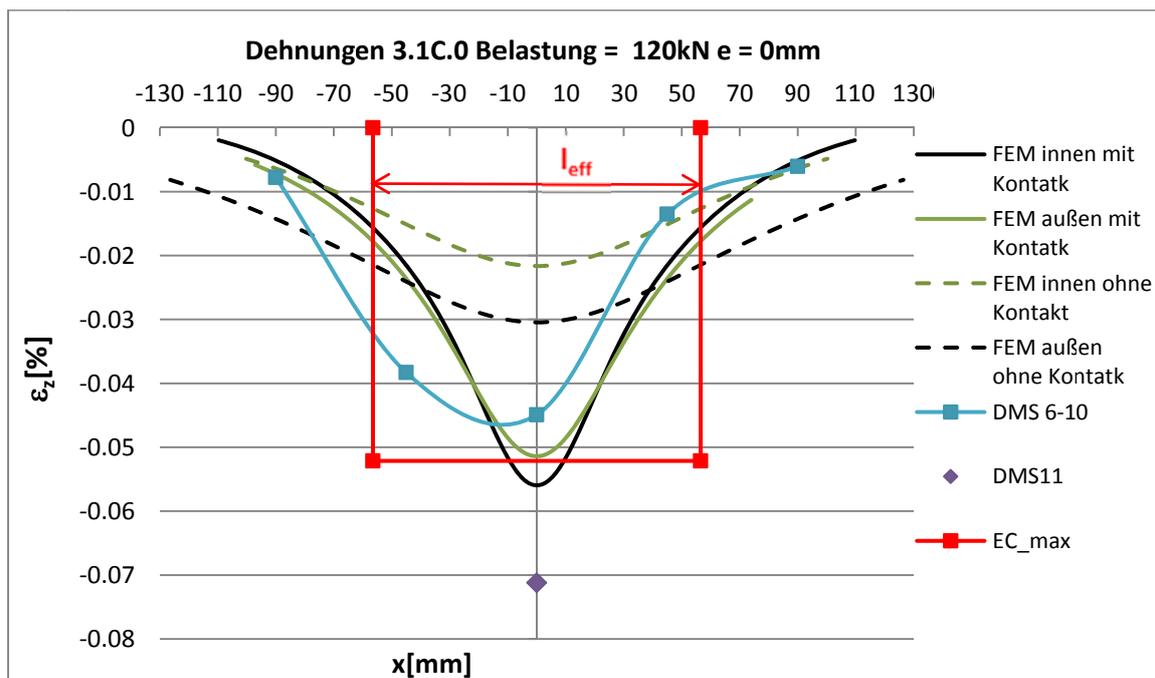


Abbildung 5-44: Ergebnisse für System 3.1C.0 (geschweißte Schiene)

In der folgenden Tabelle sind die maximalen Dehnungen der FE-Berechnung und des Laborversuches dargestellt.

Tabelle 5-9: Zusammenfassung der maximalen Dehnungen

Maximale Dehnungen $\varepsilon_z$		
FE-Analyse mit Kontakt innen	[%]	-0,0678
FE-Analyse mit Kontakt außen	[%]	-0,0623
FE-Analyse ohne Kontakt innen	[%]	-0,0369
FE-Analyse ohne Kontakt außen	[%]	-0,0262
DMS 8 (innen)	[%]	-0,0449
DMS 11 (außen)	[%]	-0,0712
Eurocode (EC max.)	[%]	-0,0650

In Tabelle 5-10 sind die Abweichungen der Maximalwerte zueinander dargestellt.

Tabelle 5-10: Vergleich der maximalen Dehnungen

Vergleich der Dehnungen $\varepsilon_z$		
FE-Analyse mit Kontakt innen zu DMS 8	[ $\Delta$ %]	51,00
FE-Analyse mit Kontakt außen zu DMS 11	[ $\Delta$ %]	-12,50
FE-Analyse ohne Kontakt innen zu DMS 8	[ $\Delta$ %]	-17,82
FE-Analyse ohne Kontakt außen zu DMS 11	[ $\Delta$ %]	-63,2
DMS 8 zu EC max.	[ $\Delta$ %]	-30,92
DMS 11 zu EC max.	[ $\Delta$ %]	9,54
FE-Analyse mit Kontakt innen zu EC max.	[ $\Delta$ %]	4,31
FE-Analyse mit Kontakt außen zu EC max.	[ $\Delta$ %]	-4,15

Bei den Ergebnissen ergibt sich ähnlich wie beim Probekörper 1, dass die gemessenen Dehnungen an der Innenseite des Kastens zwischen den FE-Ergebnissen aus Lasteinleitungsfall 1 und 2 liegen (siehe Abbildung 5-44). Das zeigt, dass die Schiene beim Versuch nicht voll auf den Oberflansch aufgelegt ist (siehe Abbildung 5-18 und Abbildung 5-19). Die Dehnungen des DMS 11 sind zu jenen aus dem Versuch vergleichsweise hoch, daraus lässt sich schließen, dass sich die Außenseite des Oberflansches beim Schweißen des Kastenquerschnittes nach oben verzogen hat. Durch diese Krümmung des Oberflansches liegt die Schiene auf der Außenseite punktuell auf dem Obergurt auf und hat im Bereich des Steges keinen vollen Kontakt.

Um diesen Effekt besser abbilden zu können wird eine nichtlineare FE-Analyse durchgeführt. Bei dieser Analyse wird die Last in Lastschritten gesteigert. Dabei werden wiederum zwei Lasteinleitungsfälle der Schiene unterschieden (siehe Abbildung 5-45 und Abbildung 5-46).

Lasteinleitungsfall 3: Zwischen der Schiene und dem Obergurt besteht eine Fuge von 0,15mm über die gesamte Breite, welche sich mit zunehmender Last schließt. (siehe Abbildung 5-45)

Lasteinleitungsfall 4: Zwischen der Schiene und dem Obergurt besteht eine schräge Fuge (innen 0mm und außen 0,15mm), welche sich mit zunehmender Last schließt (siehe Abbildung 5-46).

Außerdem ist zu erkennen, dass die Messung ein sehr asymmetrisches Ergebnis liefert. Das asymmetrische Ergebnis deutet darauf hin, dass die Schiene in der Nähe des DMS7 vollen Kontakt mit dem Obergurt hat. Da bei dem gewählten Prüfkörper die Schiene verhältnismäßig zum Oberflansch sehr steif ist, kann sich die eingebrachte Last über die Schiene in Längsrichtung verteilen und es führt zu kleineren lokalen Spannungen. Aus diesem Grund sind die nachfolgenden Ergebnisse schwer zu interpretieren und liefern keine exakte Aussage.

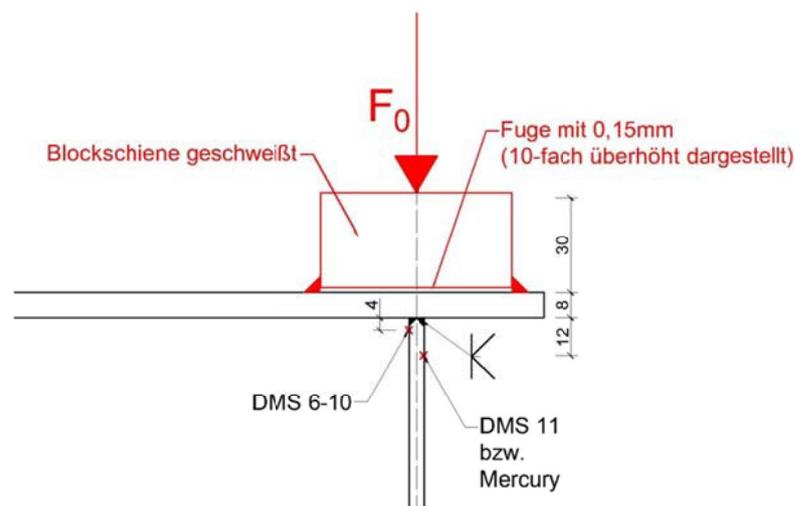


Abbildung 5-45: Lasteinleitungsfall 3 (Fuge mit 0,15mm über ganze Schienenbreite)

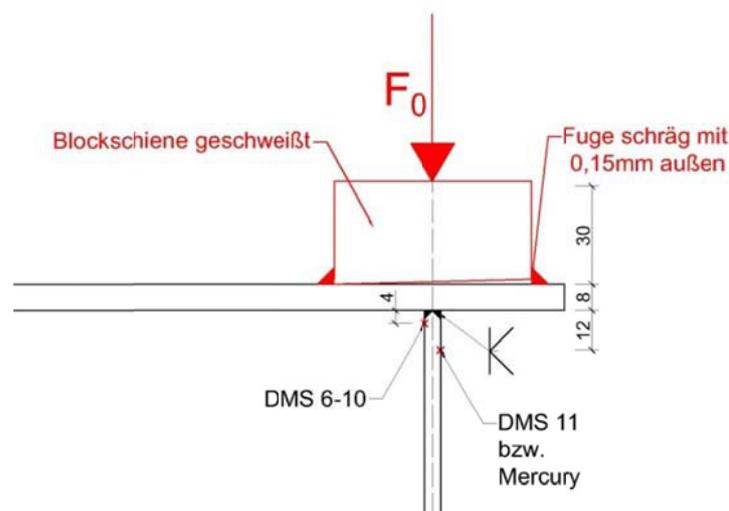


Abbildung 5-46: Lasteinleitungsfall 4 (mit schräger Fuge)

In den oberen Skizzen ist die Fuge zur besseren Anschaulichkeit überhöht (10x) eingezeichnet.

### 5.6.10 FE-Ergebnisse Lasteinleitungsfall 1 (mit vollflächigem Kontakt)

Die Abbildung 5-47 zeigt das Ergebnis der FE- Berechnung mit einer Laststeigerung von 30kN je Kurve, verglichen mit den DMS Messergebnissen der Laborversuche an der Kasteninnenseite beim Lasteinleitungsfall 1(mit vollflächigem Kontakt).

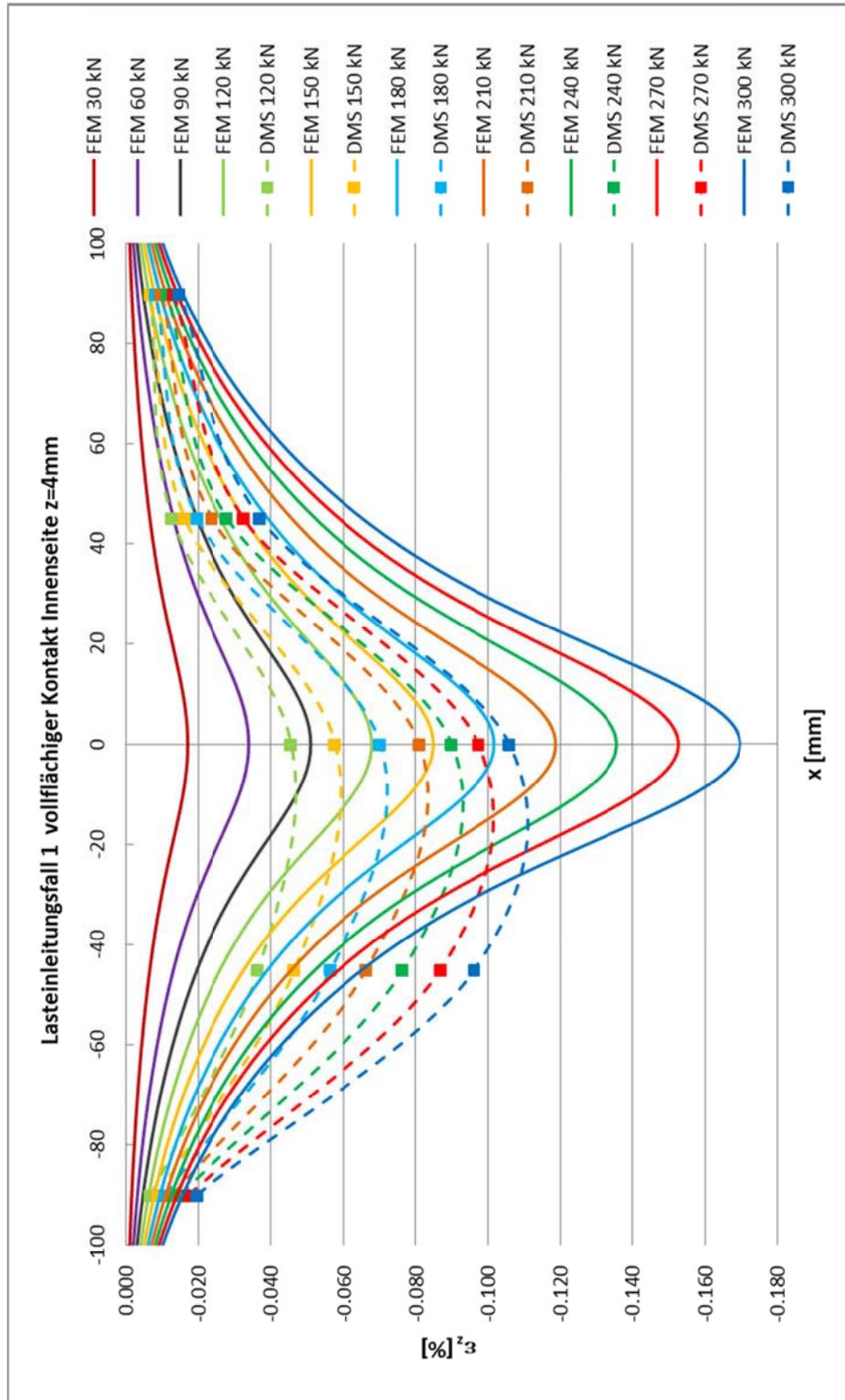


Abbildung 5-47: Ergebnis FE-Berechnung für Lasteinleitungsfall 1 an der Innenseite

Die Abbildung 5-48 zeigt das Ergebnis der FE- Berechnung mit einer Laststeigerung von 30kN je Kurve, verglichen mit den DMS Messergebnissen der Laborversuche an der Kastenaußenseite beim Lasteinleitungsfall 1 (mit vollflächigem Kontakt).

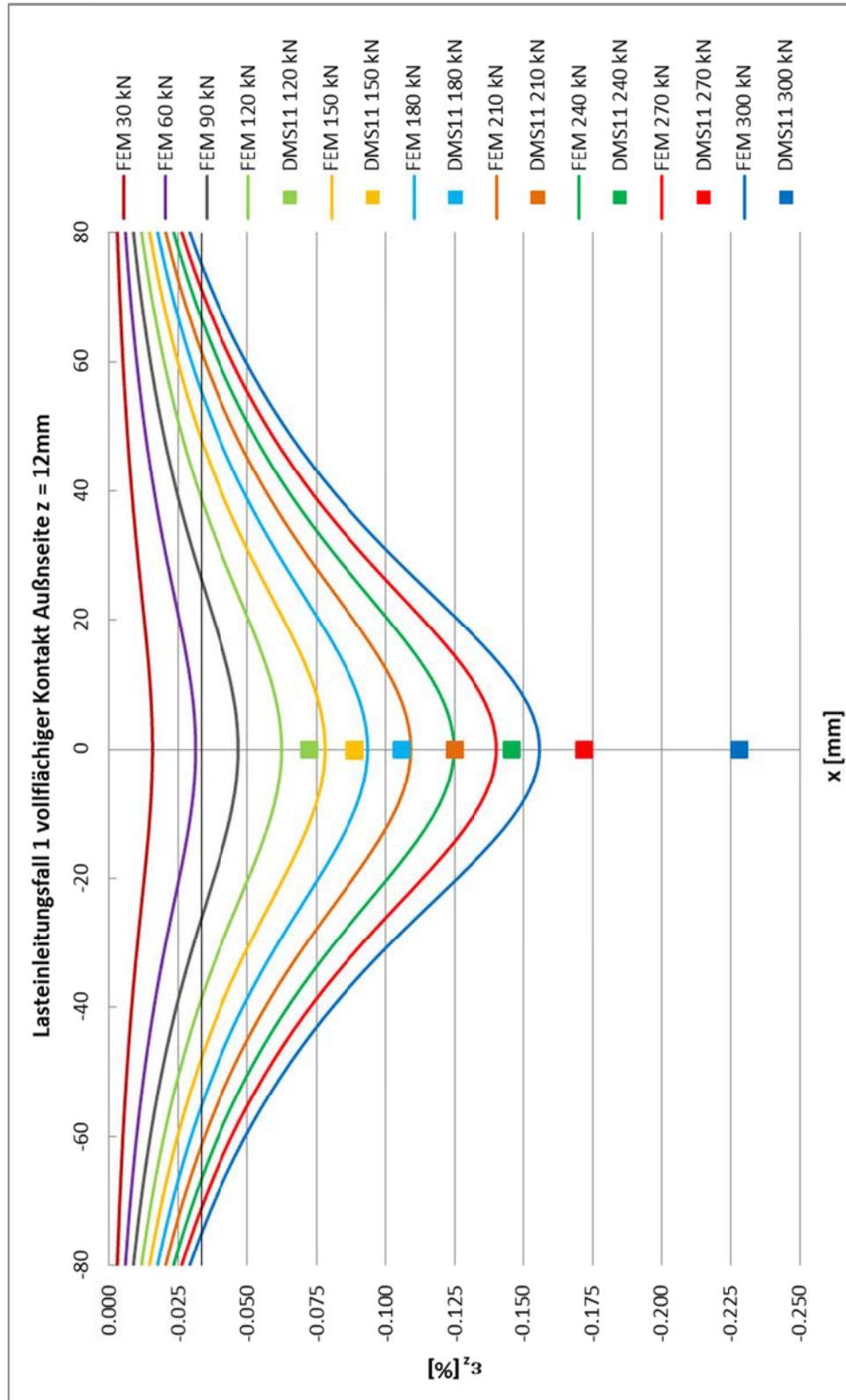


Abbildung 5-48: Ergebnis FE-Berechnung für Lasteinleitungsfall 1 an der Außenseite

### 5.6.11 Ergebnisse Lasteinleitungsfall 2 (ohne Kontakt)

Die Abbildung 5-49 zeigt das Ergebnis der FE- Berechnung mit einer Laststeigerung von 30kN je Kurve, verglichen mit den DMS Messergebnissen der Laborversuche an der Kasteninnenseite beim Lasteinleitungsfall 2 (ohne Kontakt).

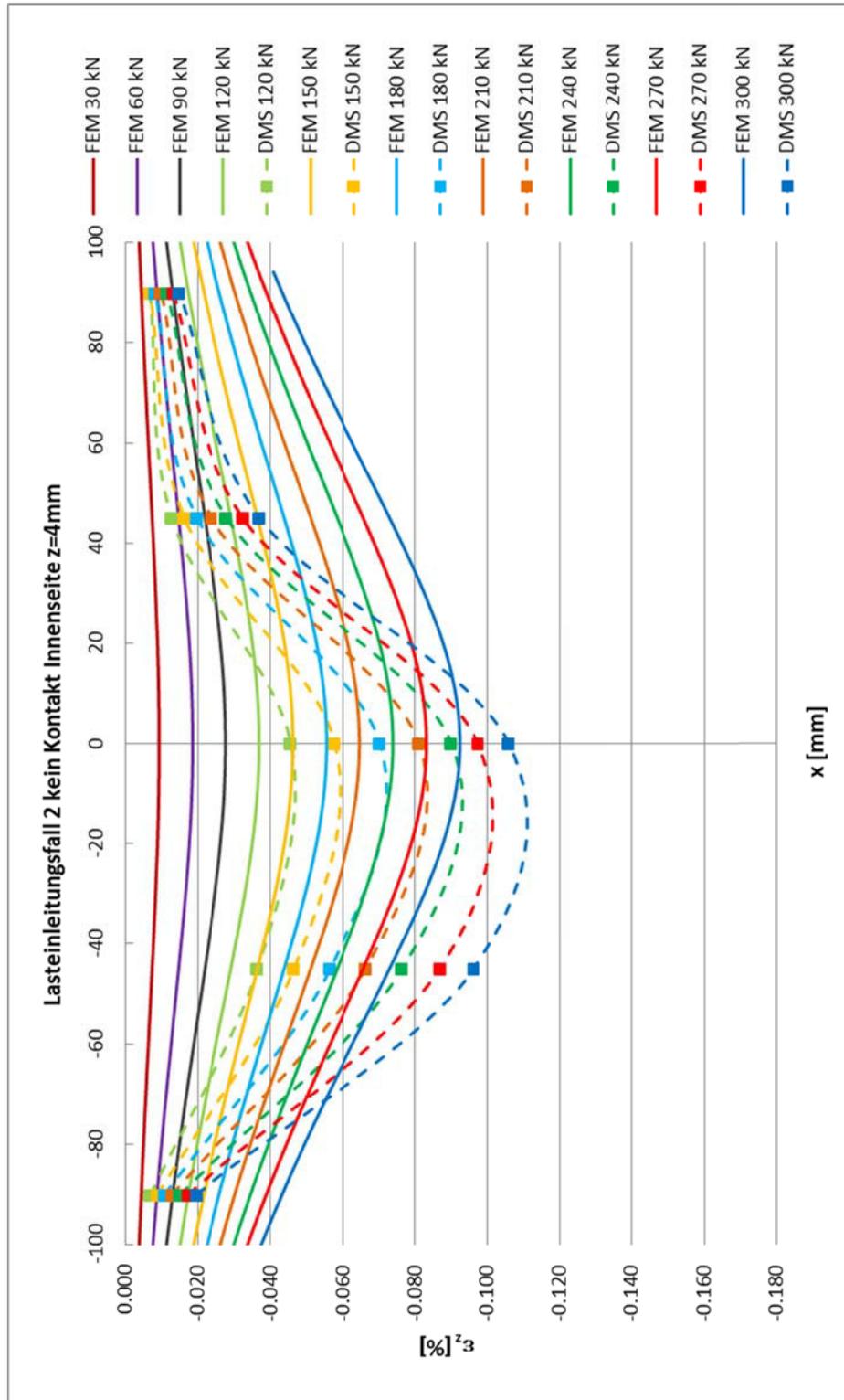


Abbildung 5-49: Ergebnis FE-Berechnung für Lasteinleitungsfall 2 an der Innenseite

Die Abbildung 5-50 zeigt das Ergebnis der FE- Berechnung mit einer Laststeigerung von 30kN je Kurve, verglichen mit den DMS Messergebnissen der Laborversuche an der Kastenaußenseite beim Lasteinleitungsfall 2 (ohne Kontakt).

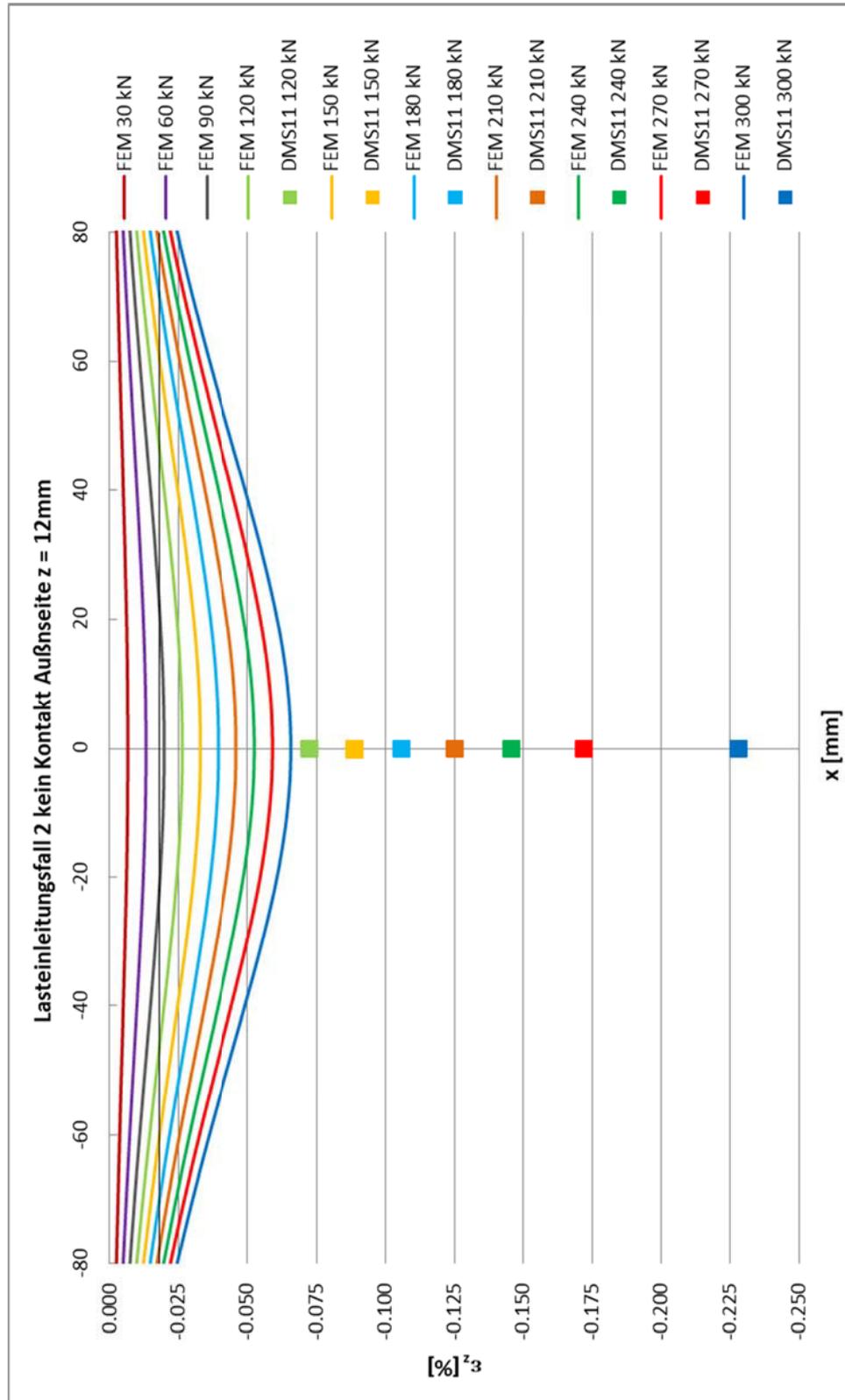


Abbildung 5-50: Ergebnis FE-Berechnung für Lasteinleitungsfall 2 an der Außenseite

### 5.6.12 FE-Ergebnisse Lasteinleitungsfall 3 (mit gleichmäßiger Fuge)

Die Abbildung 5-51 zeigt das Ergebnis der FE- Berechnung mit einer Laststeigerung von 30kN je Kurve, verglichen mit den DMS Messergebnissen der Laborversuche an der Kasteninnenseite beim Lasteinleitungsfall 3 (mit gleichmäßiger Fuge).

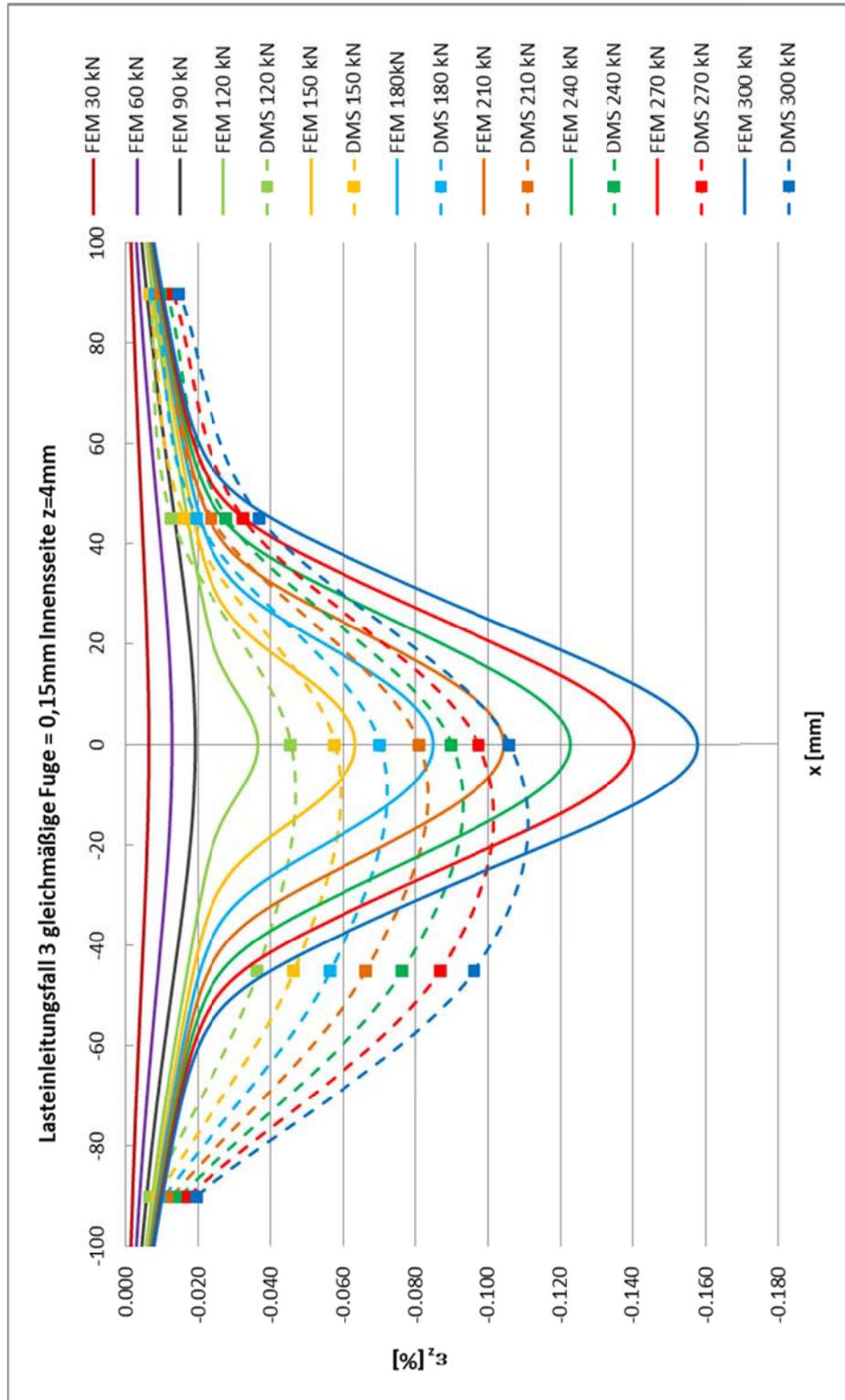


Abbildung 5-51: Ergebnis FE-Berechnung für Lasteinleitungsfall 3 an der Innenseite

Die Abbildung 5-52 zeigt das Ergebnis der FE- Berechnung mit einer Laststeigerung von 30kN je Kurve, verglichen mit den DMS Messergebnissen der Laborversuche an der Kastenaußenseite beim Lasteinleitungsfall 3 (mit gleichmäßiger Fuge).

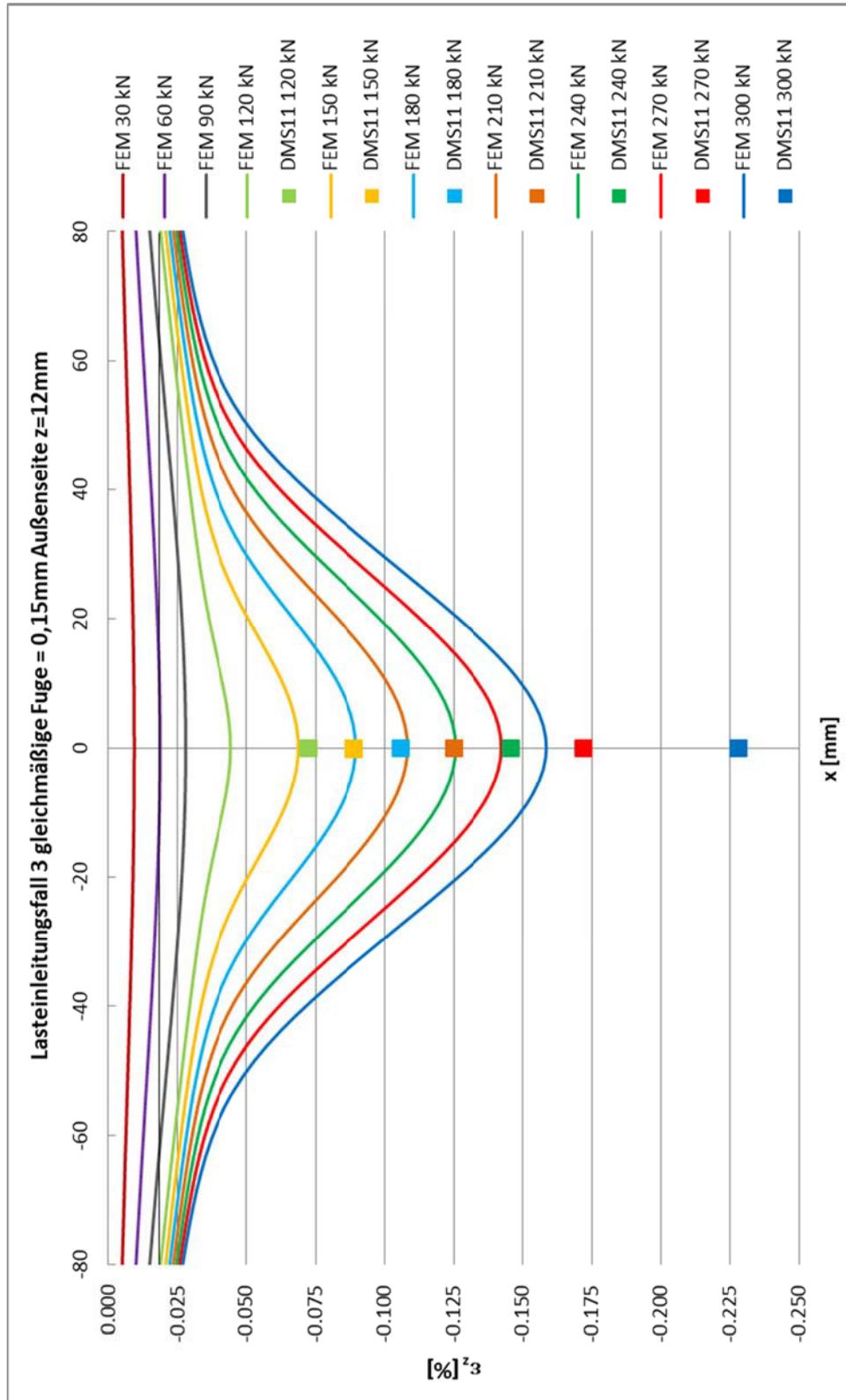


Abbildung 5-52: Ergebnis FE-Berechnung für Lasteinleitungsfall 3 an der Außenseite

### 5.6.13 FE-Ergebnisse Lasteinleitungsfall 4 (mit schräger Fuge)

Die Abbildung 5-53 zeigt das Ergebnis der FE- Berechnung mit einer Laststeigerung von 30kN je Kurve, verglichen mit den DMS Messergebnissen der Laborversuche an der Kasteilinnenseite beim Lasteinleitungsfall 4 (mit schräger Fuge).

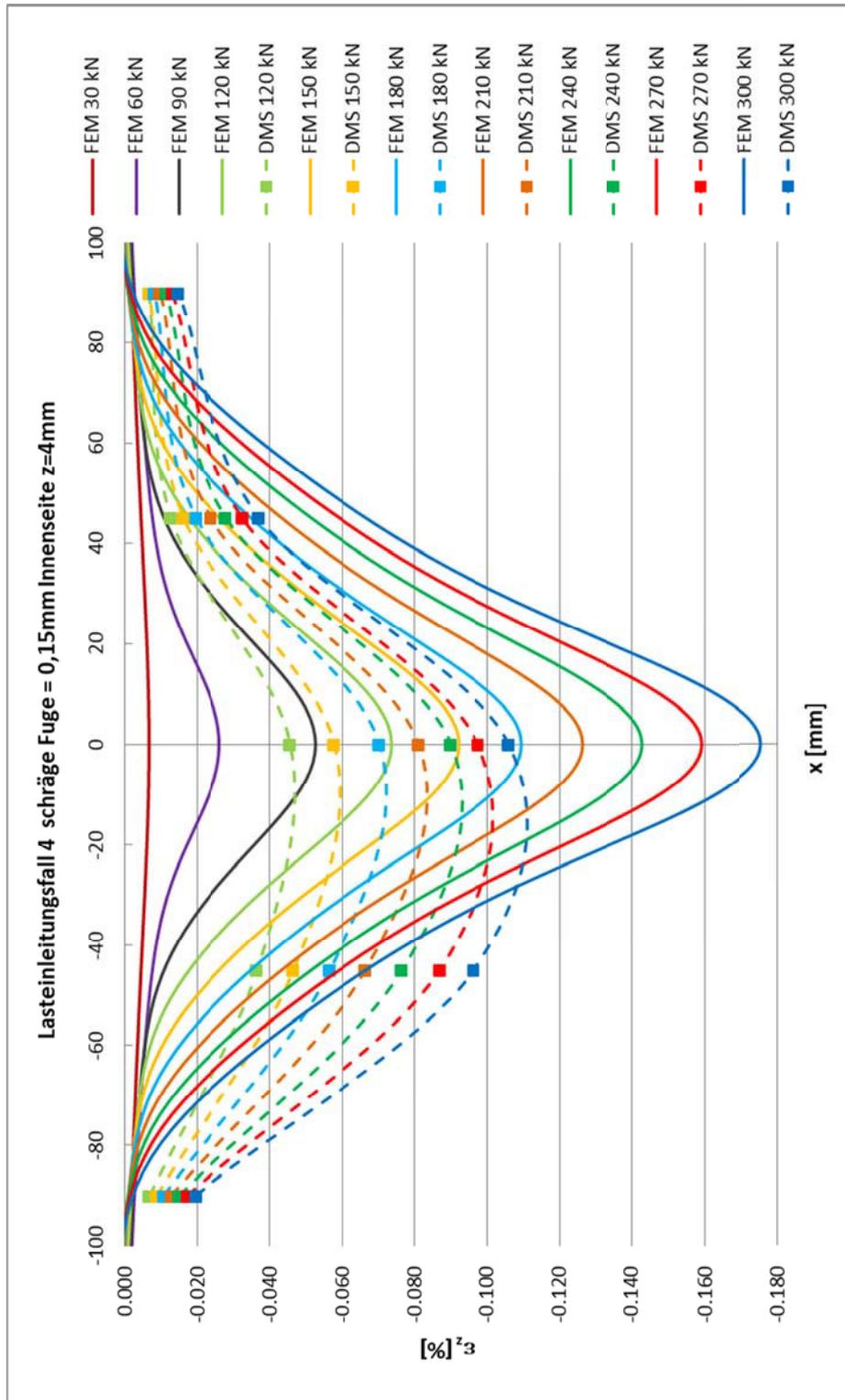


Abbildung 5-53: Ergebnis FE-Berechnung für Lasteinleitungsfall 4 an der Innenseite

Die Abbildung 5-54 zeigt das Ergebnis der FE- Berechnung mit einer Laststeigerung von 30kN je Kurve, verglichen mit den DMS Messergebnissen der Laborversuche an der Kastenaußenseite beim Lasteinleitungsfall 4 (mit schräger Fuge).

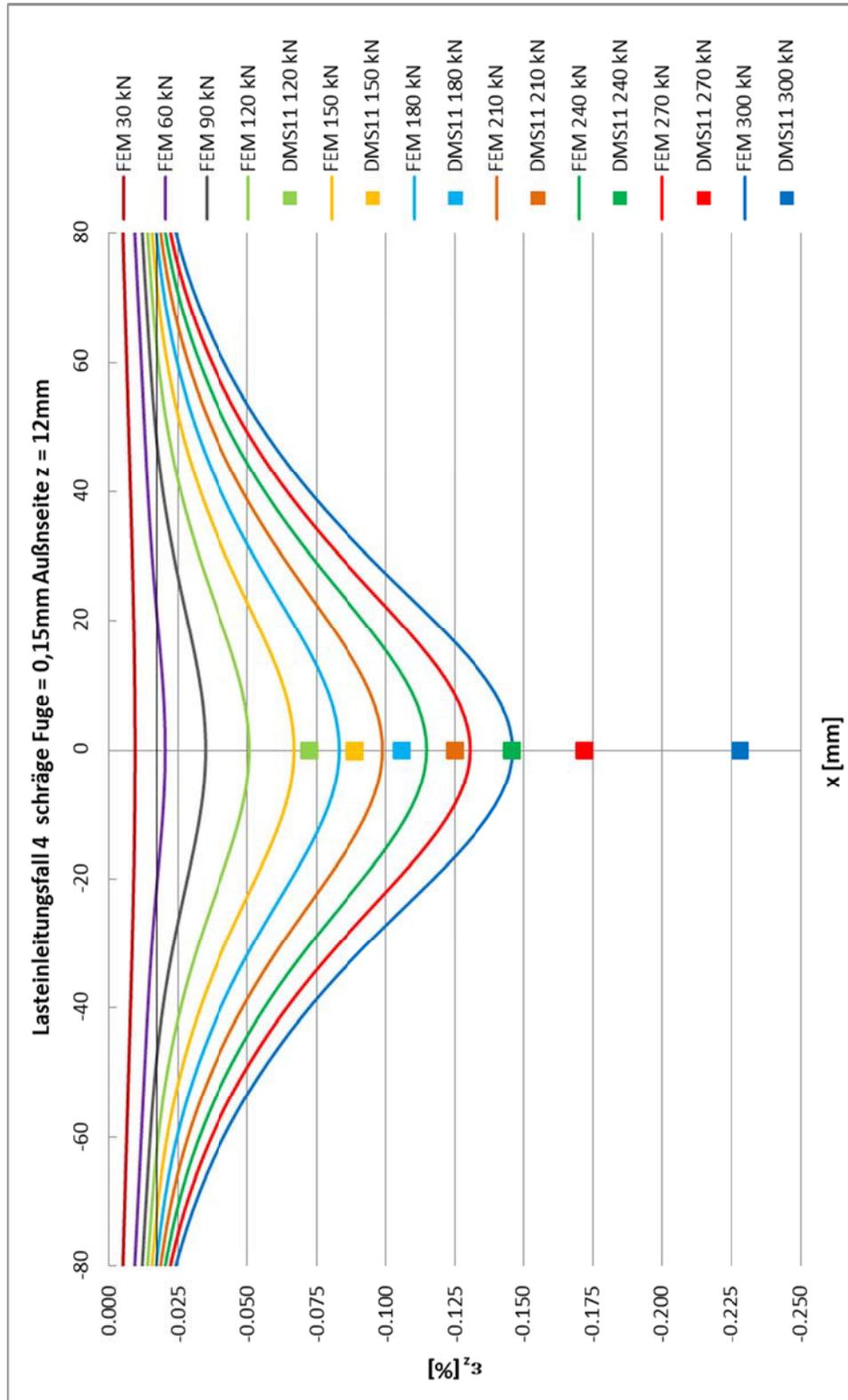


Abbildung 5-54: Ergebnis FE-Berechnung für Lasteinleitungsfall 4 an der Außenseite

Die in Abbildung 5-47 bis Abbildung 5-54 gezeigten Ergebnisse liefern keine ausreichende Übereinstimmung der Messergebnisse mit jenen aus der FE Berechnung. Die Ergebnisse zeigen jedoch wie sensibel das geprüfte System auf Imperfektionen des Kastenquerschnittes reagiert. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass der gewählte Oberflansch im Verhältnis zu Schiene sehr dünn ist und damit besonders sensibel auf etwaige Imperfektionen reagiert. Die beste Übereinstimmung des Versuches und der Berechnung liefert der Lasteinleitungsfall 2 (kein Kontakt zwischen Schiene und Oberflansch) an den Messpunkten der Innenseite (siehe Abbildung 5-49).

### 5.6.14 FE Ergebnisse exzentrische Lasteinleitung, Systeme 3.1C.1, 3.1C.2, 3.1C.3, 3.1C.4

In Abbildung 5-55 bis Abbildung 5-58 werden die Vergleiche der Ergebnisse des Laborversuches mit der FE-Berechnung für den Kastenquerschnitt 1 mit der aufgeschweißten Blockschiene (siehe Abbildung 5-12) für die exzentrische Lasteinleitung gezeigt. Die Berechnung erfolgte dabei mit einer vollständig aufliegenden Schiene.

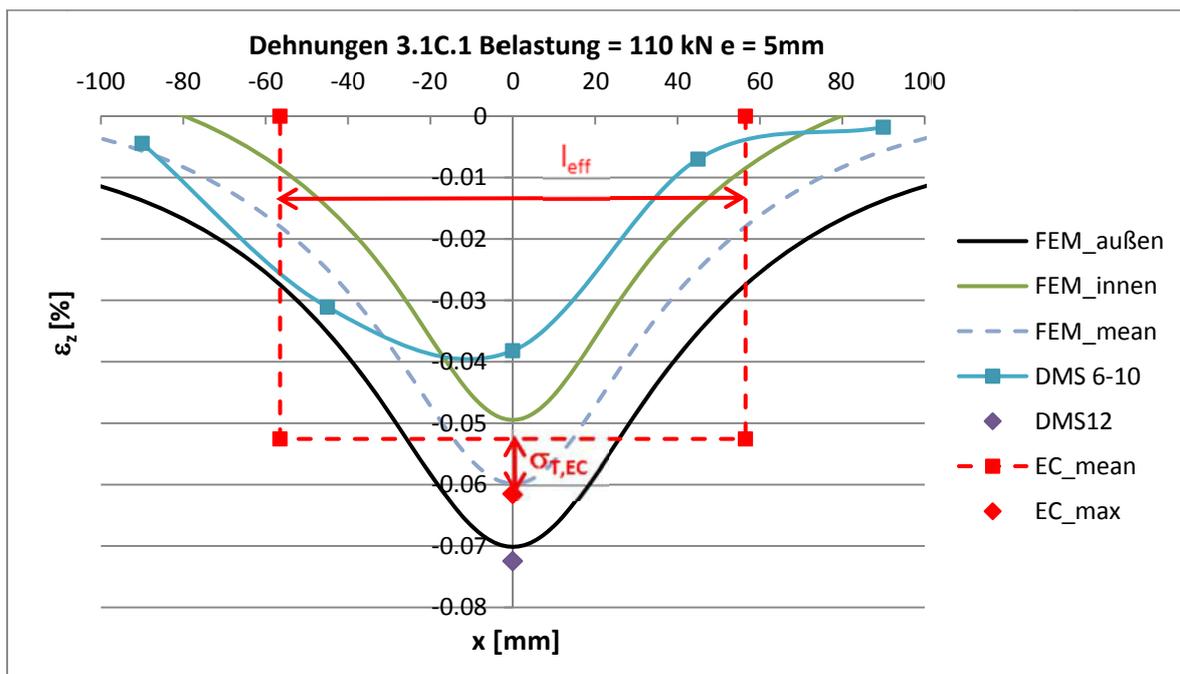


Abbildung 5-55: Ergebnisvergleich für das System 3.1C.1

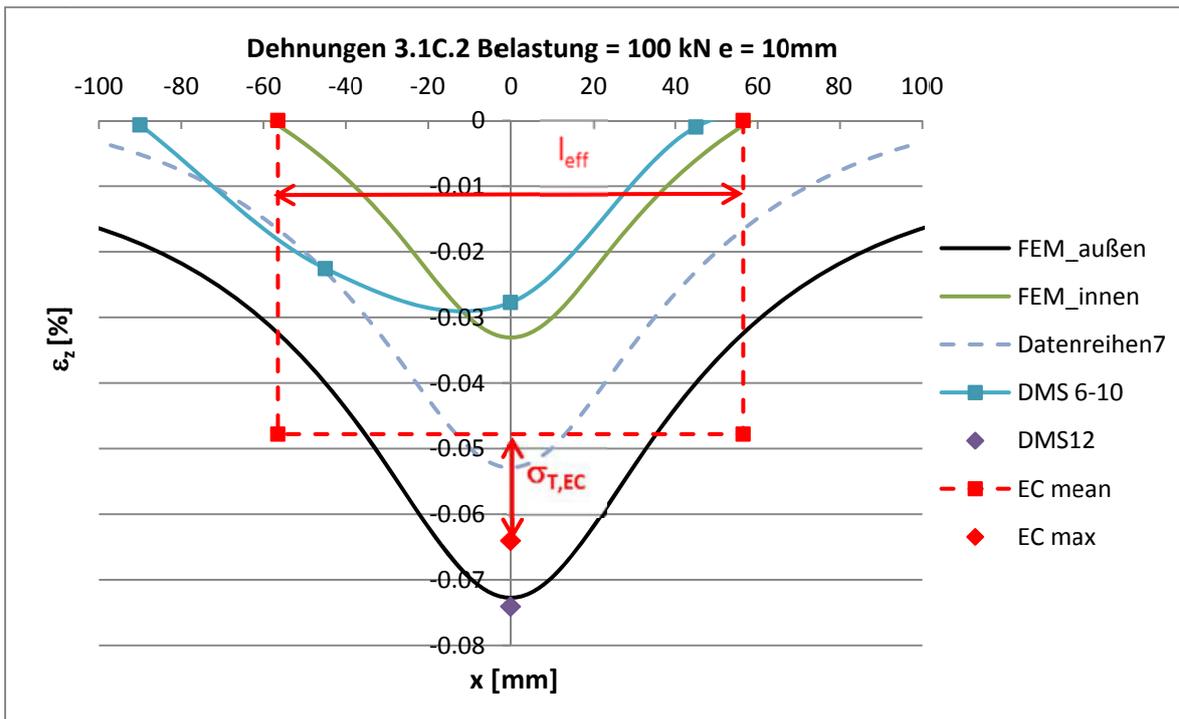


Abbildung 5-56: Ergebnisvergleich für das System 3.1C.2

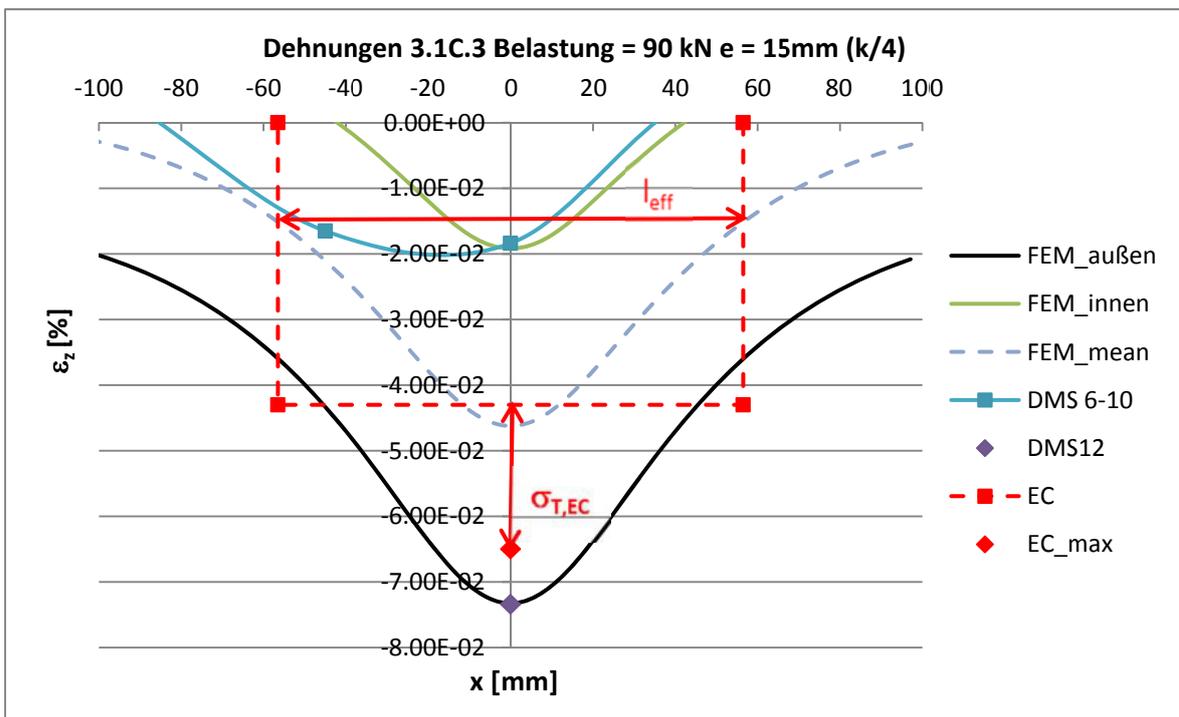


Abbildung 5-57: Ergebnisvergleich für das System 3.1C.3

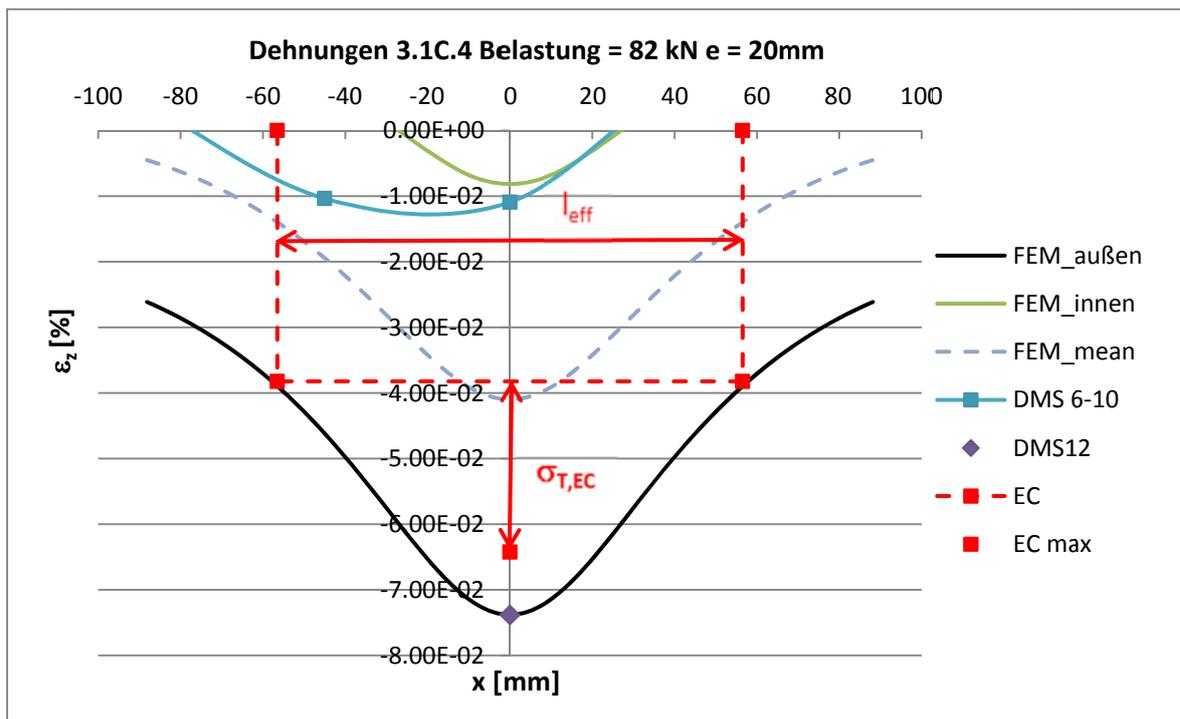


Abbildung 5-58: Ergebnisvergleich für das System 3.1C.4

In Abbildung 5-55 bis Abbildung 5-58 ist zu erkennen, dass die Messergebnisse des DMS 12 bei allen 4 Systemen sehr gut mit den Berechneten übereinstimmen. Vor allem bei einer großen Lastexzentrizität (15 und 20 mm) stimmen die gemessenen Dehnungen beinahe exakt mit jenen aus der FE-Berechnung überein. Bei den Ergebnissen der zentrischen Belastung (siehe Kapitel 5.6.9 bis 5.6.13) liegt das Messergebnis des DMS 12 jeweils deutlich über jenen der FE-Berechnung. Daraus lässt sich schließen, dass die Last hauptsächlich durch die an der Außenseite des Kastenquerschnittes liegende Schweißnaht in den Querschnitt eingeleitet wird.

Die gemessenen und mittels FE-Berechnung ermittelten Spannungen sind bei allen exzentrischen Fällen deutlich über den Maximalwerten aus dem Eurocode [1].

## 6 Parameterstudie mittels FE – Analyse

Wie bereits in Kapitel 1.3.2 beschrieben, werden die gewählten Querschnitte (siehe Kapitel 2.3) mittels einer FE-Analyse mit der Software Abaqus CAE 6.14 [7] berechnet. Die dadurch erhaltenen Vertikalspannungen werden mit jenen nach EN 1993-6 [1] in einem Diagramm verglichen.

Die FE-Analyse wird mit elastischen Materialverhalten durchgeführt, daher kommt es zu keinem Plastizieren im Steg. Die erhaltenen Spannungen werden auf die Berechneten nach EN 1993-6 [1] bezogen, somit spielt die Größe der angenommenen maximalen Radlast bei dem Vergleich der Ergebnisse keine Rolle.

Im Zuge der Analyse werden schubstarr mit dem Kranbahnträger verbundene und geklemmte bzw. lose aufgelegte Schienen untersucht.

Schubstarr verbundene Schienen werden in der Praxis durch aufschweißen realisiert. Um den Unterschied zwischen einer vollständig schubstarr verbundenen Schiene und einer mittels Schweißnähten befestigten Schiene zu zeigen, werden beide Varianten untersucht. Bei der vollständig schubstarr verbundenen Schiene wird ein kompletter Verbund von Schiene und Träger simuliert, als wäre es aus einem Teil gefertigt. Bei der aufgeschweißten Schiene wird nur durch die Schweißnaht eine schubstarre Verbindung hergestellt, die Schienenunterfläche kann nur durch Kontakt und Reibung Kräfte übertragen.

Bei der FE-Analyse der Systeme mit Blockschiene (in Abbildung 2-2 dargestellt) ist die Schiene entweder schubstarr mit dem Träger verbunden oder lose aufgelegt. Bei den Systemen mit A Schienen (in Abbildung 2-2 dargestellt) werden diese ausschließlich durch Klemmen auf den Träger gehalten.

Bei den Vergleichen des Querschnittes 1 und 2 mit zentrischer Belastung sind zusätzlich zur Normberechnung die Ergebnisse der Formeln nach Vögele (siehe 3.4) dargestellt (rot strichlierte Linie). Die Daten dafür wurden im Zuge eines Masterprojekts an der TU Graz am Institut für Stahlbau ermittelt. [6]

Die Modellbildung zur FE-Analyse wird in Abschnitt 3.4 beschrieben.

## 6.1 FE-Analyse HEA 300 (Querschnitt 1) [6]

### 6.1.1 System für 1.1D.0, 1.1D.3, 1.1C.0, 1.1C.3, 1.1A.0, 1.1A.3

Folgendes System wird mittels der FEM-Analyse untersucht:

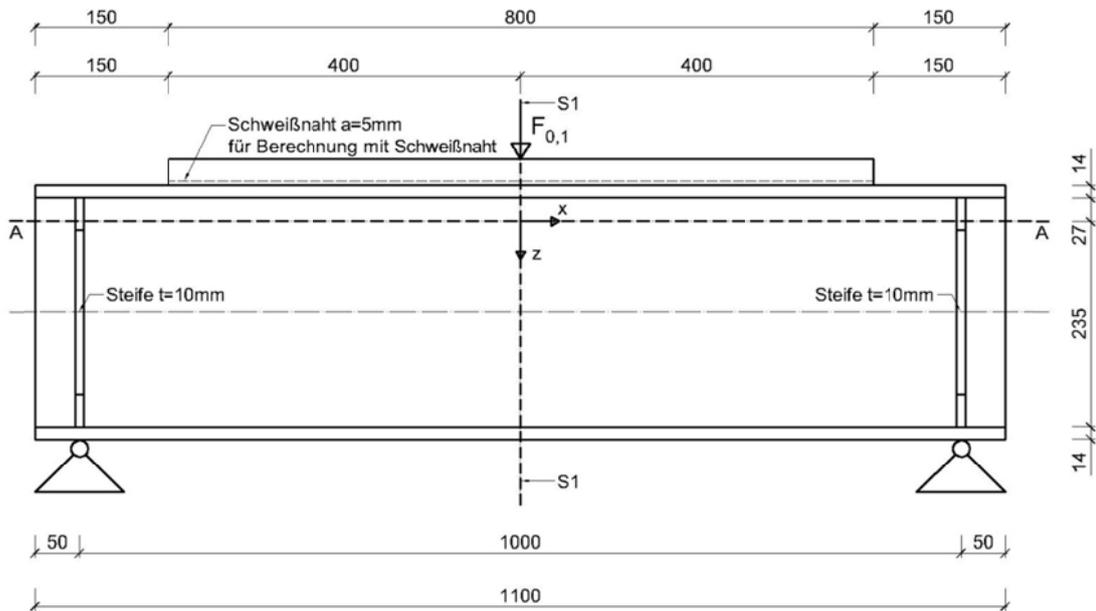


Abbildung 6-1: System HEA300 mit Blockschiene

Abbildung 6-2 und Abbildung 6-3 zeigen den Schnitt S1 durch das System, welches in Abbildung 6-1 dargestellt ist.

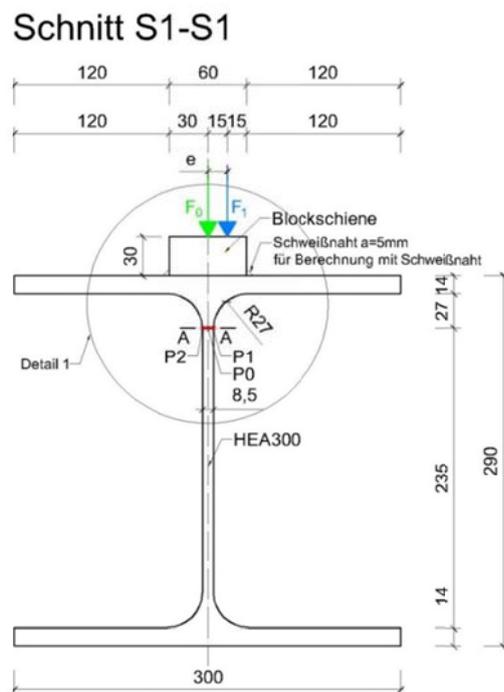


Abbildung 6-2: Schnitt S1-S1 HEA300 mit Blockschiene

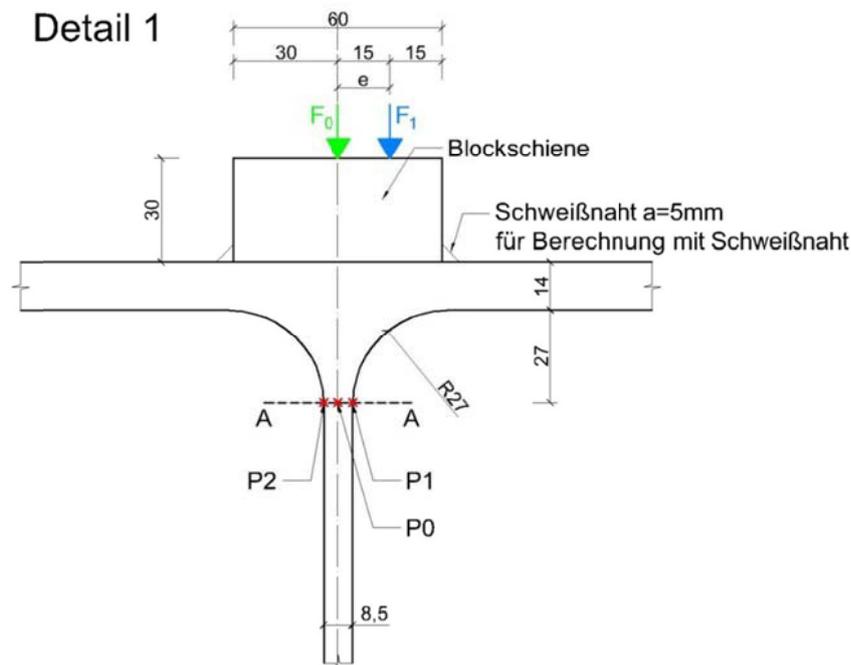


Abbildung 6-3: Detail1 HEA 300 mit Blockschiene

Beim Auswerten der Berechnungsergebnisse für den Fall der zentrischen Belastung  $F_0$  (in Abbildung 6-3 grün dargestellt) werden die Vertikalspannungen entlang der Pfade P0 und P1 (parallel zur Trägerachse) in der Schnittebene A-A ausgelesen und in ein Diagramm aufgetragen. Da das Spannungsbild in diesem Fall um die vertikale Achse des Steges spiegelgleich ist, haben die Pfade P1 und P2 identische Werte und brauchen somit nicht gesondert betrachtet werden. Zum einfacheren Vergleich mit den berechneten Werten laut EN 1993-6 [1], welche von einer gleichmäßigen Verteilung der Spannungen im Stab ausgeht, wird zusätzlich der Mittelwert der Werte von Pfad P0 und P1 gebildet und dargestellt.

Für den Fall der exzentrischen Belastung  $F_1$  (in Abbildung 6-3 blau dargestellt) werden die beiden äußeren Pfade, P1 und P2, ausgelesen um den Normal- und Biegespannungsanteil darstellen zu können. Wobei der Mittelwert der beiden Pfade den Normalspannungsanteil darstellt.

### 6.1.2 Spannungsbilder aus Abaqus [7]

Im Folgenden sind exemplarisch für alle Ergebnisse der Analyse die Spannungsbilder des Querschnittes HEA300 mit Blockschiene aus der Berechnungssoftware dargestellt. Danach werden nur noch die ausgewerteten Ergebnisse in Form von Diagrammen gezeigt, da diese mehr Übersicht und eine bessere Vergleichsmöglichkeit bieten.

Die nachfolgenden Bilder zeigen die Berechnungsergebnisse des HEA300 mit Blockschiene und vollständigem starren Verbund der Schiene, welche in Abbildung 6-8 und Abbildung 6-9 ausgewertet sind.

### 6.1.3 Ergebnisse HEA300 Blockschiene mit starrem Verbund 1.1D.0 bzw. 1.1D.3

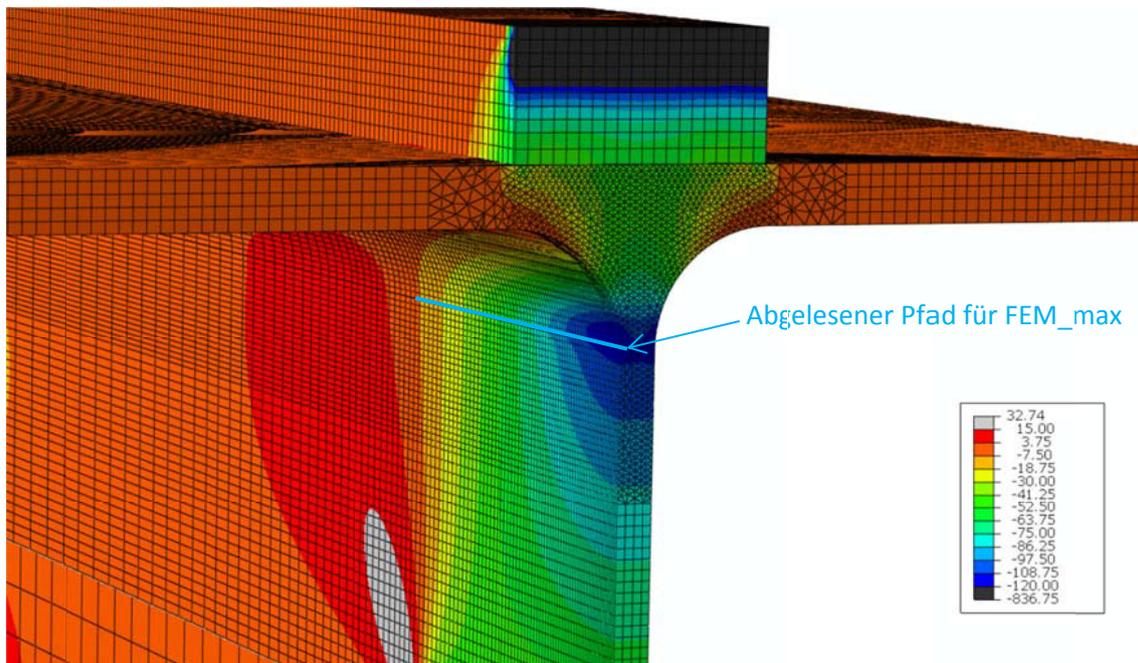


Abbildung 6-4: Vertikalspannungen in  $\text{N}/\text{mm}^2$  bei zentraler Belastung

In Abbildung 6-4 ist die Verteilung der Vertikalen Spannungen im Träger dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die maximalen Spannungen am Ende des Ausrundungsradius und am äußeren Rand (Pfad P1 und P2 siehe Abbildung 6-3) auftreten.

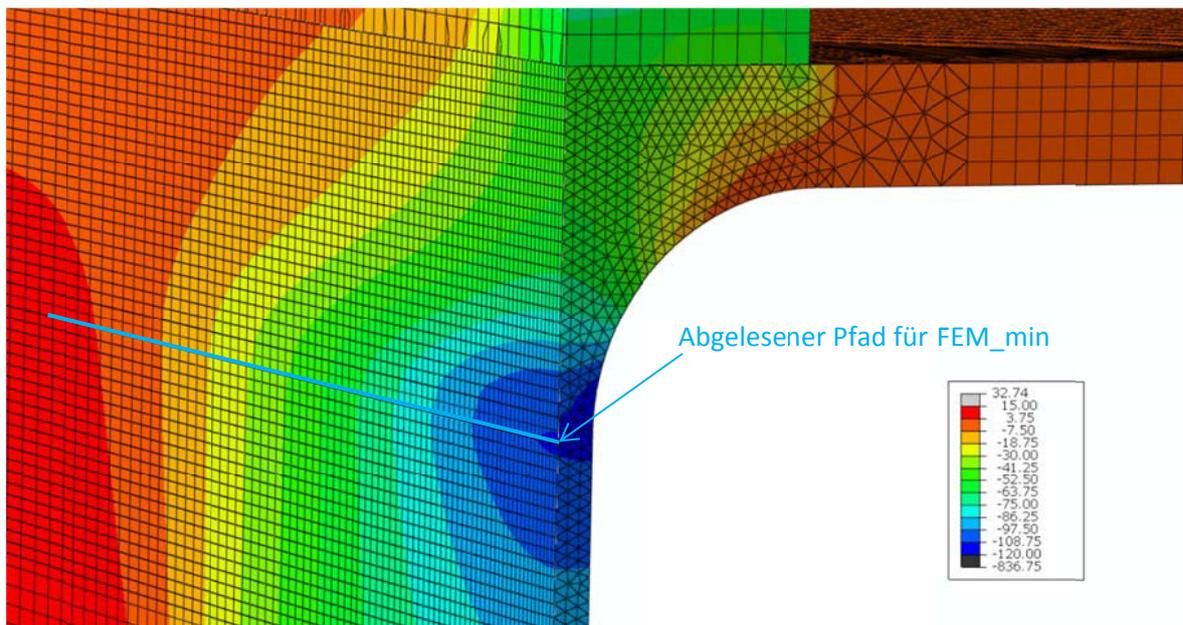


Abbildung 6-5: Vertikalspannungen in  $\text{N}/\text{mm}^2$  im Schnitt durch die vertikale Achse des Steges bei zentraler Belastung

Die strichlierte Linie (FEM\_mean) in den Diagrammen stellt den Mittelwert aus FEM\_max und FEM\_min dar.

### 6.1.4 Spannungsverteilung über die Stegdicke

Wie in Abbildung 6-4 ersichtlich, ist die Spannung über die Stegdicke nicht konstant, sondern ist an den Rändern größer als in der Mitte. In den gezeigten Ergebnissen werden jeweils die maximale Spannung sowie der Mittelwert aus minimaler und maximaler Spannung gezeigt. In den folgenden Abbildungen, wird die Querverteilung in y Richtung am Ende des Ausrundungsradius anhand eines Diagramms exemplarisch dargestellt.

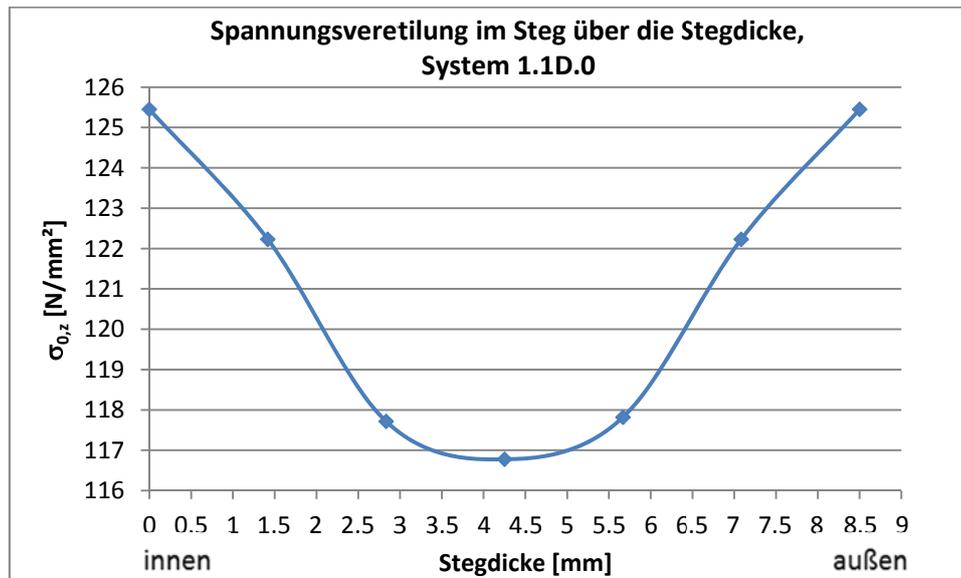


Abbildung 6-6: Spannung im Stag in y Richtung

Bei der Exzentrischen Belastung stellt sich ein linearer Spannungsverlauf im Stag ein (siehe Abbildung 6-7)

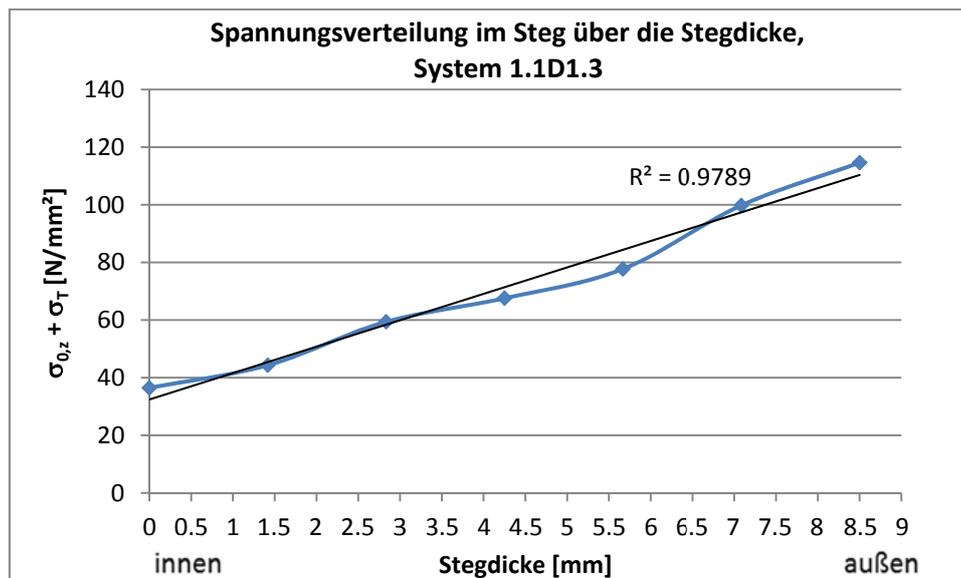


Abbildung 6-7: Spannungsverteilung im Stag in y Richtung bei exzentrischer Belastung

Die Abbildung 6-8 und Abbildung 6-9 zeigen die Ergebnisse aus der FE-Berechnung für die Systeme 1.1D.0 und 1.1D.3. Die berechneten Spannungen sind dabei auf die Drucknormalspannungen  $\sigma_{0,z,EC}$ , welche laut EN1993-6 [1] berechnet sind, bezogen. Zusätzlich wird beim zentrischen Belastungsfall (System 1.1D.0) die Spannungskurve nach Vögele (siehe Kapitel 3.4) dargestellt.

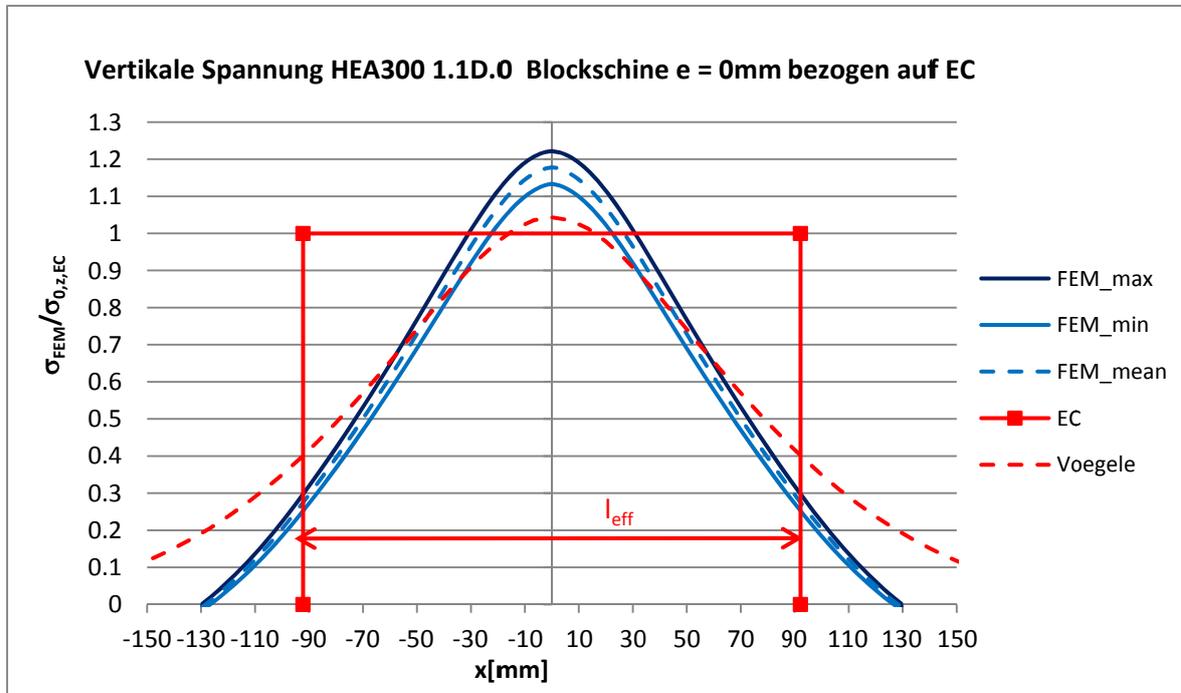


Abbildung 6-8: FE-Ergebnisse für das System 1.1D.0 (starre Schiene)

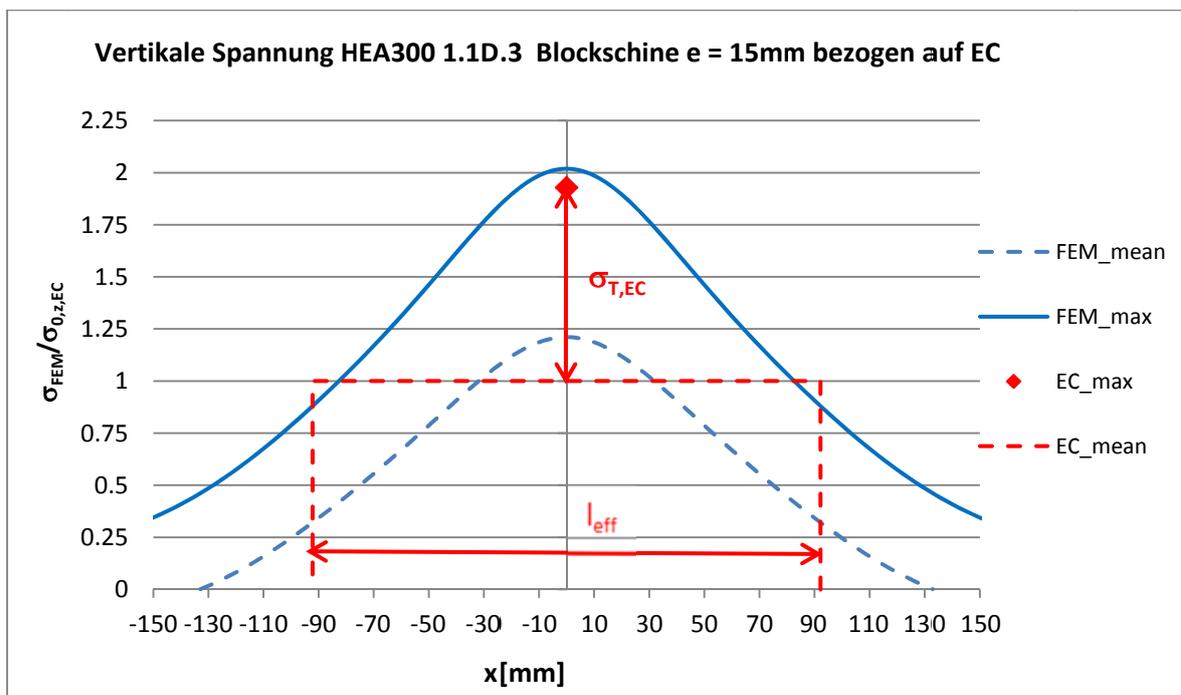


Abbildung 6-9: FE-Ergebnisse für das System 1.1D.3 (starre Schiene)

### 6.1.5 Ergebnisse HEA300 mit aufgeschweißter Blockschiene 1.1C.0 bzw. 1.1C.3

Die Abbildung 6-10 und Abbildung 6-11 zeigen die Ergebnisse aus der FE-Berechnung für die Systeme 1.1C.0 und 1.1C.3. Die berechneten Spannungen sind dabei auf die Drucknormalspannungen  $\sigma_{0,z,EC}$ , welche laut EN1993-6 [1] berechnet sind, bezogen. Zusätzlich wird beim zentrischen Belastungsfall (System 1.1C.0) die Spannungskurve nach Vögele (siehe Kapitel 3.4) dargestellt.

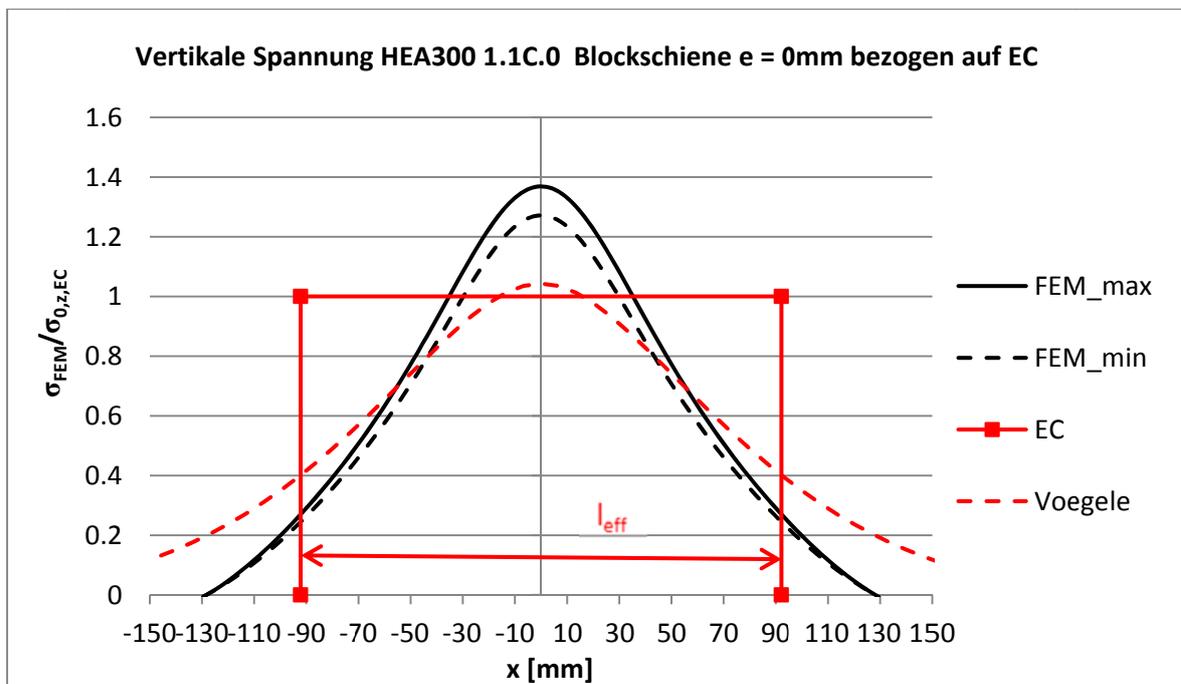


Abbildung 6-10: FE-Ergebnisse für das System 1.1C.0 (geschweißte Schiene)

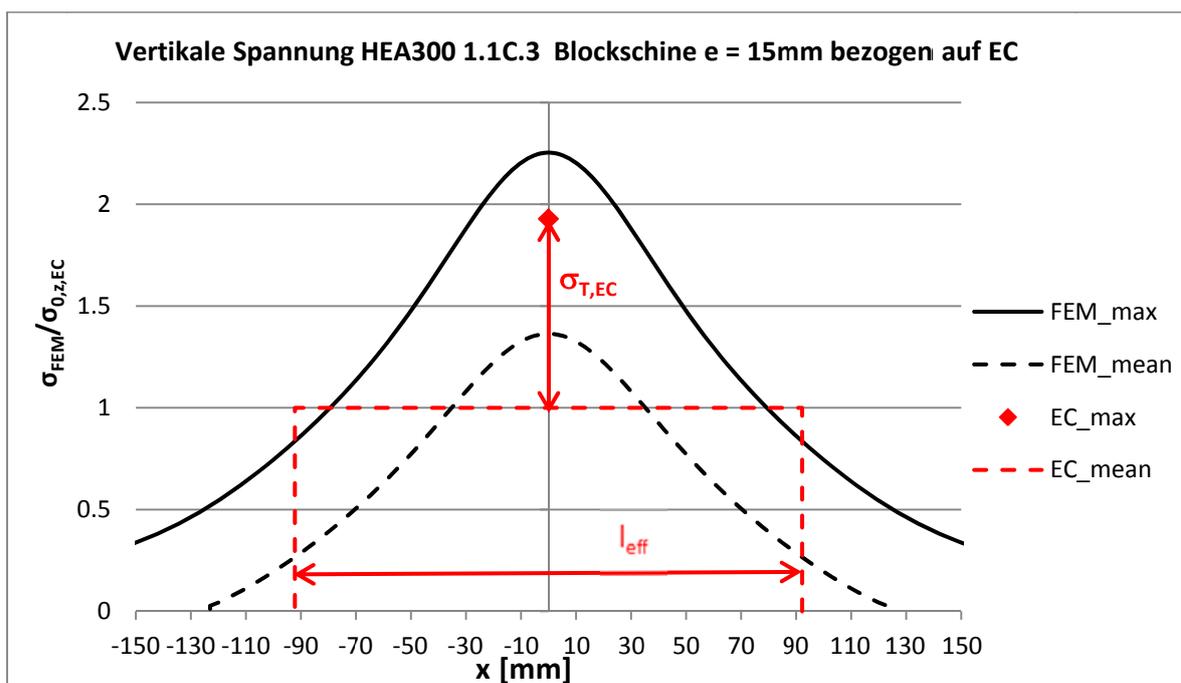


Abbildung 6-11: FE-Ergebnisse für das System 1.1C.3 (geschweißte Schiene)

Die Ergebnisse aus der FE-Berechnung (siehe Abbildung 6-8 bzw. Abbildung 6-10), des HEA 300 Querschnittes mit einer schubstarr verbundenen Blockschiene ( $b=60\text{mm}$ ;  $h=30\text{mm}$ ) liegen deutlich über jenen nach Eurocode [1]. Das System mit der vollständig verbundenen Schiene (siehe Abbildung 6-8) stimmt etwas besser mit der Normberechnung überein ( 22% Abweichung). Beim System mit der aufgeschweißten Schiene (siehe Abbildung 6-10) beträgt die Abweichung zur Norm 36%. Die Spannungskurve nach Vögele [5] (siehe Kapitel 3.4) weist eine größere Lastausbreitung in Trägerlängsrichtung auf (flachere Kurve), stimmt aber sehr gut mit den Normberechnungen überein.

Bei den exzentrischen Fällen (siehe Abbildung 6-9 bzw. Abbildung 6-11) ist ersichtlich, dass der mittels EN1993-6 [1] berechnete Biegespannungsanteil für I-Profile ein sehr gutes Ergebnis liefert, dass jedoch der Normalspannungsanteil zu gering ist (siehe EC\_mean zu FEM\_mean) und somit die Gesamtspannung unterschätzt wird.

### 6.1.6 Ergebnisse HEA300 mit lose aufliegender Blockschiene 1.1A.0 bzw. 1.1A.3

Die Abbildung 6-12 und Abbildung 6-13 zeigen die Ergebnisse aus der FE-Berechnung für die Systeme 1.1A.0 und 1.1A.3. Die berechneten Spannungen sind dabei auf die Drucknormalspannungen  $\sigma_{0,z,EC}$ , welche laut EN1993-6 [1] berechnet sind, bezogen. Zusätzlich wird beim zentrischen Belastungsfall (System 1.1A.0) die Spannungskurve nach Vögele (siehe Kapitel 3.4) dargestellt.

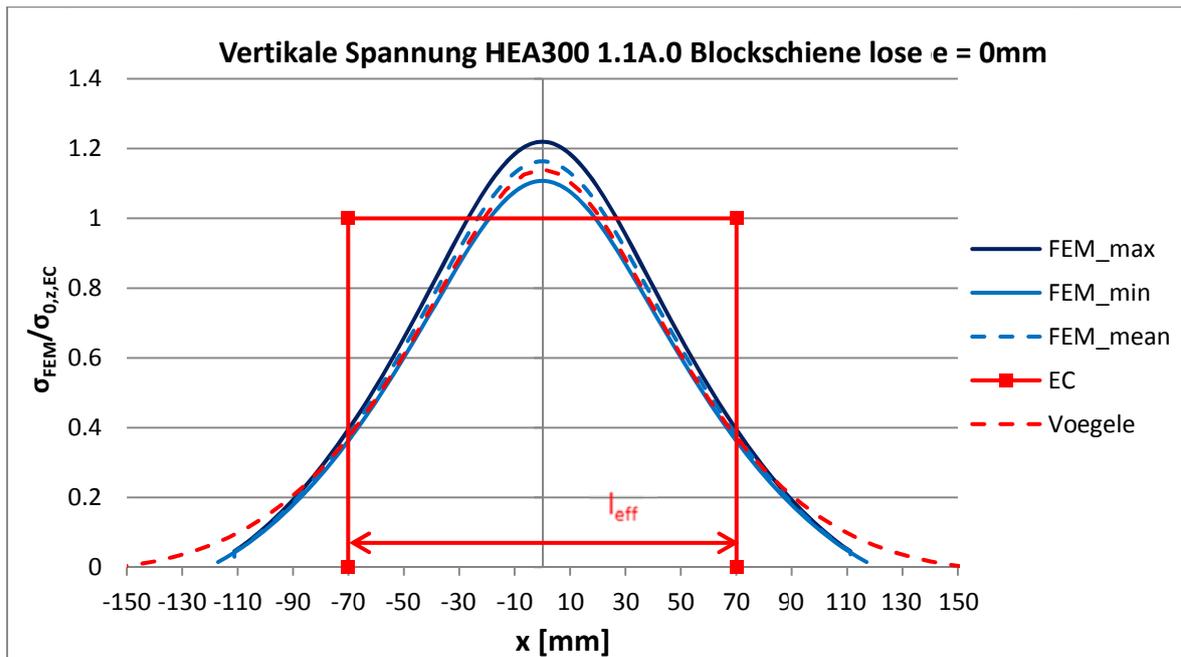


Abbildung 6-12: FE-Ergebnisse für das System 1.1A.0 (lose Schiene)

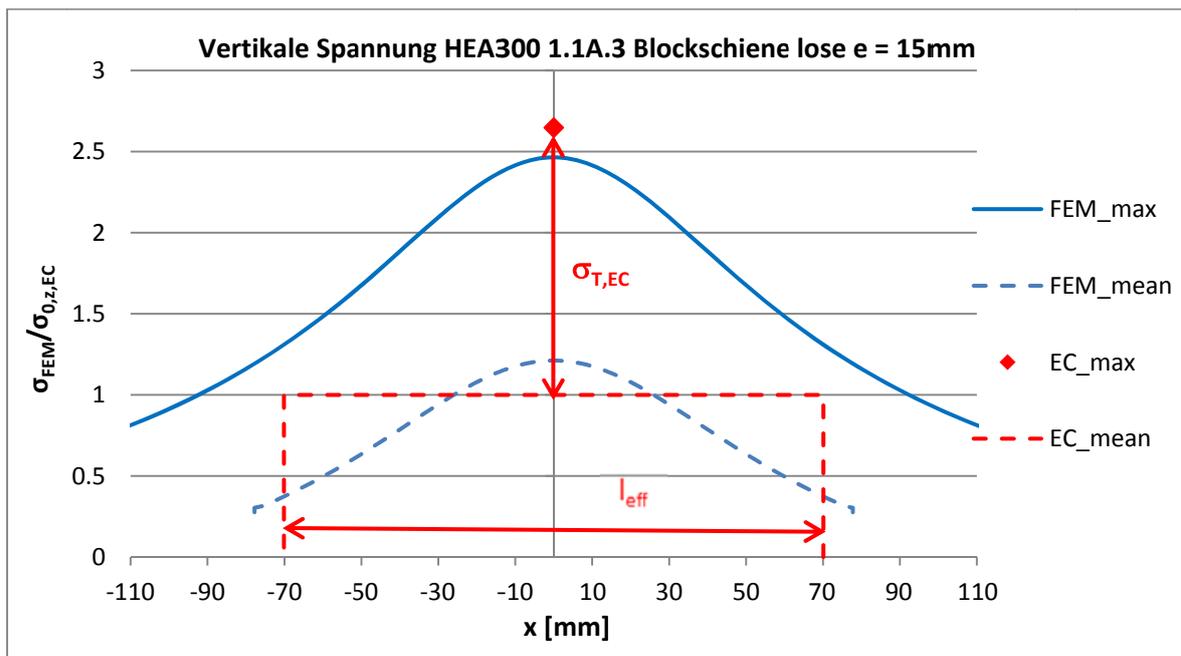


Abbildung 6-13: FE-Ergebnisse für das System 1.1A.3 (lose Schiene)

Das FE-Ergebnis des Systems 1.1A.0 (lose Schiene) liefert eine um 14% höhere Maximalspannung als die Berechnung nach Eurocode [1] (siehe Abbildung 6-12). Die Berechnung nach Vögele [5] (siehe Kapitel 3.4) stimmt in diesem Fall sehr gut mit der FE-Berechnung überein. Die gesamte Spannungskurve ist etwas steiler (geringere Lastausbreitungslänge) als die des Systems mit starrere Schiene (siehe Abbildung 6-8)

Für den exzentrischen Fall liefert der Eurocode [1] für die Maximalspannung bei diesem System ein konservatives Ergebnis (siehe Abbildung 6-13), die Drucknormalspannung ist jedoch auch hier zu gering.

### 6.1.7 Ergebnisse HEA300 mit A45 Schiene 1.45B.0 bzw. 1.45B.3

Die FE-Berechnung des HEA 300 Querschnitt mit der Schiene vom Type A45 (siehe Abbildung 2-2) erfolgt mit folgendem System (siehe Abbildung 6-14).

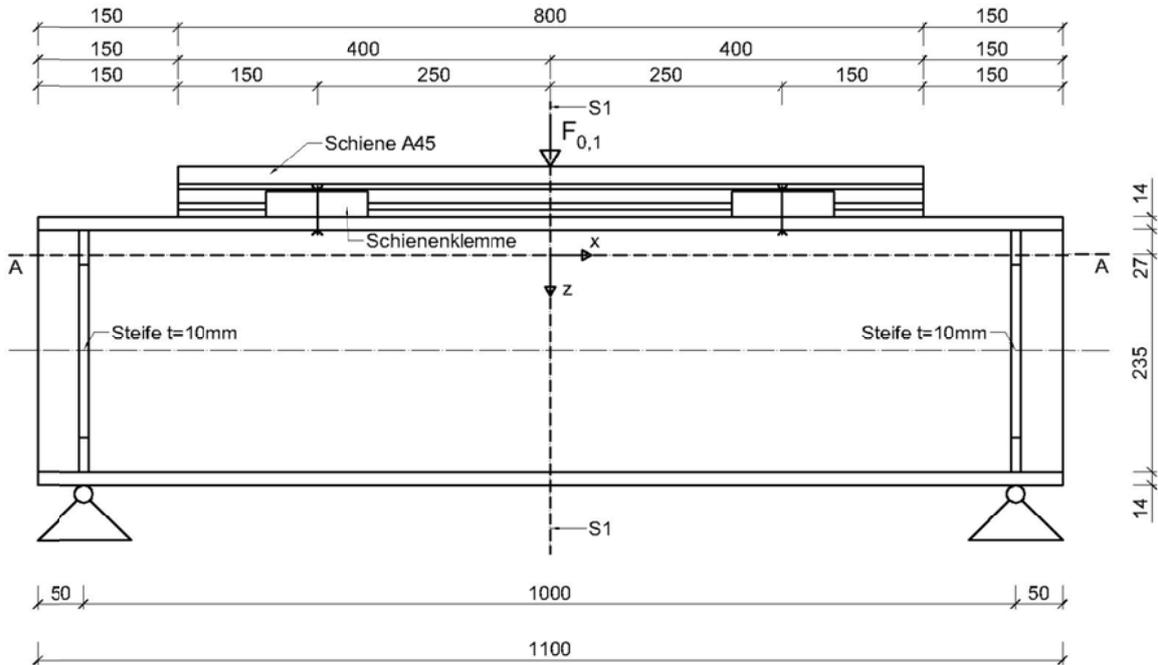


Abbildung 6-14: System HEA300 mit A45

Die Abbildung 6-15 zeigt den Schnitt S1 durch das System und die Lastanordnung.

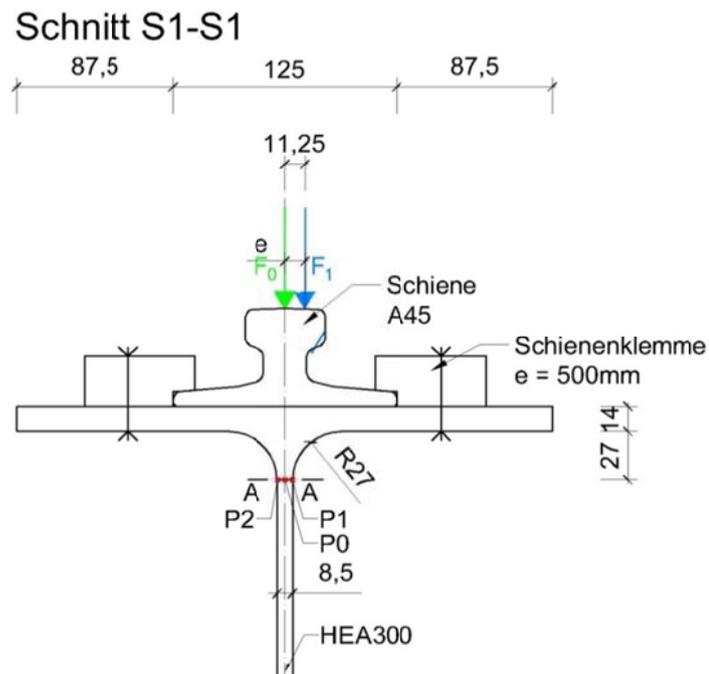


Abbildung 6-15: Detail HEA300 mit A45

In Abbildung 6-16 und Abbildung 6-17 ist das Ergebnis des zentrischen Belastungsfall mit einer Belastung von 150kN dargestellt.

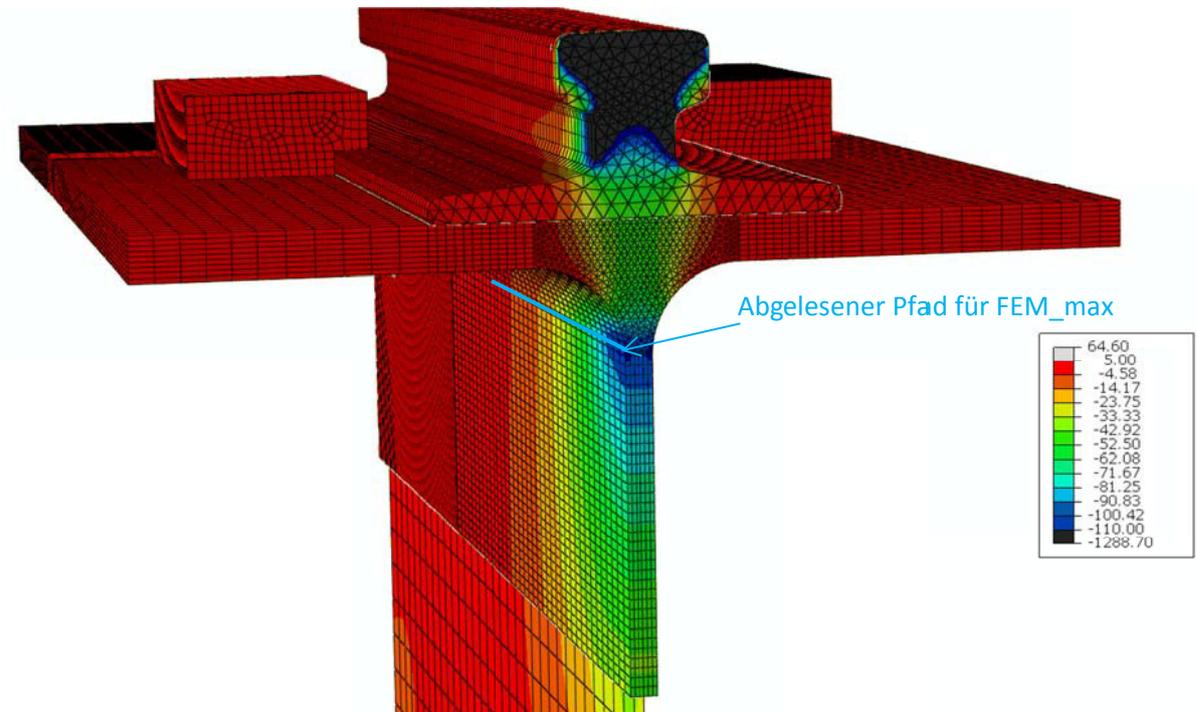


Abbildung 6-16: maximale Spannungen in N/mm<sup>2</sup> Belastung = 150kN

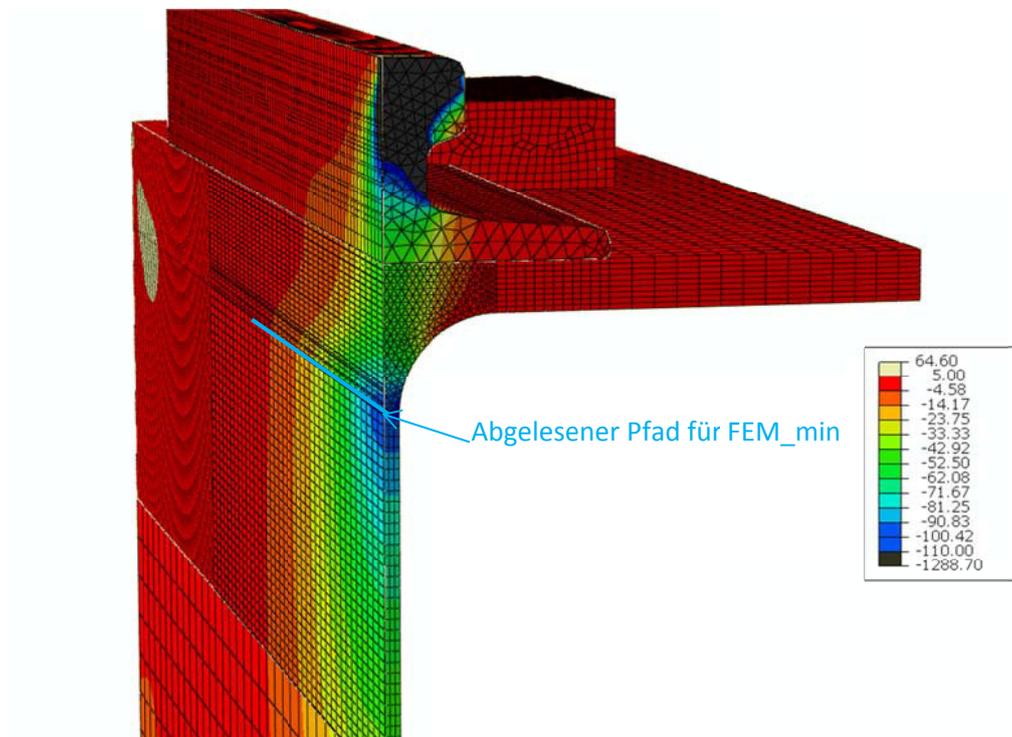


Abbildung 6-17: minimale Spannungen in N/mm<sup>2</sup> Belastung = 150kN

Die Abbildung 6-18 und Abbildung 6-19 zeigen die Ergebnisse aus der FE-Berechnung für die Systeme 1.45B.0 und 1.45B.3. Die berechneten Spannungen sind dabei auf die Drucknormalspannungen  $\sigma_{0,z,EC}$ , welche laut EN1993-6 [1] berechnet sind, bezogen. Zusätzlich wird beim zentrischen Belastungsfall (System 1.45B.0) die Spannungskurve nach Vögele (siehe Kapitel 3.4) dargestellt.

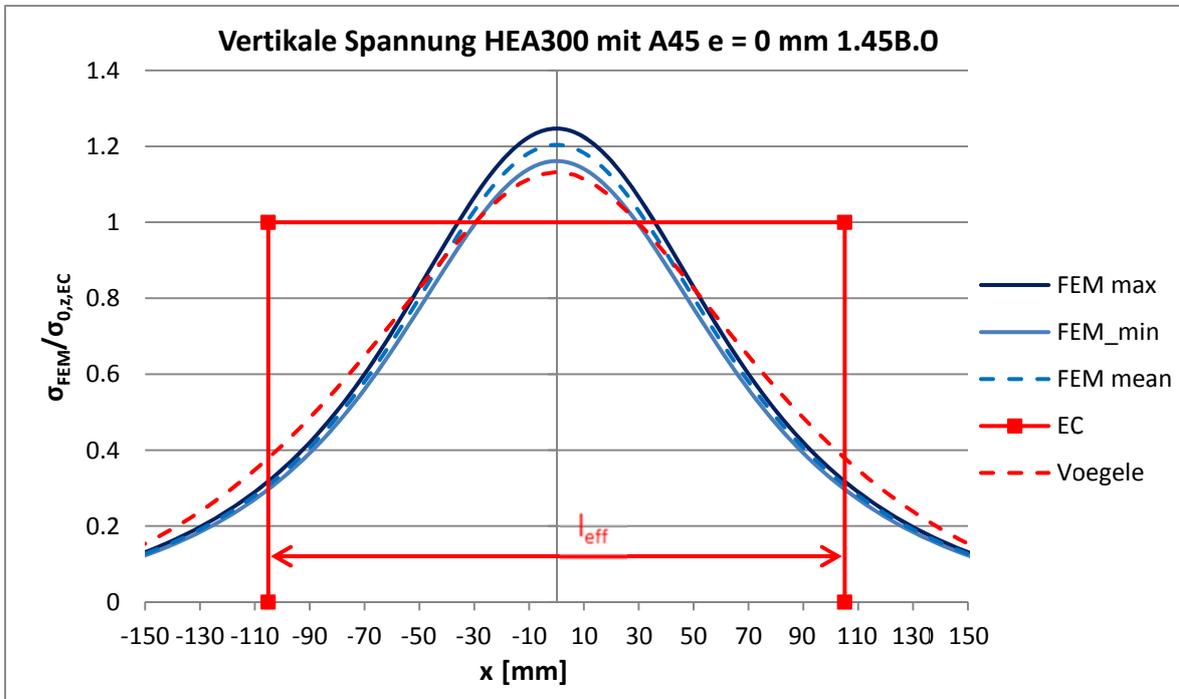


Abbildung 6-18: FE-Ergebnisse für das System 1.45B.0 (geklemmte Schiene)

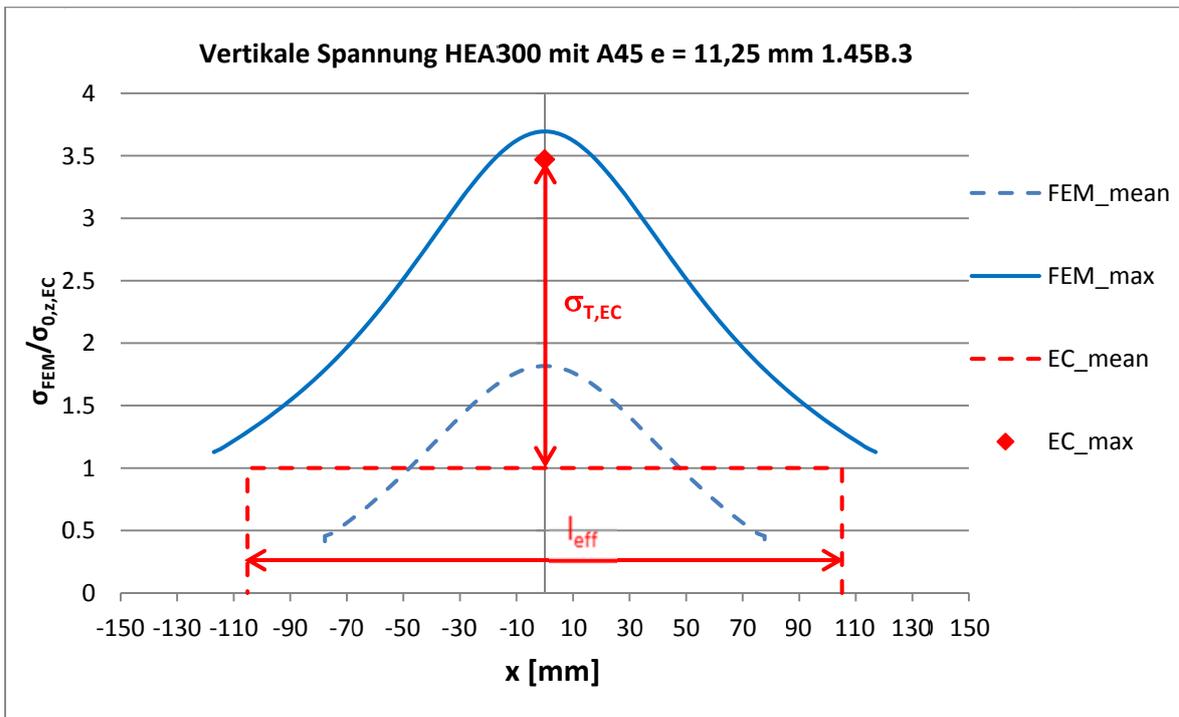


Abbildung 6-19: FE-Ergebnisse für das System 1.45B.3 (geklemmte Schiene)

Im Gegensatz zur lose aufliegenden Blockschiene ist bei der A45 Schiene die Spannungskurve breiter. Die mittleren Drucknormalspannungen liegen beim zentrischen Fall 20% über dem Normwert. Die Berechnung nach Vögele [5] stimmt relativ gut mit der FE-Berechnung überein, ist jedoch auch um 7% niedriger als die Berechnung nach EN 1993-6 [1] (siehe Abbildung 6-18)

Beim exzentrischen Fall zeigt sich, dass die Drucknormalspannung laut EN 1993-6 [1] um 80% niedriger ist als jene der FE-Berechnung.

### 6.1.8 Ergebnisse HEA300 mit A75 Schiene 1.75B.0 bzw. 1.75B.3

Die FE-Berechnung des HEA 300 Querschnitt mit der Schiene vom Type A75 (siehe Abbildung 2-2) erfolgt mit folgendem System (siehe Abbildung 6-20).

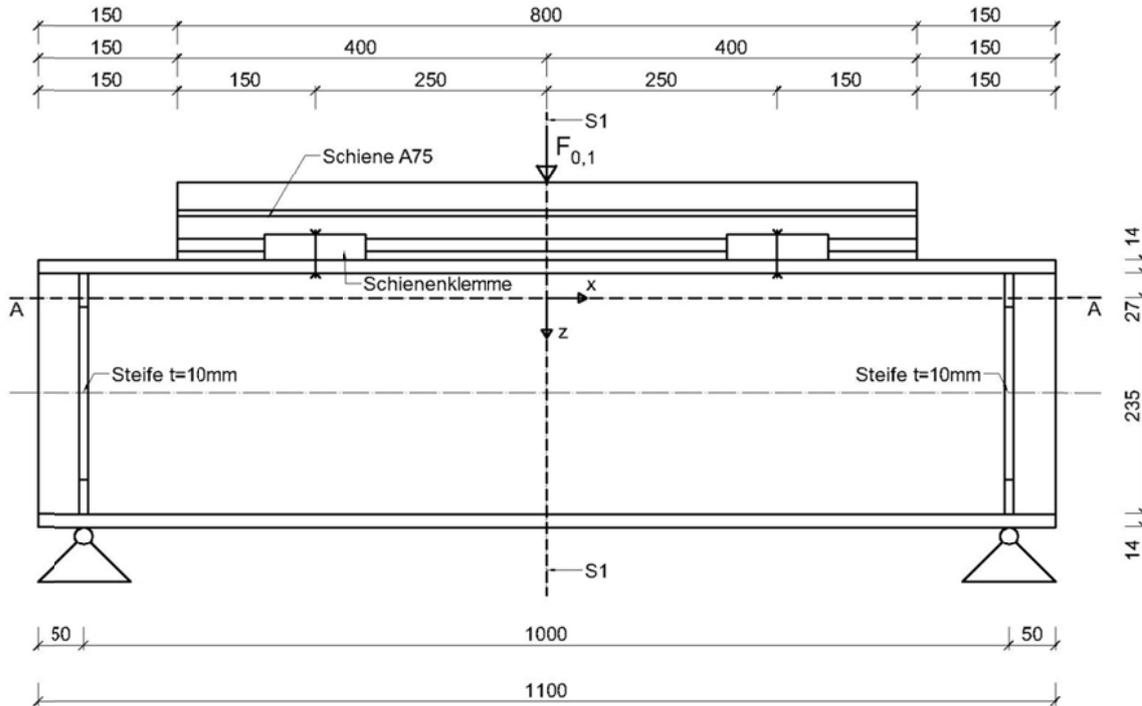


Abbildung 6-20: System HEA300 mit A75

Die Abbildung 6-21 zeigt den Schnitt S1 durch das System und die Lastanordnung.

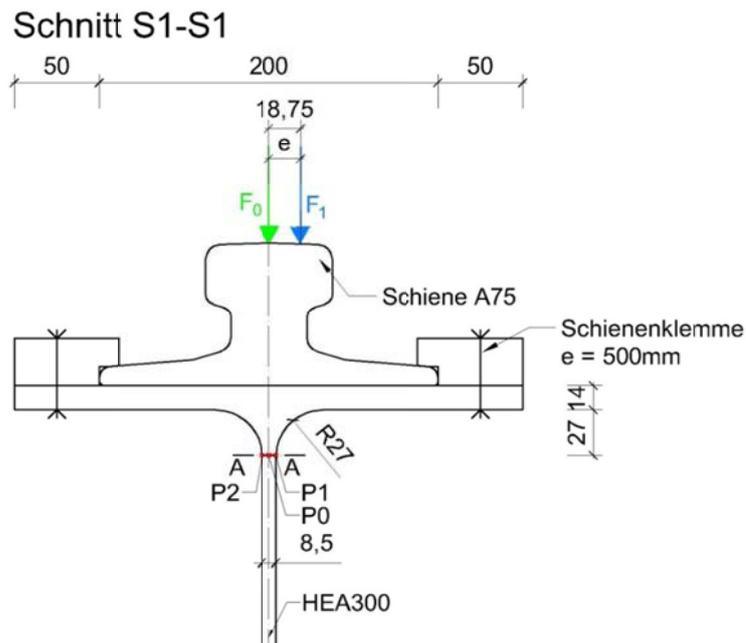


Abbildung 6-21: Detail HEA300 mit A75

In Abbildung 6-22 und Abbildung 6-23 ist das Ergebnis des zentrischen Belastungsfall mit einer Belastung von 150kN dargestellt.

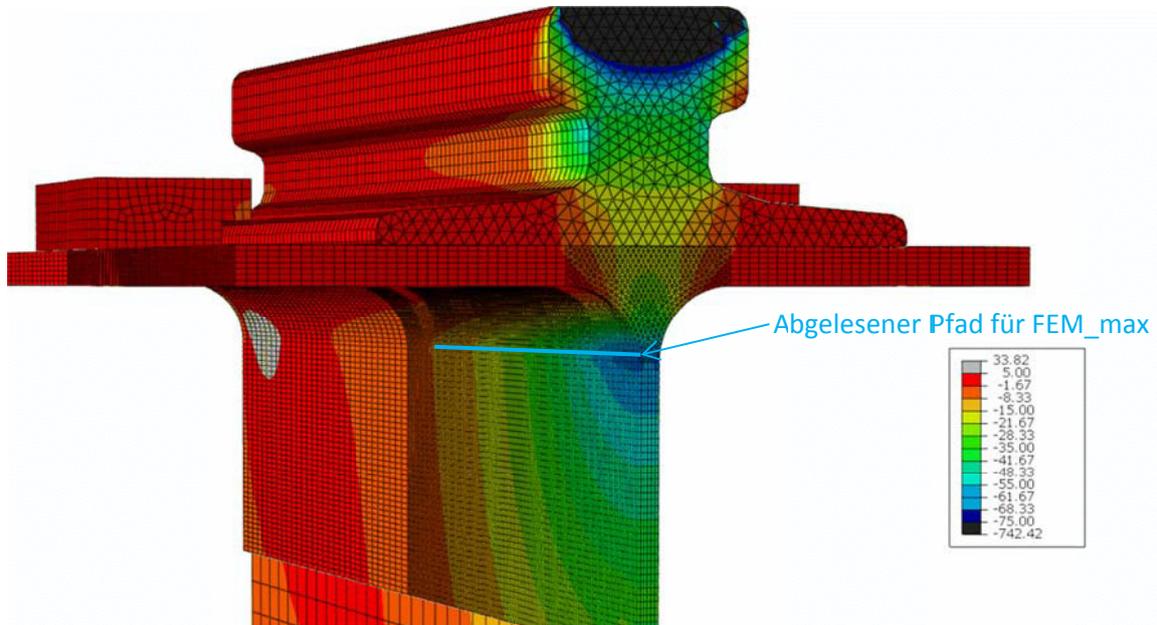


Abbildung 6-22: maximale Spannungen in N/mm<sup>2</sup> Belastung = 150kN

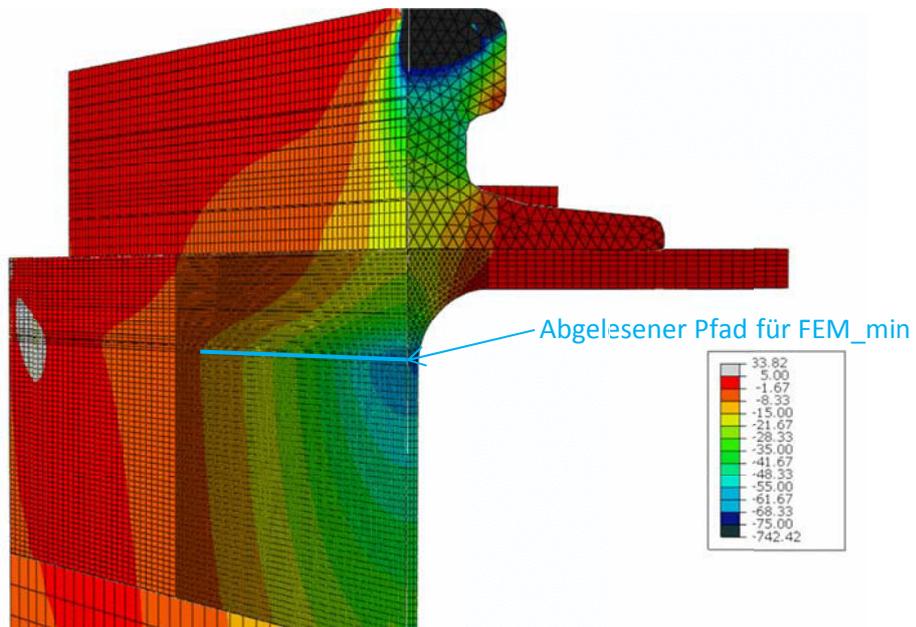


Abbildung 6-23: minimale Spannungen in N/mm<sup>2</sup> Belastung = 150kN

Die Abbildung 6-24 und Abbildung 6-25 zeigen die Ergebnisse aus der FE-Berechnung für die Systeme 1.75B.0 und 1.75B.3. Die berechneten Spannungen sind dabei auf die Drucknormalspannungen  $\sigma_{0,z,EC}$ , welche laut EN1993-6 [1] berechnet sind, bezogen. Zusätzlich wird beim zentralen Belastungsfall (System 1.75B.0) die Spannungskurve nach Vögele (siehe Kapitel 3.4) dargestellt.

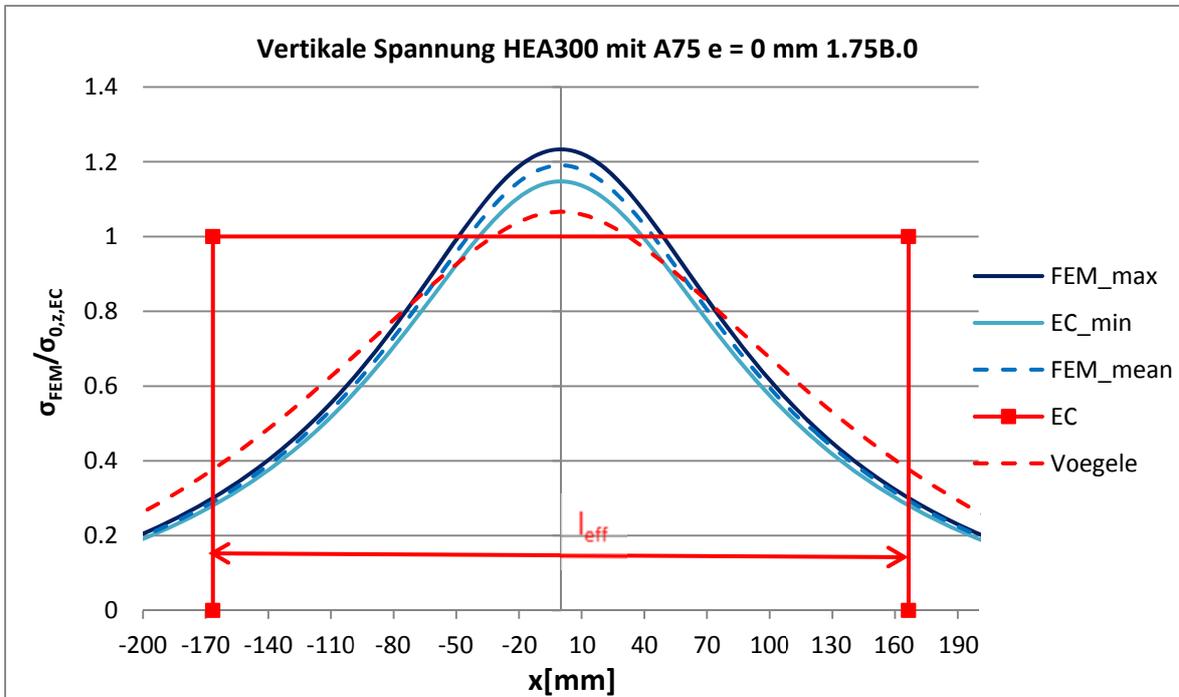


Abbildung 6-24: FE-Ergebnisse für das System 1.75B.0 (geklemmte Schiene)

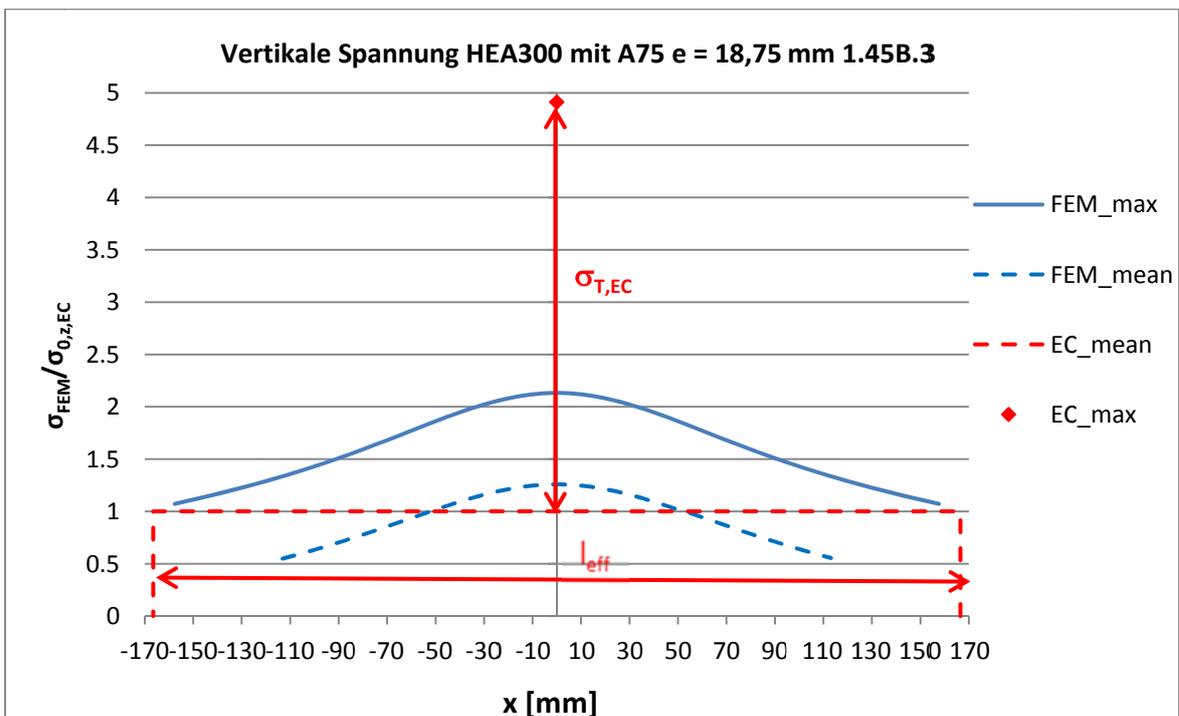


Abbildung 6-25: FE-Ergebnisse für das System 1.75B.3 (geklemmte Schiene)

Dadurch, dass die A75 Schiene relativ steif ist, ergibt sich beim System 1.75B.0 bzw. 1.75B.0 eine sehr breite Spannungskurve. Wie bei den vorherigen Systemen liegt auch hier die maximale Druckspannung über den laut EN 1993-6[1] berechneten Wert (23%). Auch die Maximalspannung nach Vögele[5] liegt unter dem aus der FE-Berechnung (siehe Abbildung 6-25).

Beim System 1.75B.3 stimmt der Maximalwert laut EN 1993-6 [1] überhaupt nicht mit den Berechneten überein. Der Wert laut Norm ist um ein vielfaches höher als jener der FE-Berechnung (siehe Abbildung 6-25).

## 6.2 FE Analyse I-Profil geschweißt (Querschnitt 2)[6]

Um den Unterschied zwischen einem geschweißten und einem gewalzten I Querschnitt besser darstellen zu können, wird ein geschweißtes I Profil mit den gleichen Abmessungen wie das HEA300 Profil gewählt. Die Berechnungen werden mit demselben System wie in Kapitel 6.1 beschrieben (siehe Abbildung 6-26), der einzige Unterschied ist, dass das Profil keinen Ausrundungsradius aufweist und die maximale lokale Spannung im Steg direkt unter dem Oberflansch auftritt (siehe Abbildung 6-27).

### 6.2.1 System für 2.1D.0, 2.1D.3, 2.1C.0, 2.1C.3, 2.1A.0, 2.1A.3

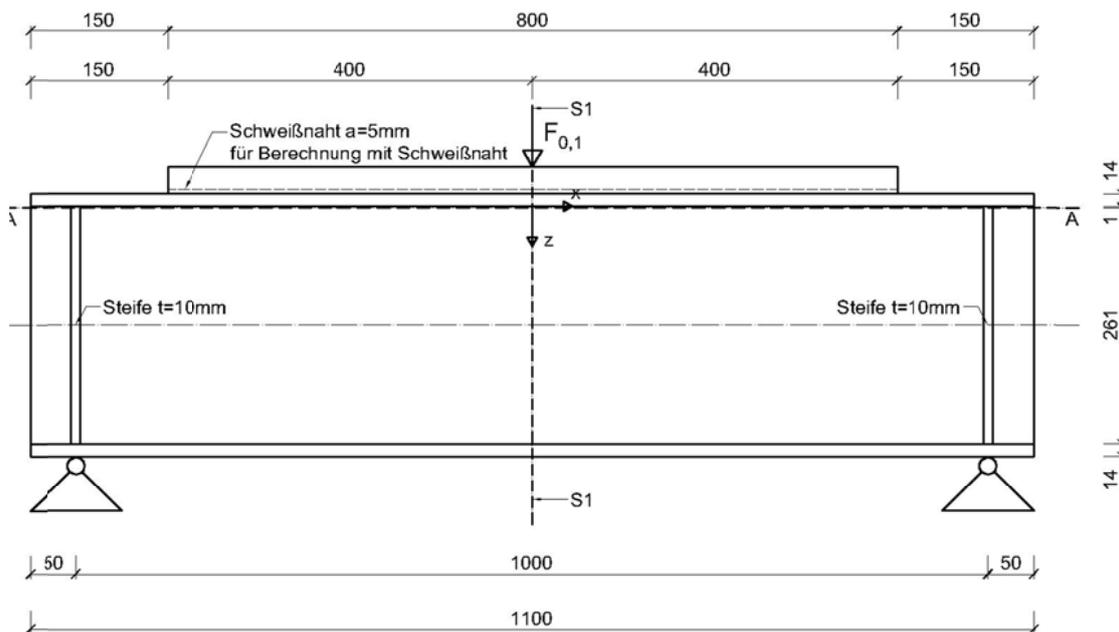


Abbildung 6-26: System geschweißtes I Profil mit Blockschiene

### Schnitt S1-S1

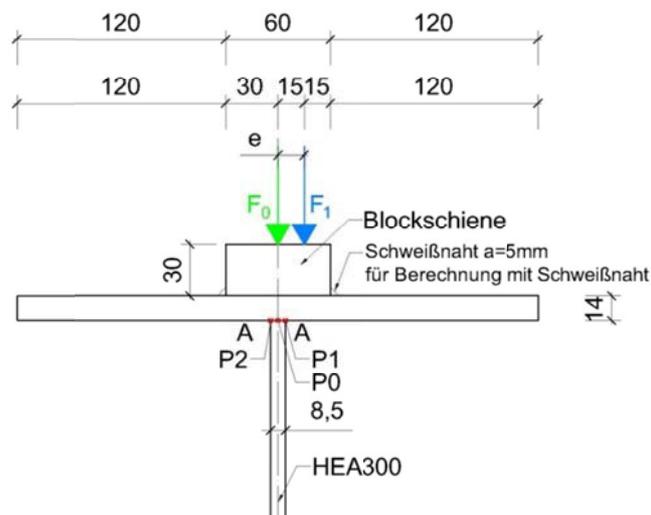


Abbildung 6-27: Detail geschweißtes I Profil mit Blockschiene

In Abbildung 6-28 und Abbildung 6-29 ist das Ergebnis des zentrischen Belastungsfall mit einer Belastung von 135kN dargestellt.

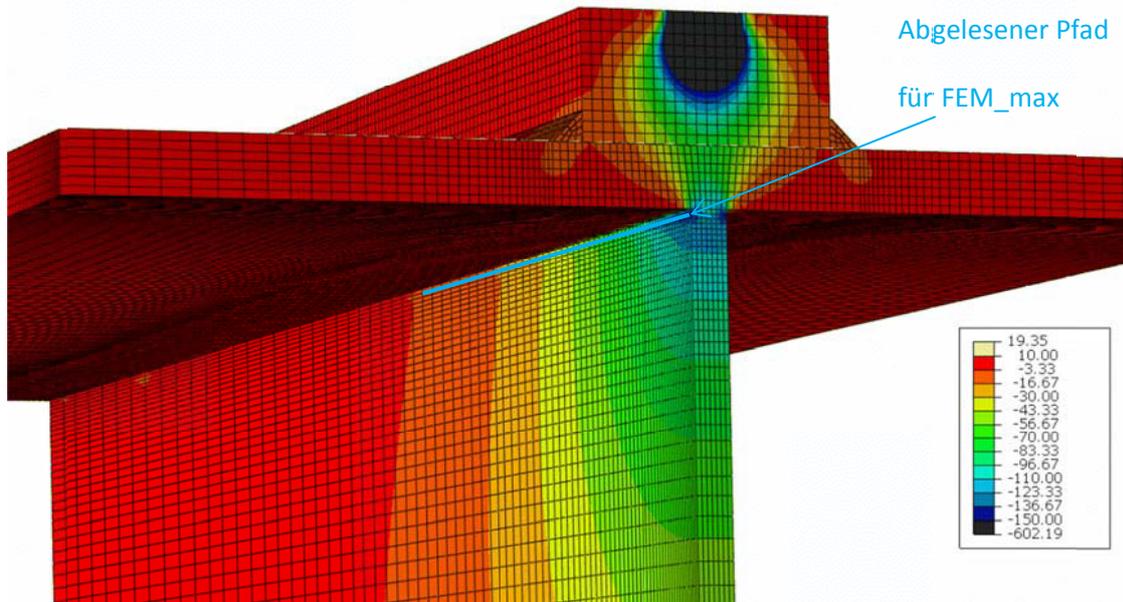


Abbildung 6-28: maximale Spannungen in  $\text{N}/\text{mm}^2$  Belastung = 135kN

In Abbildung 6-28 ist zu erkennen, dass die maximale vertikale Spannung bei der FE-Berechnung nicht direkt am Übergang von Flansch in Steg auftritt sondern ca. 1 mm darunter. Die abgelesenen Spannungen entsprechen den maximalen also bei  $z = 1\text{mm}$  und nicht jenen direkt am Übergang.

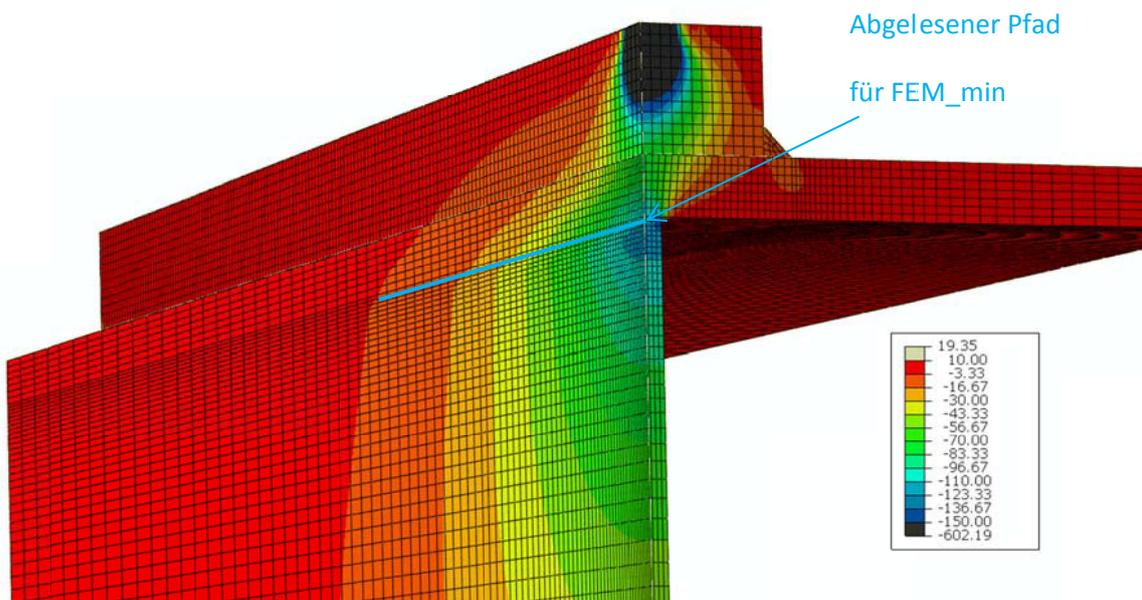


Abbildung 6-29: minimale Spannungen in  $\text{N}/\text{mm}^2$  Belastung = 135kN

## 6.2.2 Ergebnisse geschw. I Profil Blockschiene mit starrem Verbund 2.1D.0 bzw. 2.1D.3

Die Abbildung 6-30 und Abbildung 6-31 zeigen die Ergebnisse aus der FE-Berechnung für die Systeme 2.1D.0 und 2.1D.3. Die berechneten Spannungen sind dabei auf die Drucknormalspannungen  $\sigma_{0,z,EC}$ , welche laut EN1993-6 [1] berechnet sind, bezogen. Zusätzlich wird beim zentrischen Belastungsfall (System 2.1D.0) die Spannungskurve nach Vögele (siehe Kapitel 3.4) dargestellt.

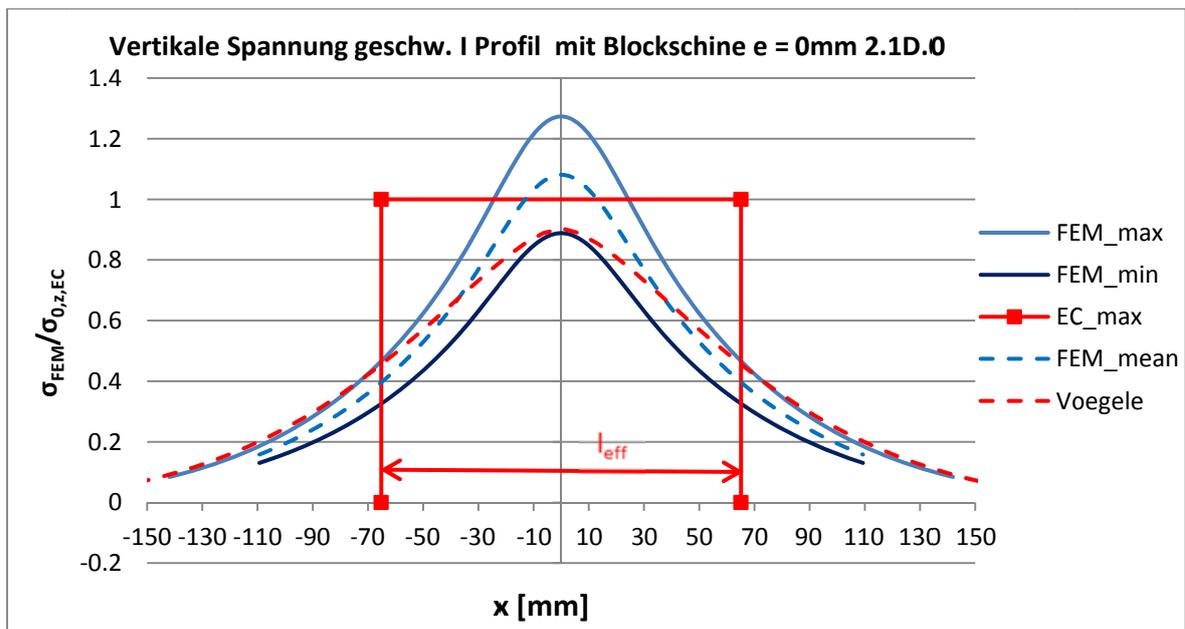


Abbildung 6-30: FE-Ergebnisse für das System 2.1D.0 (starre Schiene)

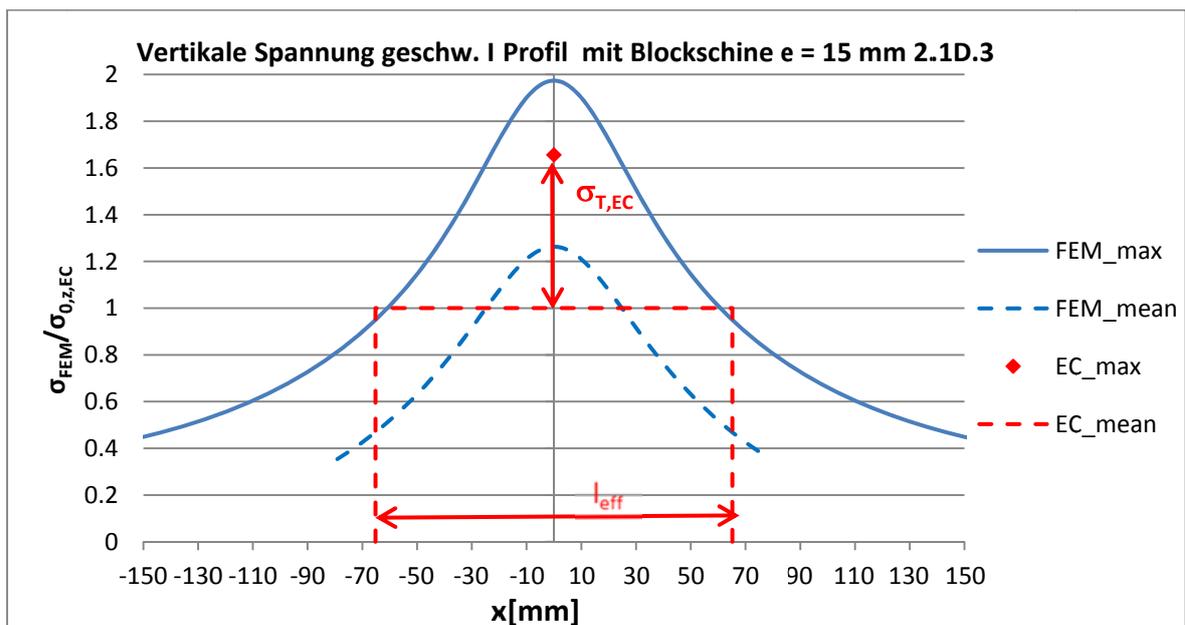


Abbildung 6-31: FE-Ergebnisse für das System 2.1D.3 (starre Schiene)

### 6.2.3 Ergebnisse geschw. I Profil mit aufgeschweißter Blockschiene 2.1C.0 bzw. 2.1C.3

Die Abbildung 6-32 und Abbildung 6-33 zeigen die Ergebnisse aus der FE-Berechnung für die Systeme 2.1C.0 und 2.1C.3. Die berechneten Spannungen sind dabei auf die Drucknormalspannungen  $\sigma_{0,z,EC}$ , welche laut EN1993-6 [1] berechnet sind, bezogen. Zusätzlich wird beim zentrischen Belastungsfall (System 2.1C.0) die Spannungskurve nach Vögele (siehe Kapitel 3.4) dargestellt.

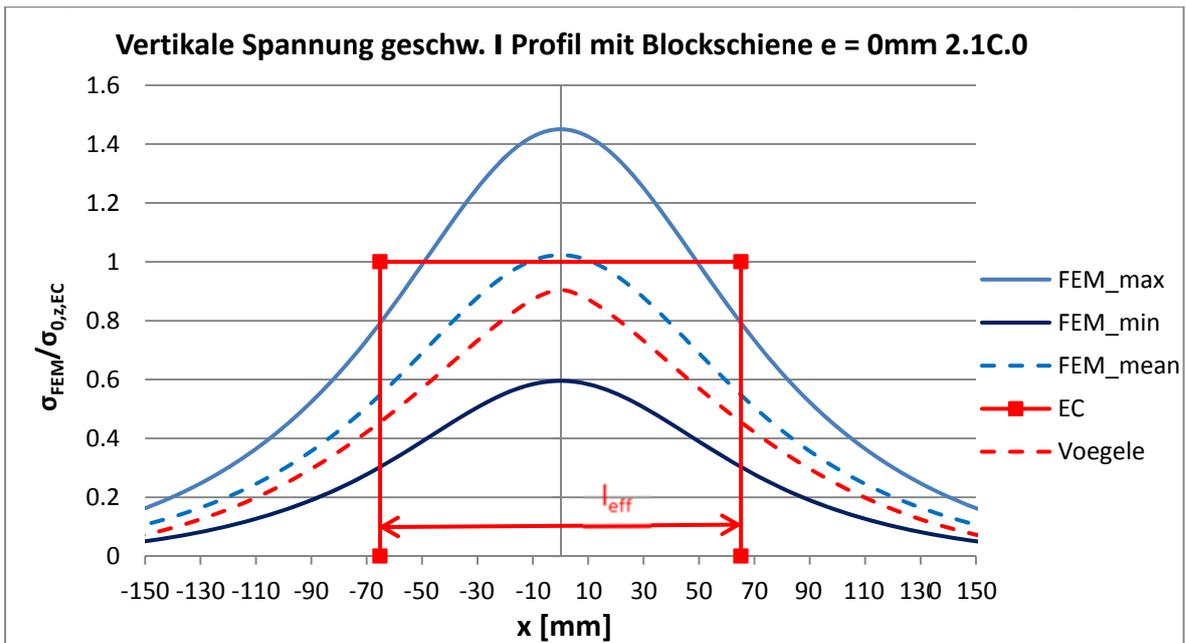


Abbildung 6-32: FE-Ergebnisse für das System 2.1C.0 (geschweißte Schiene)

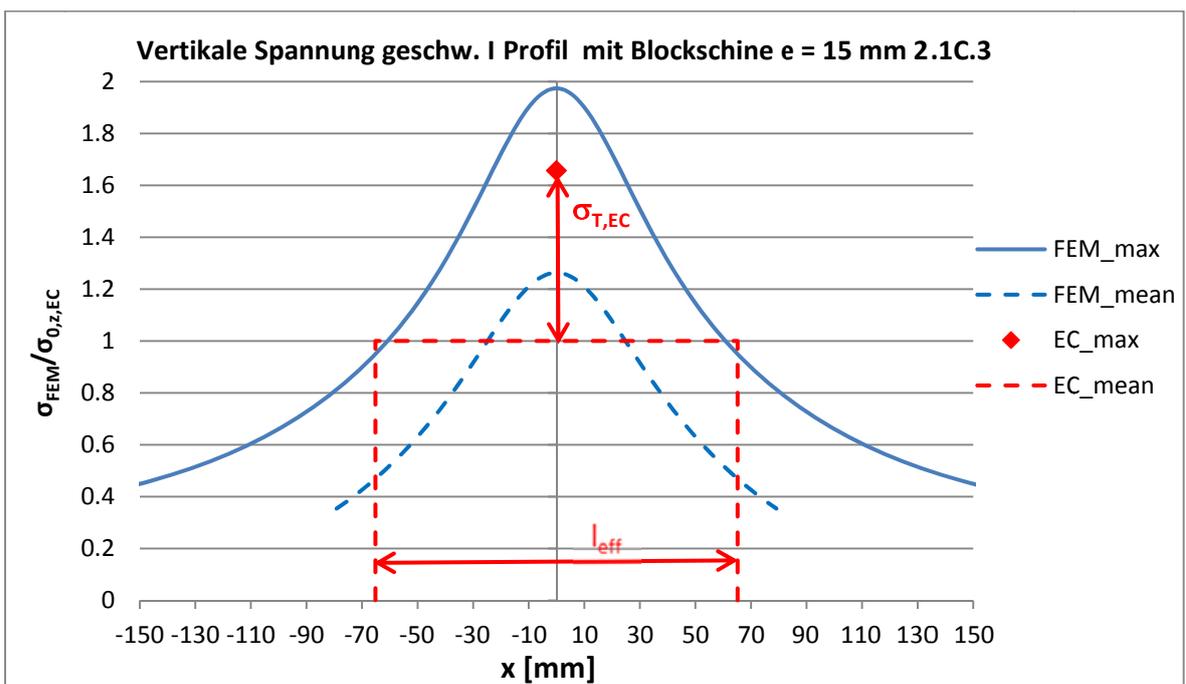


Abbildung 6-33: FE-Ergebnisse für das System 2.1C.3 (geschweißte Schiene)

Beim geschweißten I Profil ist im Gegensatz zum gewalzten der Unterschied zwischen der maximalen (FEM\_max) und minimalen (FEM\_min) Spannung im Stag stärker ausgeprägt.

Der Mittelwert der Spannung im Steg passt in diesem Fall gut mit der Norm überein, der Maximalwert liegt aber 45% über dem Normwert.

### 6.2.4 Ergebnisse geschw. I Profil mit lose aufliegender Blockschiene 2.1A.0 bzw. 2.1A.3

Die Abbildung 6-34 und Abbildung 6-35 zeigen die Ergebnisse aus der FE-Berechnung für die Systeme 2.1A.0 und 2.1A.3. Die berechneten Spannungen sind dabei auf die Drucknormalspannungen  $\sigma_{0,z,EC}$ , welche laut EN1993-6 [1] berechnet sind, bezogen. Zusätzlich wird beim zentrischen Belastungsfall (System 2.1A.0) die Spannungskurve nach Vögele (siehe Kapitel 3.4) dargestellt.

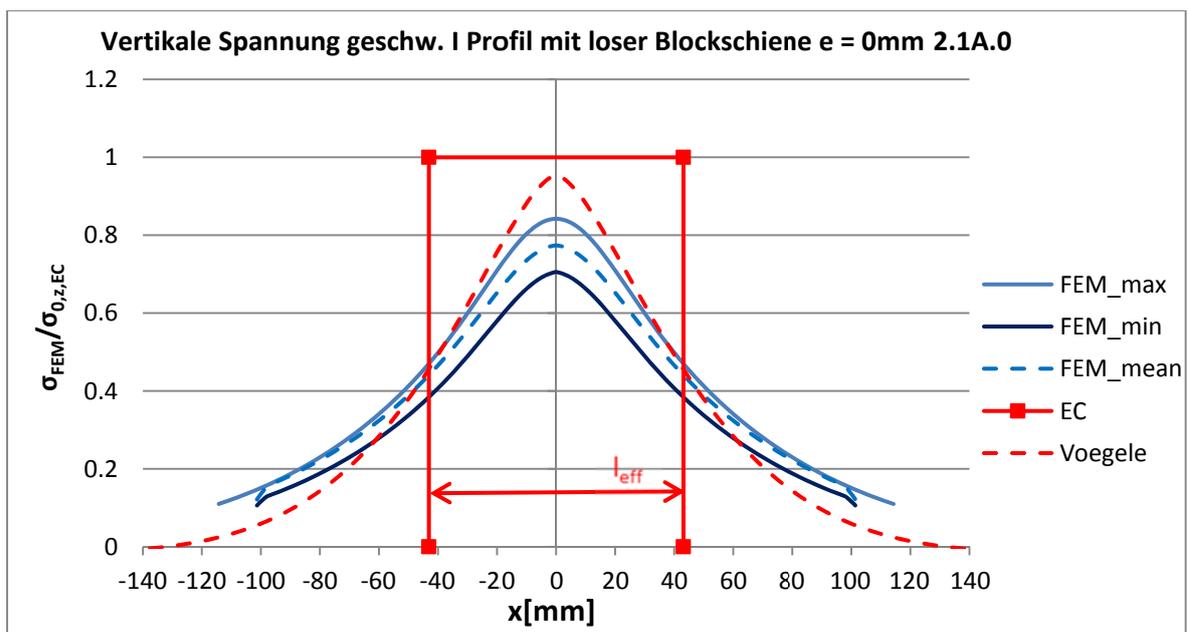


Abbildung 6-34: FE-Ergebnisse für das System 2.1A.0 (lose Schiene)

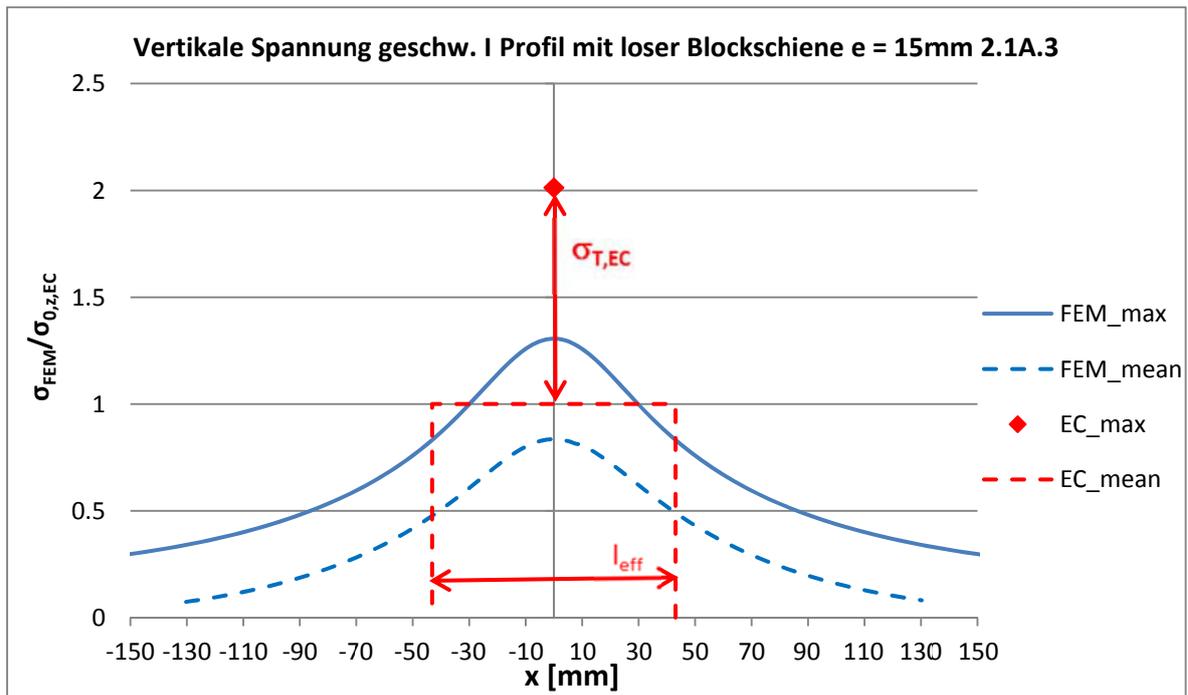


Abbildung 6-35: FE-Ergebnisse für das System 2.1A.3 (lose Schiene)

Beim System 2.1A.0 ist der maximale Spannungswert der FE-Berechnung um 23% kleiner als der mittels EN1993-6 [1] Berechnete (siehe Abbildung 6-34). Beim exzentrischen Belastungsfall (System 2.1A.3) ist der Normwert um 70% größer als der mittels FE-Berechnung ermittelte (siehe Abbildung 6-35).

### 6.2.5 Ergebnisse geschw. I Profil mit A45 Schiene 2.45B.0 bzw. 2.45B.3

Die FE-Berechnung des geschweißten I Profils mit der Schiene vom Type A45 (siehe Abbildung 2-2) erfolgt mit folgendem System (siehe Abbildung 6-36).

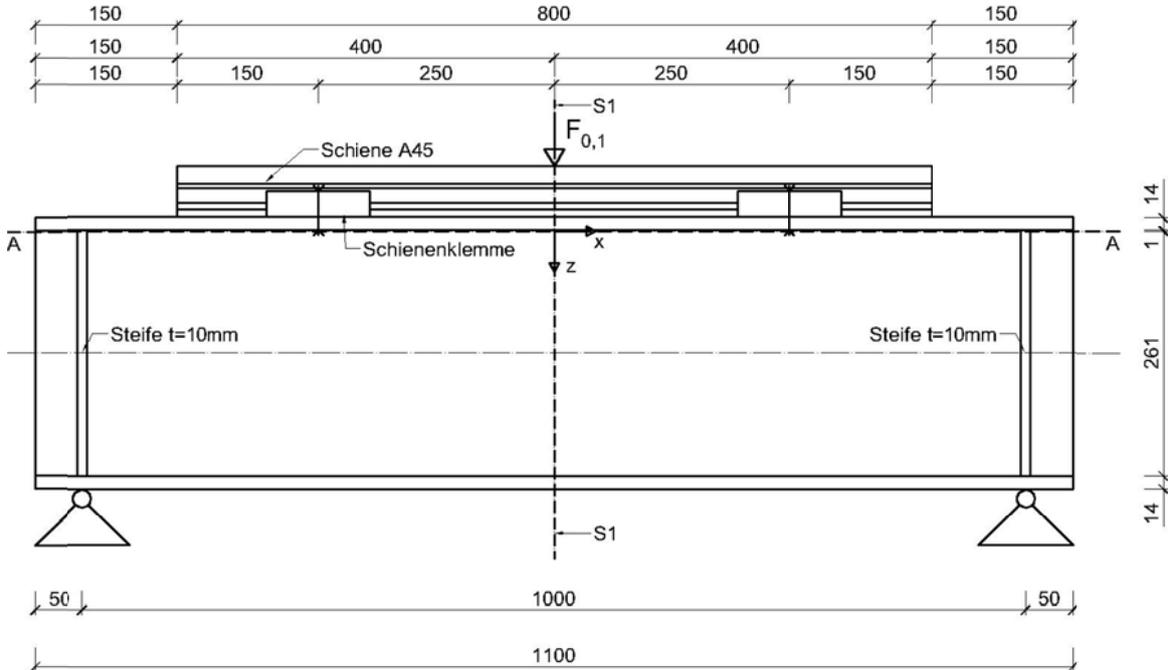


Abbildung 6-36: System geschweißtes I Profil mit A45

Die Abbildung 6-37 zeigt den Schnitt S1 durch das System und die Lastanordnung.

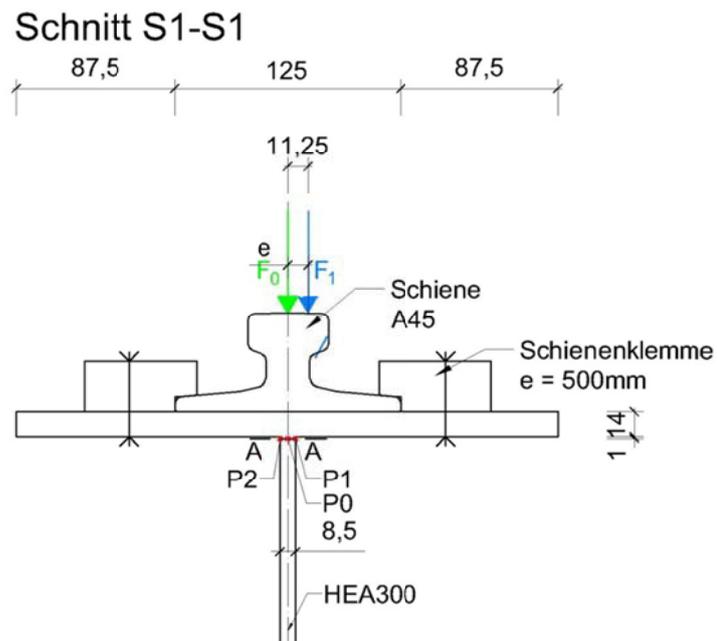


Abbildung 6-37: Detail geschweißtes I Profil mit A45

In Abbildung 6-38 und Abbildung 6-39 ist das Ergebnis des zentrischen Belastungsfall mit einer Belastung von 135kN dargestellt.

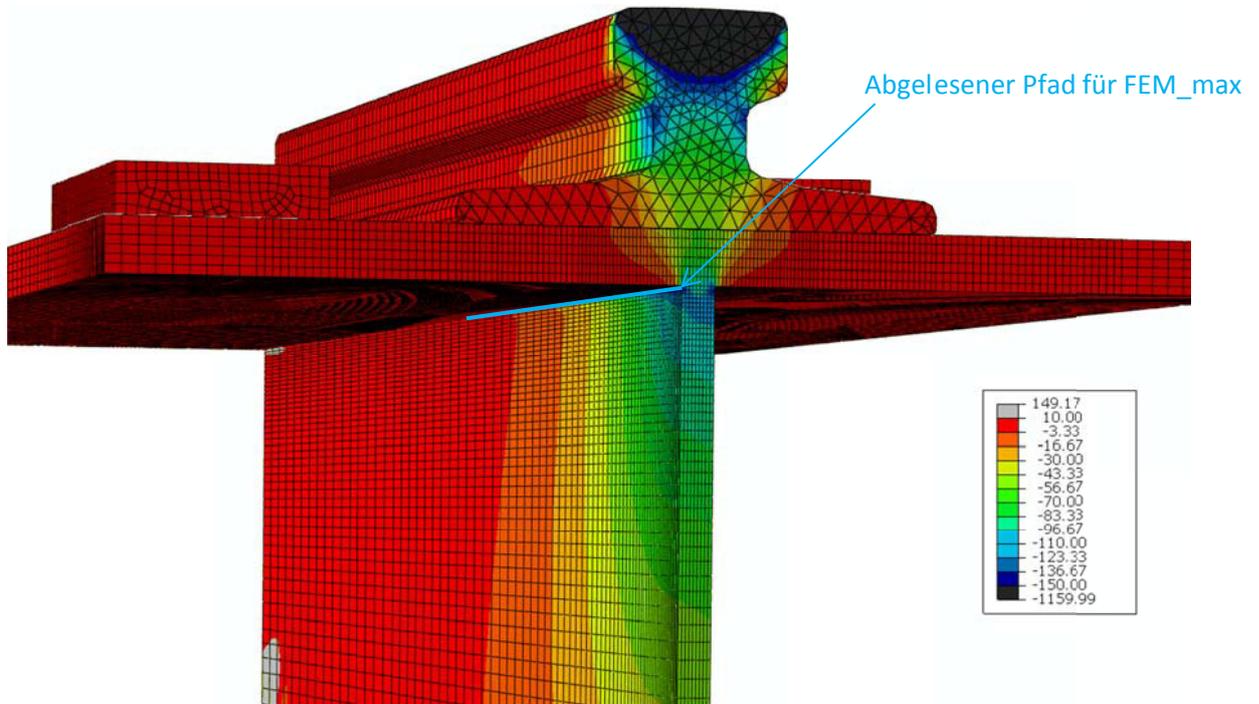


Abbildung 6-38: maximale Spannungen in N/mm<sup>2</sup> Belastung = 135 kN

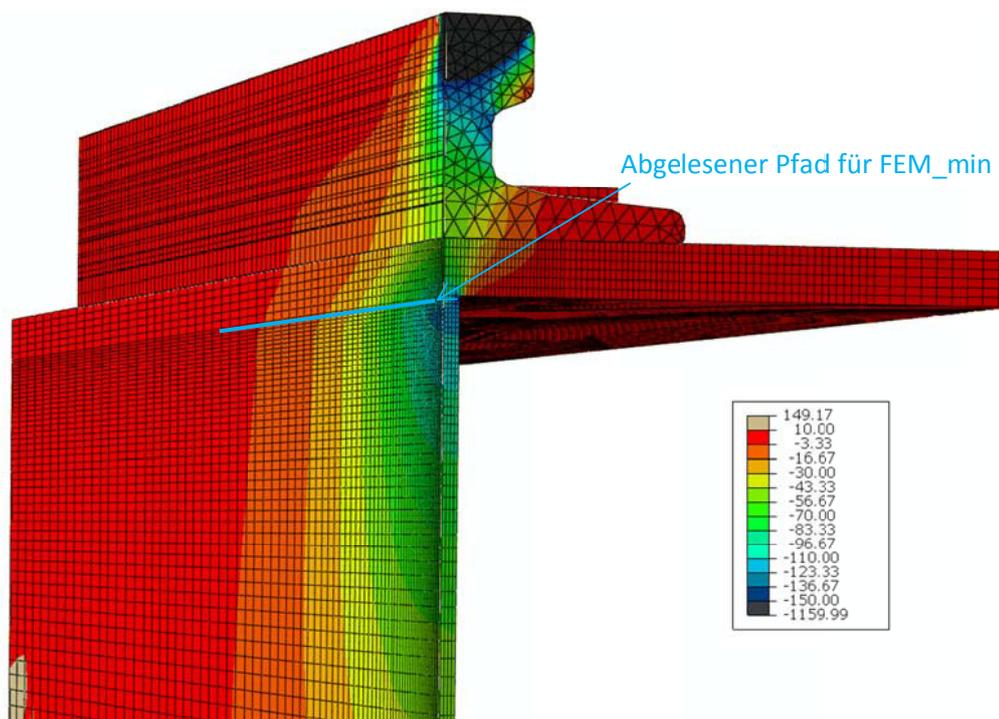


Abbildung 6-39: minimale Spannungen in N/mm<sup>2</sup> Belastung = 135 kN

Die Abbildung 6-40 und Abbildung 6-41 zeigen die Ergebnisse aus der FE-Berechnung für die Systeme 2.45B.0 und 2.45B.3. Die berechneten Spannungen sind dabei auf die Drucknormalspannungen  $\sigma_{0,z,EC}$ , welche laut EN1993-6 [1] berechnet, sind bezogen. Zusätzlich wird beim zentrischen Belastungsfall (System 2.45B.0) die Spannungskurve nach Vögele (siehe Kapitel 3.4) dargestellt.

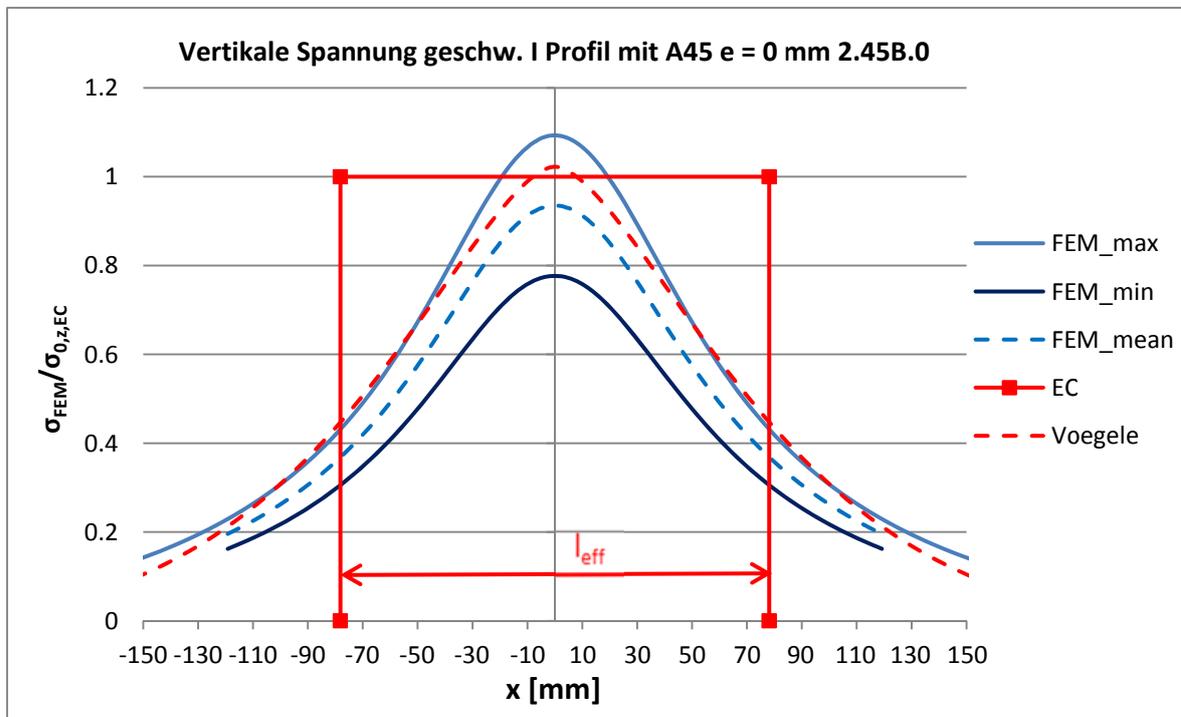


Abbildung 6-40: FE-Ergebnisse für das System 2.45B.0 (geklemmte Schiene)

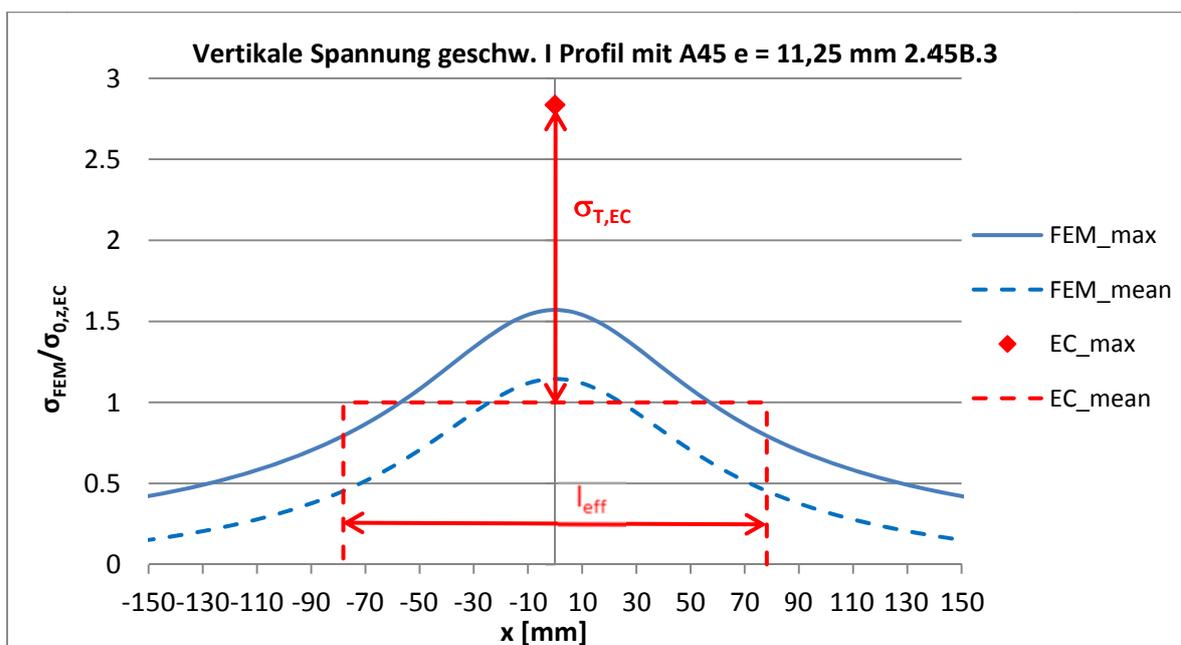


Abbildung 6-41: Ergebnisse für das System 2.45B.3 (geklemmte Schiene)

### 6.2.6 Ergebnisse geschw. I Profil mit A75 Schiene 2.75B.0 bzw. 2.75B.3

Die FE-Berechnung des geschweißten I Profils mit der Schiene vom Type A75 (siehe Abbildung 2-2) erfolgt mit folgendem System (siehe Abbildung 6-42).

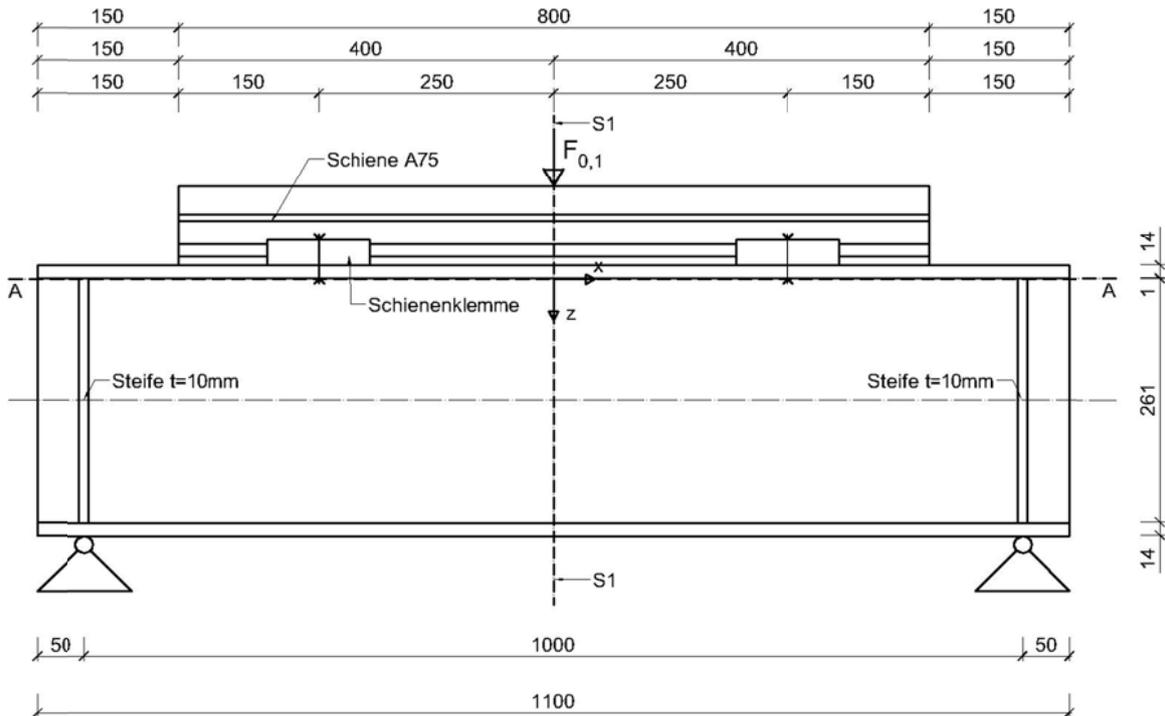


Abbildung 6-42: System geschweißtes I Profil mit A75

Die Abbildung 6-43 zeigt den Schnitt S1 durch das System und die Lastanordnung.

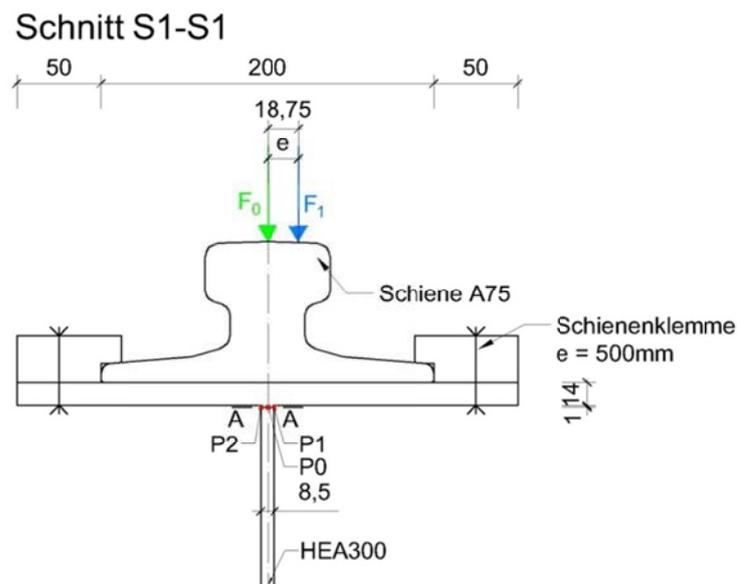


Abbildung 6-43: Detail I Profil geschweiß mit A75

In Abbildung 6-44 und Abbildung 6-45 ist das Ergebnis des zentrischen Belastungsfall mit einer Belastung von 135kN dargestellt.

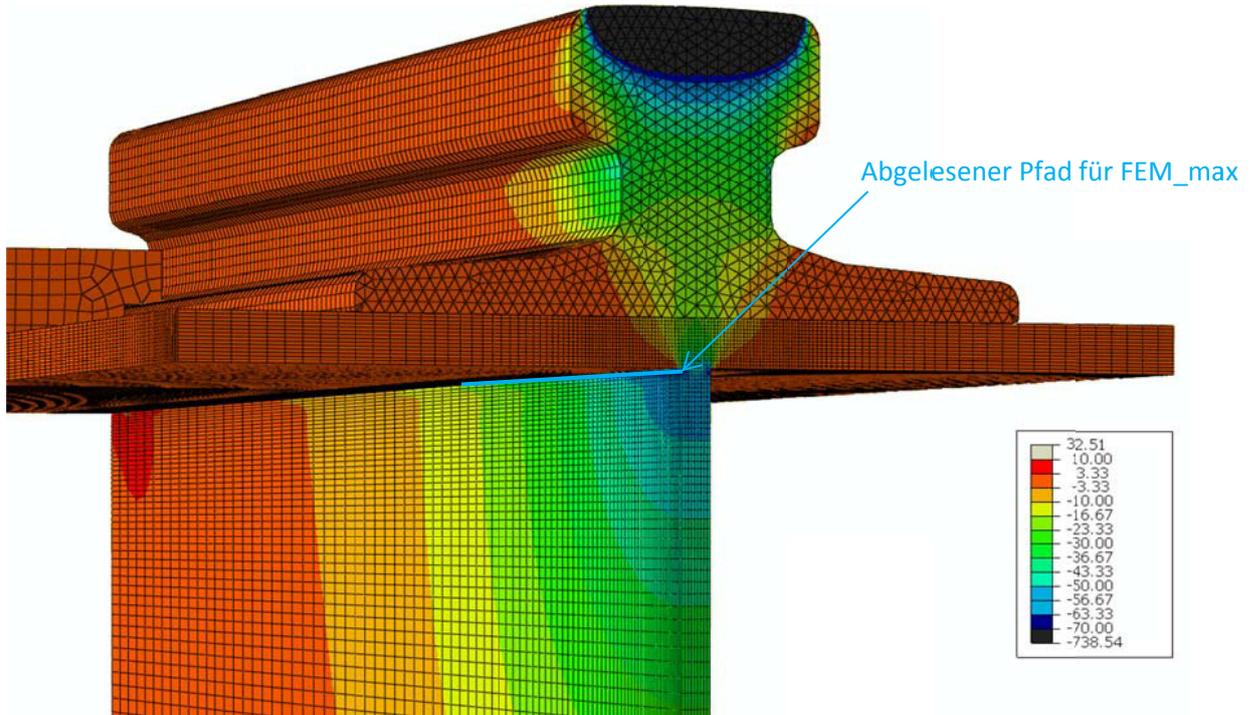


Abbildung 6-44: maximale Spannungen in N/mm<sup>2</sup> Belastung = 135 kN

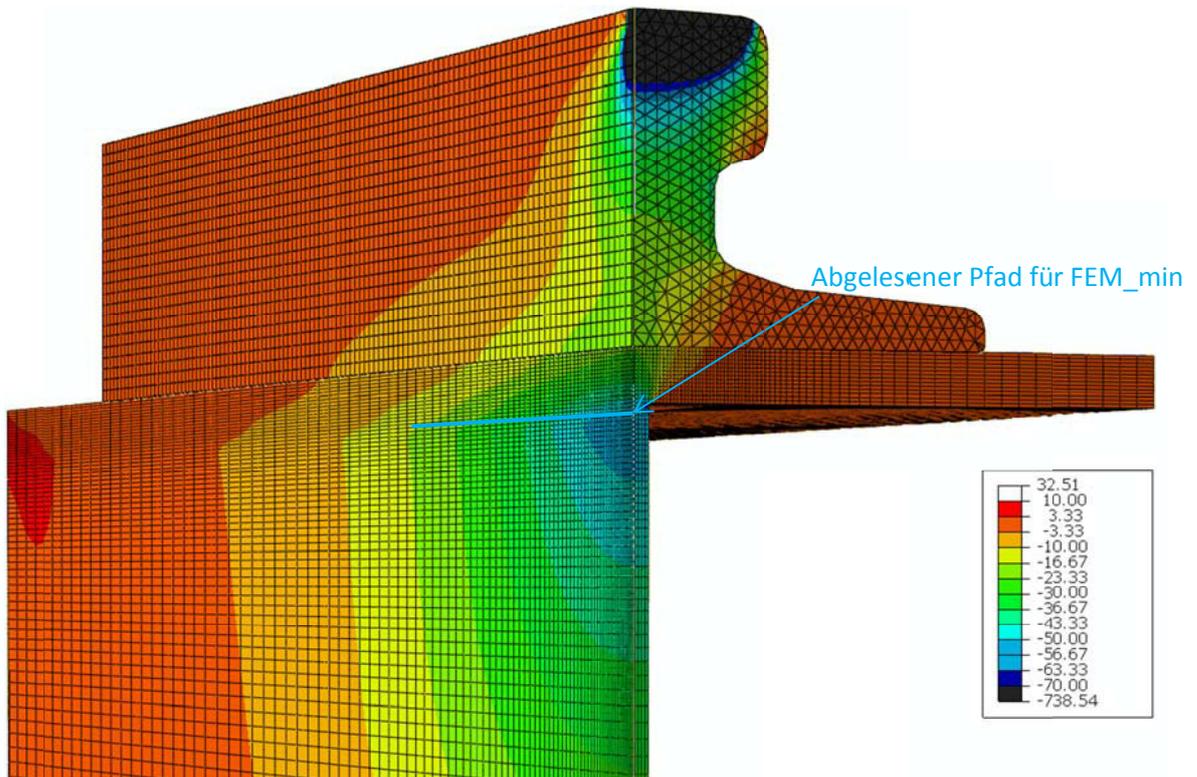


Abbildung 6-45: minimale Spannungen in N/mm<sup>2</sup> Belastung = 135 kN

Die Abbildung 6-46 und Abbildung 6-47 zeigen die Ergebnisse aus der FE-Berechnung für die Systeme 2.75B.0 und 2.75B.3. Die berechneten Spannungen sind, dabei auf die Drucknormalspannungen  $\sigma_{0,z,EC}$ , welche laut EN1993-6 [1] berechnet sind bezogen. Zusätzlich wird beim zentrischen Belastungsfall (System 2.75B.0) die Spannungskurve nach Vögele (siehe Kapitel 3.4) dargestellt.

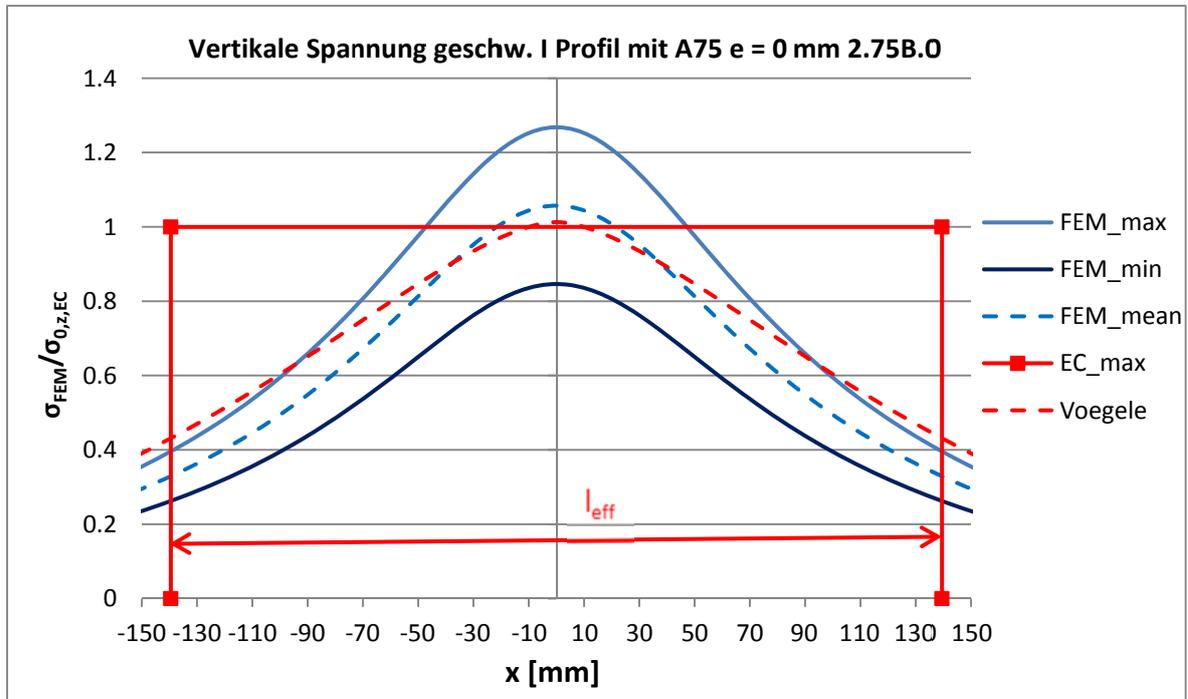


Abbildung 6-46: Ergebnisse für das System 2.75B.0 (geklemmte Schiene)

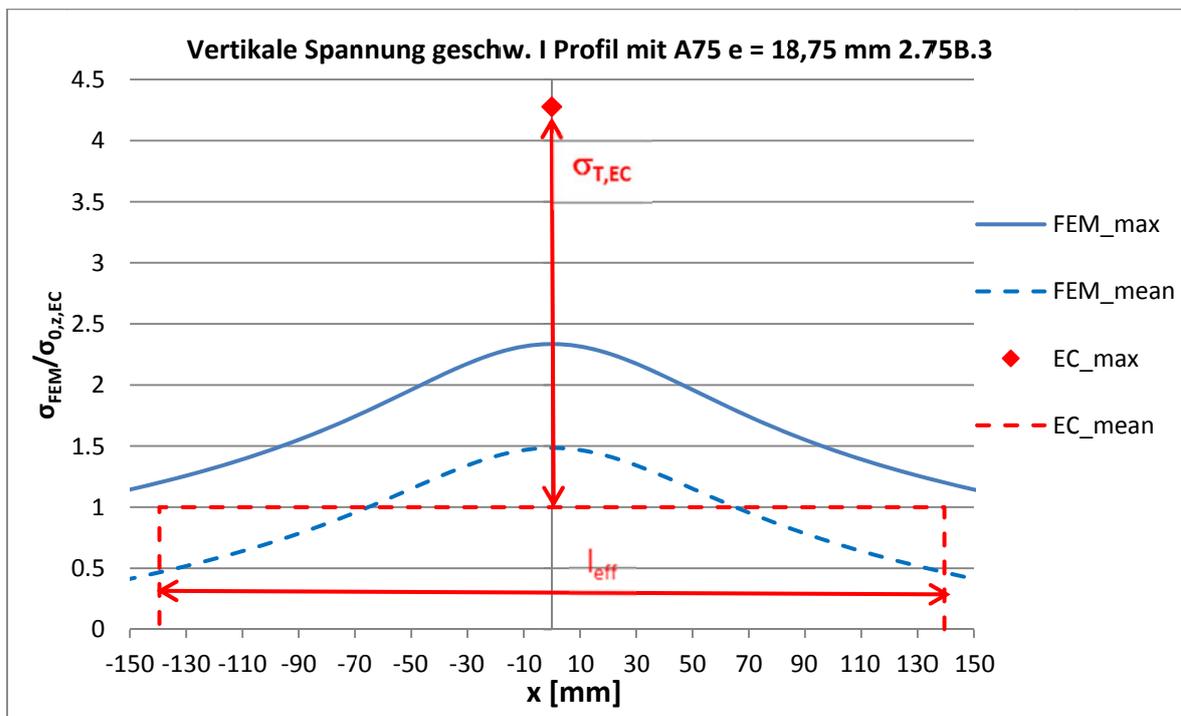


Abbildung 6-47: Ergebnisse für das System 2.75B.3 (geklemmte Schiene)

Beim geschweißten Profil und den Schienen des Type –A (A45 und A75), zeigt sich, dass die mittlere Spannung bei den zentrischen Fällen 2.45A.0 und 2.75A.0 recht gut mit der Normberechnung übereinstimmen. (siehe Abbildung 6-40 bzw. Abbildung 6-46)

Beim exzentrischen Belastungsfall, zeigt sich das auch hier, wie beim HEA 300 die berechneten Spannungen nach EN1993-6 [1] einen zu hohen Wert ergeben.

### 6.3 FE-Analyse Kastenquerschnitt 1 (Querschnitt 3)

Der Kastenquerschnitt 1 wird für den Laborversuch (siehe Kapitel 5) verwendet, dementsprechend sind die Abmessungen an die Möglichkeiten im Labor angepasst. Der seitliche Überstand des Oberflansches ist zu gering um eine Schiene des vom Type A (A45 bzw. A75) einsetzen zu können (siehe Abbildung 6-49), aus diesem Grund wird auch die Berechnung nur mit der Blockschiene ( $b=60\text{mm}$   $h=30\text{mm}$ ) durchgeführt.

Bei den Kastenquerschnitten wird auf eine Darstellung der Spannungskurven nach Vögele [5] verzichtet, da die Formel für I Querschnitte entwickelt wurden.

#### 6.3.1 System mit Blockschiene

Folgendes Model wird zur Berechnung des Kastenquerschnittes mit der Blockschiene verwendet.

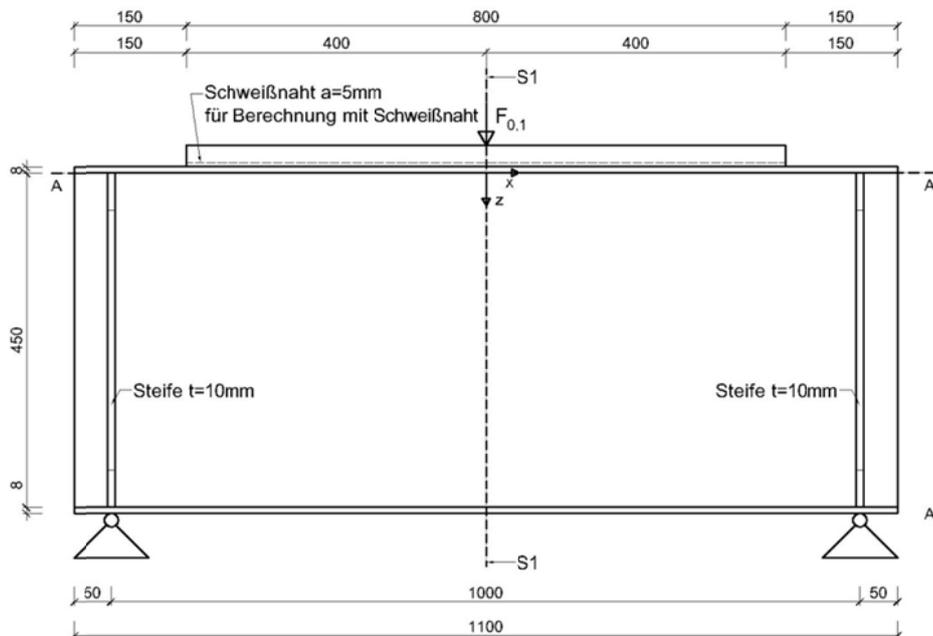


Abbildung 6-48: System Kastenquerschnitt 1

Abbildung 6-49 zeigt den Schnitt S1 durch den Kastenquerschnitt.

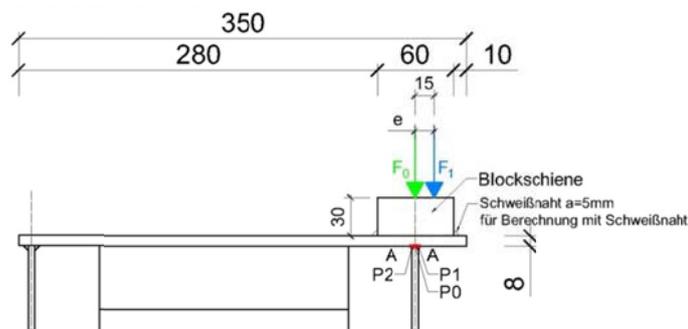


Abbildung 6-49: Detail Kastenquerschnitt 1

In Abbildung 6-50 und Abbildung 6-51 ist das Ergebnis des zentrischen Belastungsfall mit einer Belastung von 150kN dargestellt.

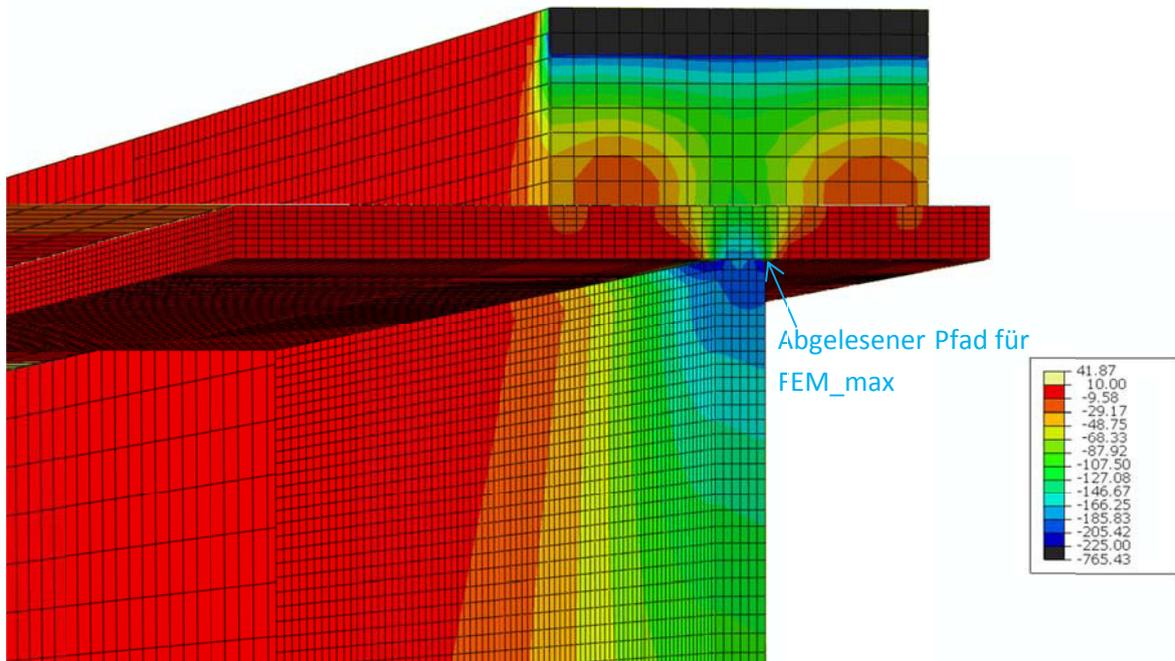


Abbildung 6-50: maximale Spannungen in N/mm<sup>2</sup> Belastung = 150kN

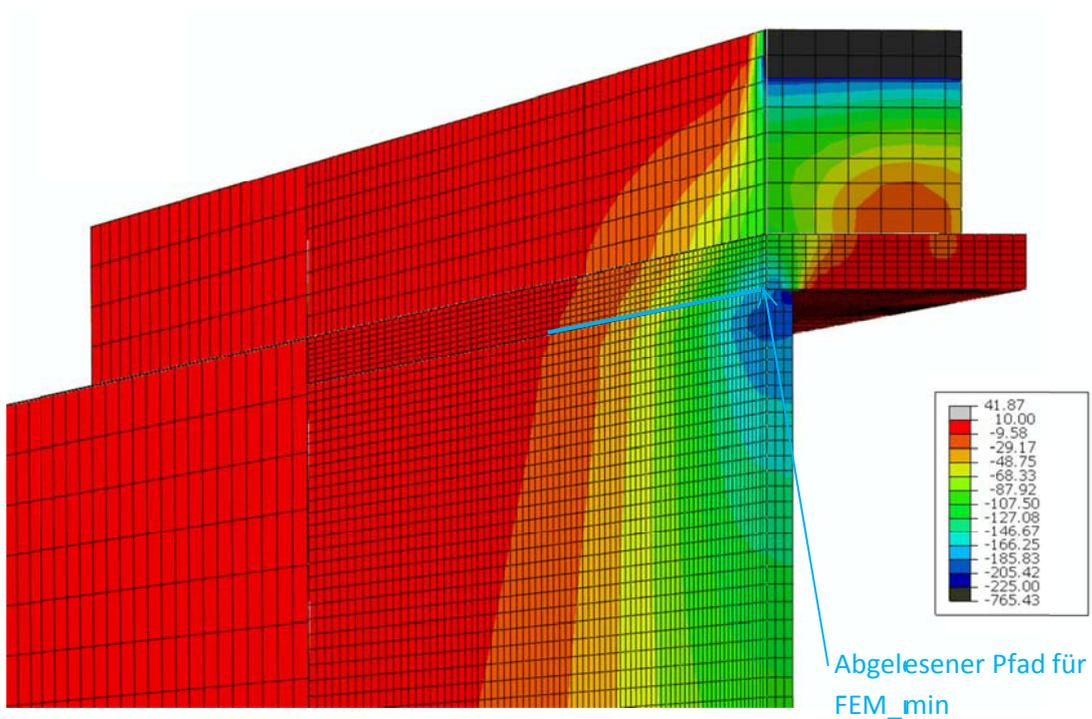


Abbildung 6-51: minimale Spannungen in N/mm<sup>2</sup> Belastung = 150kN

### 6.3.2 Spannungsverteilung über die Stegdicke

Wie in Abbildung 6-50 ersichtlich, ist die Spannung über die Stegdicke nicht konstant, sondern ist an den Rändern größer als in der Mitte. In den gezeigten Ergebnissen werden jeweils die maximale Spannung sowie der Mittelwert aus minimaler und maximaler Spannung gezeigt. In den folgenden Abbildungen, wird die Querverteilung in y Richtung am Ende des Ausrundungsradius anhand eines Diagramms exemplarisch dargestellt.

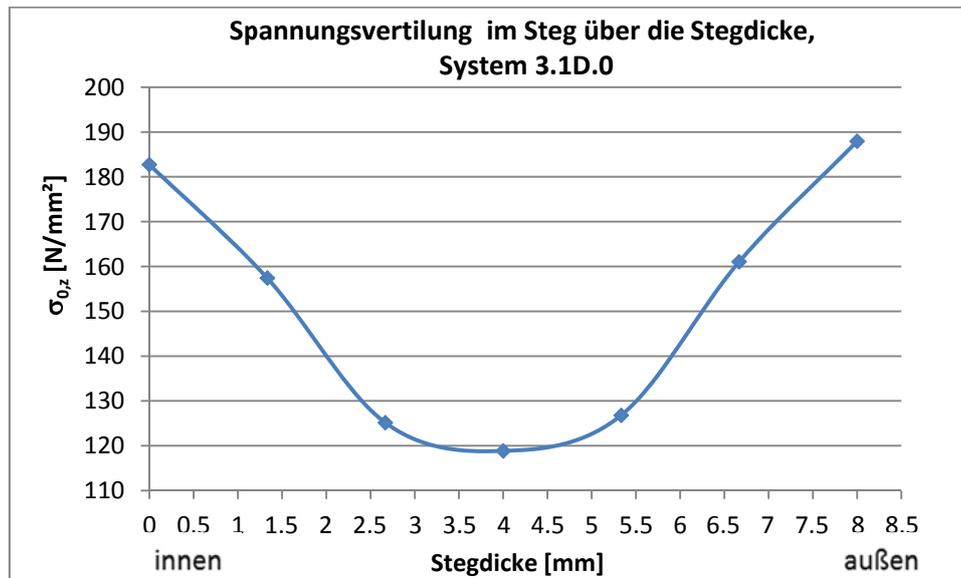


Abbildung 6-52: Spannungsverteilung im Steg in y Richtung

Im Gegensatz zum gewalzten I-Profil (HEA 300, siehe Abbildung 6-7), stellt sich beim Kastenquerschnitt bei der exzentrischen Belastung keine so klare linear Verteilung  $\sigma_z$  (siehe Abbildung 6-53)

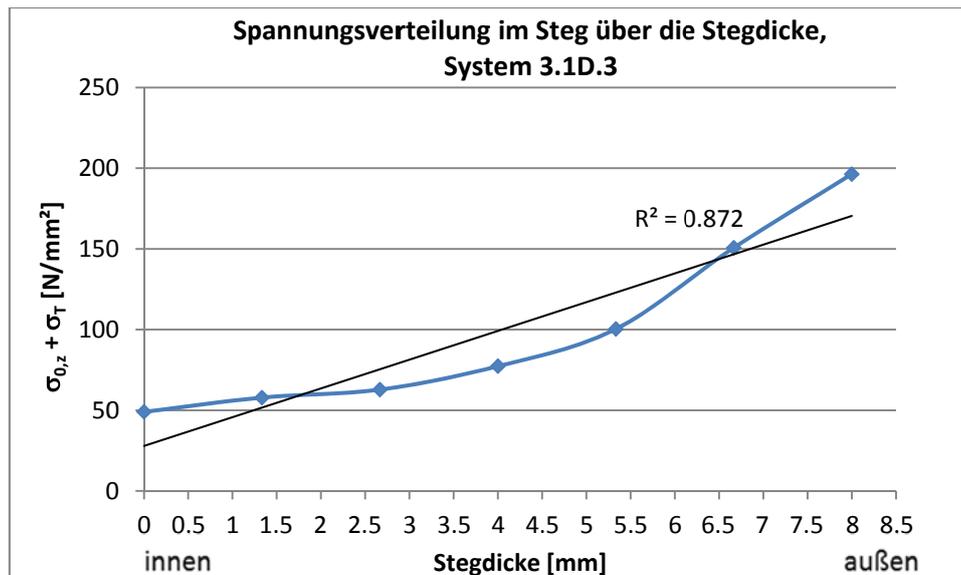


Abbildung 6-53: Spannungsverteilung im Steg in y Richtung bei exzentrischer Belastung

### 6.3.3 Ergebnisse Kastenquerschnitt 1 Blockschiene mit starrem Verbund 3.1D.0 bzw. 3.1D.3

Die Abbildung 6-54 und Abbildung 6-55 zeigen die Ergebnisse aus der FE-Berechnung für die Systeme 3.1D.0 und 3.1D.3. Die berechneten Spannungen sind dabei auf die Drucknormalspannungen  $\sigma_{0,z,EC}$ , welche laut EN1993-6 [1] berechnet sind, bezogen.

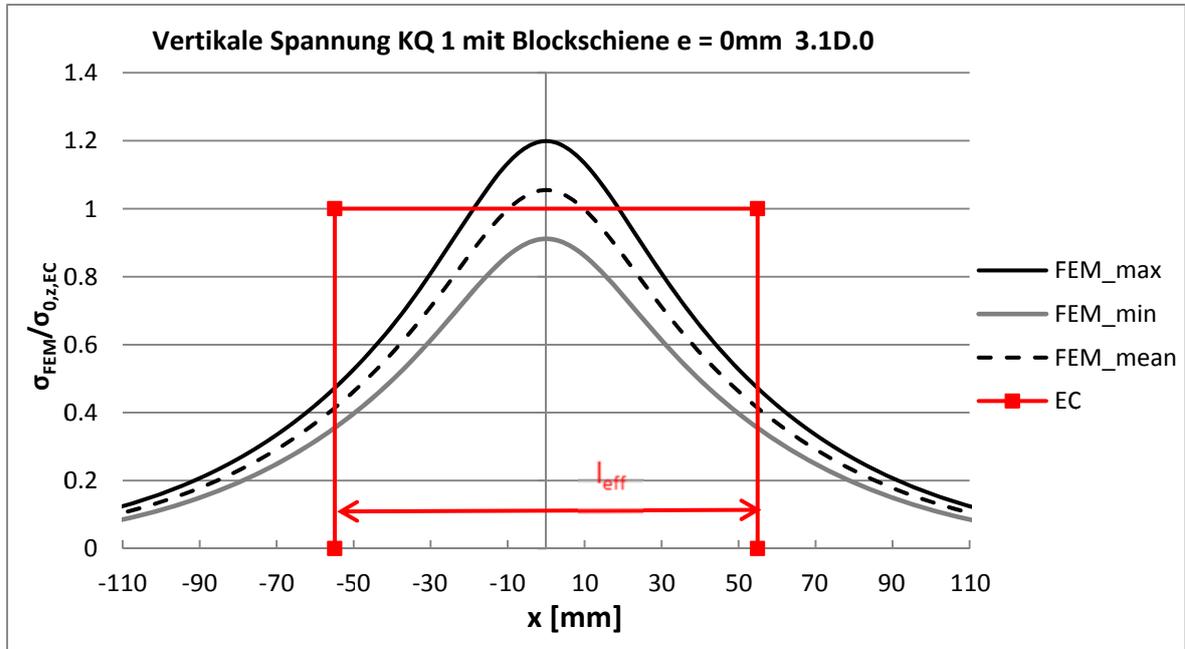


Abbildung 6-54: Ergebnisse für das System 3.1D.0 (starre Schiene)

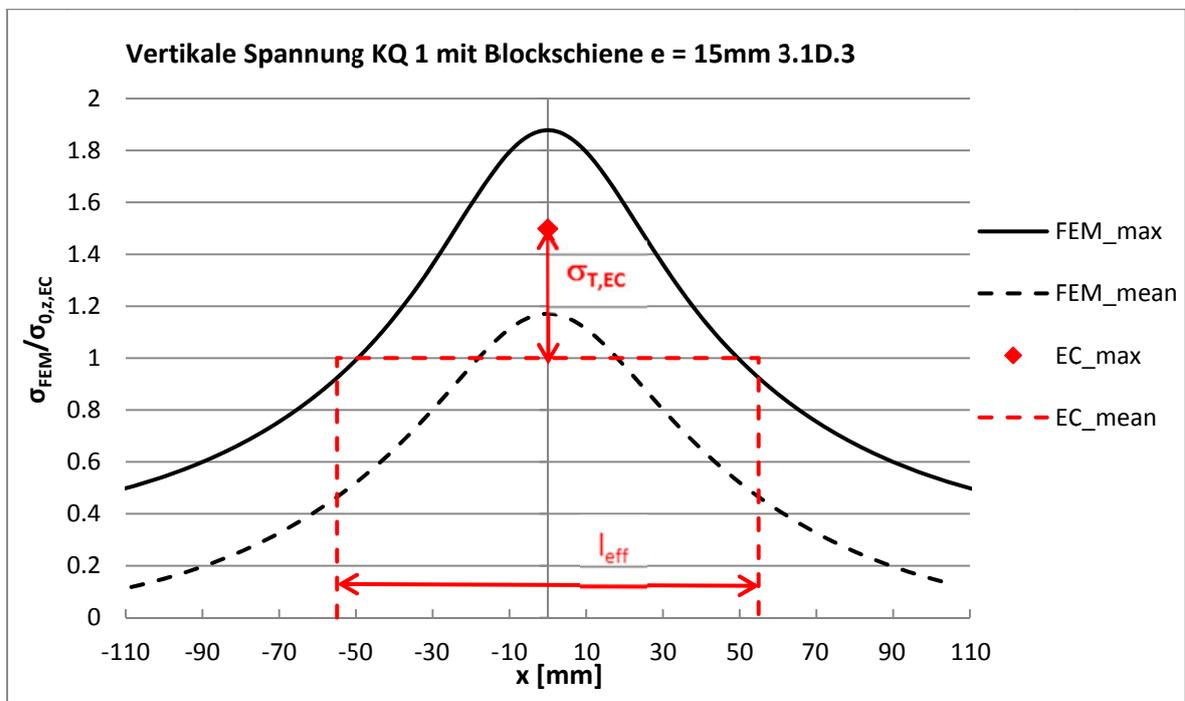


Abbildung 6-55: Ergebnisse für das System 3.1D.3 (starre Schiene)

### 6.3.4 Ergebnisse Kastenquerschnitt 1 mit aufgeschweißter Blockschiene 3.1C.0 bzw. 3.1C.3

Die Abbildung 6-56 und Abbildung 6-57 zeigen die Ergebnisse aus der FE-Berechnung für die Systeme 3.1C.0 und 3.1C.3. Die berechneten Spannungen sind dabei auf die Drucknormalspannungen  $\sigma_{0,z,EC}$ , welche laut EN1993-6 [1] berechnet sind bezogen.

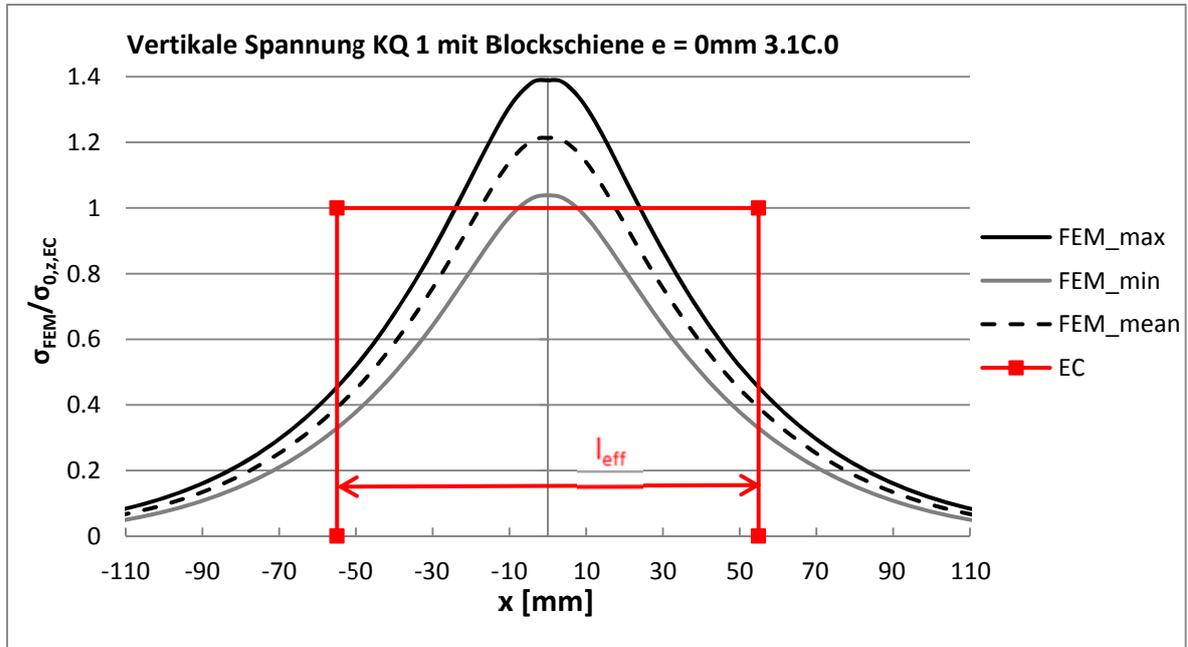


Abbildung 6-56: FE-Ergebnisse für das System 3.1C.0 (geschweißte Schiene)

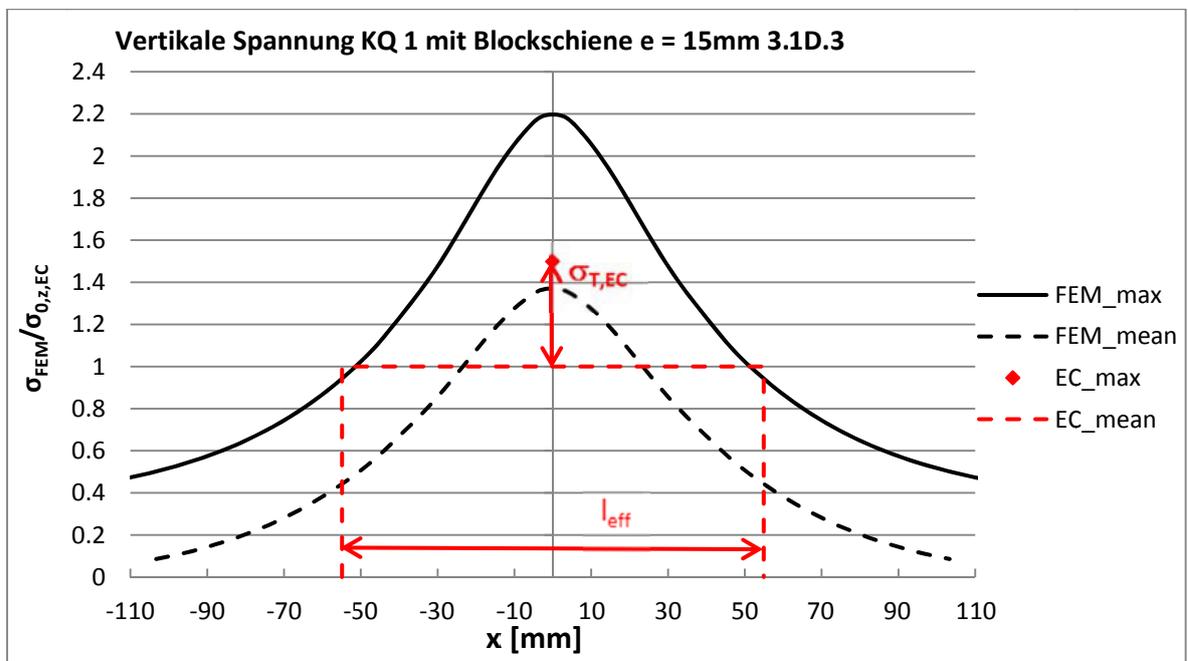


Abbildung 6-57: FE-Ergebnisse für das System 3.1C.3 (geschweißte Schiene)

Das Ergebnis der FE-Berechnung mit der Blockschiene mit starrem Verbund und zentrischer Belastung (3.1D.0) zeigt, dass die mittleren Spannungen im Steg (FEM\_mean) sehr gut mit den Normwerten übereinstimmen (siehe Abbildung 6-54). Beim System mit der aufgeschweißten Schiene liegt die mittlere Maximalspannung 20% über der Normberechnung (siehe Abbildung 6-57).

Die Ergebnisse der exzentrischen Belastung, ergeben in beiden Fällen (starr und aufgeschweißt) einen um vieles höheren Maximalwert als die Norm. Wobei zu erwähnen ist, dass die Torsionssteifigkeit des Oberflansches mit der Breite  $b_{\text{eff}}$  berechnet wurde. In der EN1993-6 [1] ist der Umgang mit Kastenquerschnitten in diesem Zusammenhang nicht geregelt.

### 6.3.5 Ergebnisse Kastenquerschnitt 1 mit loser Blockschiene 3.1A.0 bzw. 3.1A.3

Die Abbildung 6-58 und Abbildung 6-59 zeigen die Ergebnisse aus der FE-Berechnung für die Systeme 3.1A.0 und 3.1A.3. Die berechneten Spannungen sind dabei auf die Drucknormalspannungen  $\sigma_{0,z,EC}$ , welche laut EN1993-6 [1] berechnet sind bezogen.

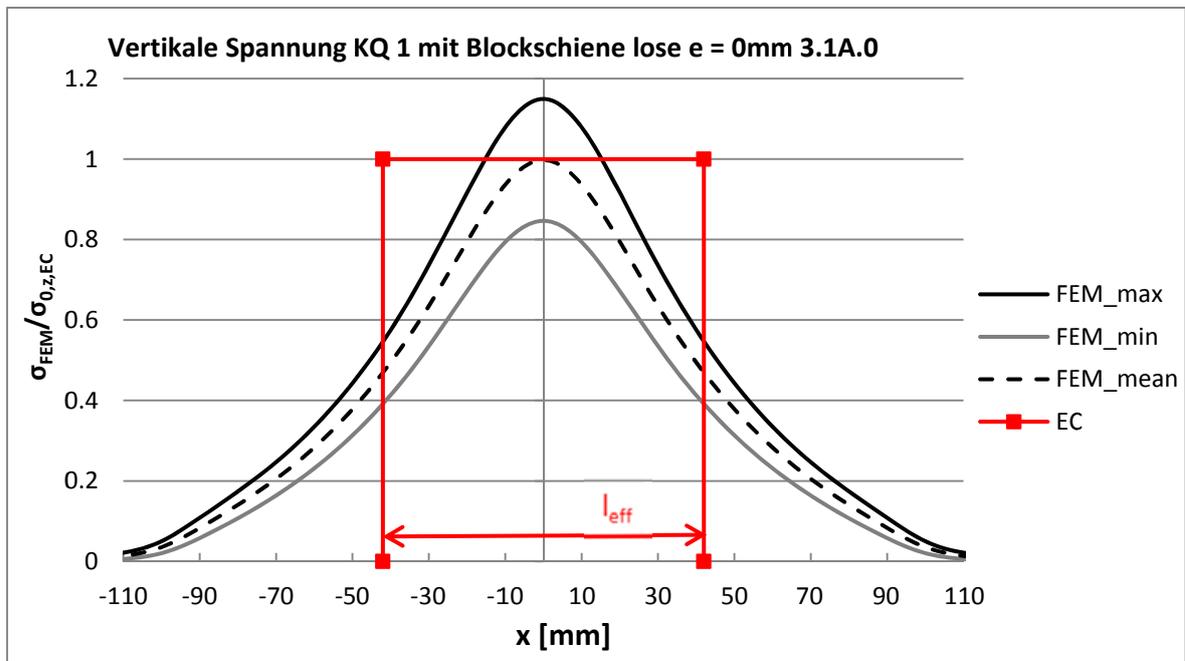


Abbildung 6-58: FE: Ergebnisse für das System 3.1A.0 (lose Schiene)

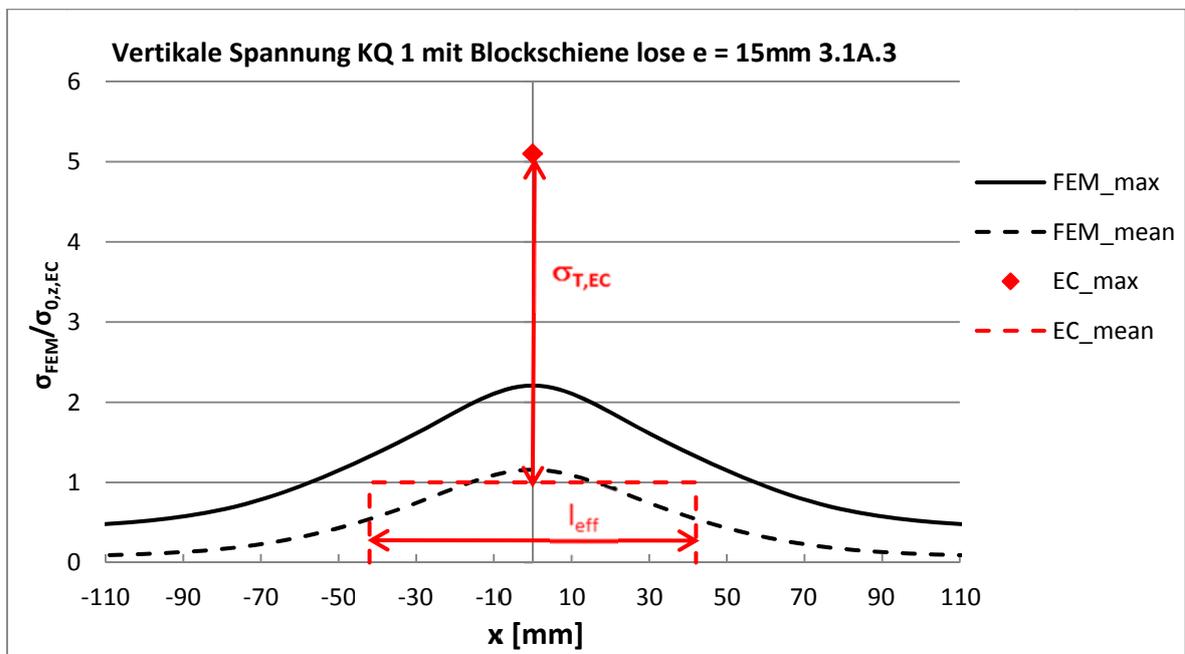


Abbildung 6-59: Ergebnisse für das System 3.1A.3 (lose Schiene)

Das Ergebnis der FE-Berechnung mit der Blockschiene mit loser Schiene und zentrischer Belastung (3.1A.0) zeigt, dass die mittleren Spannungen im Steg (FEM\_mean) sehr gut mit den Normwerten übereinstimmen (siehe Abbildung 6-58).

Bei der exzentrischen Belastung sind die Maximalspannungen, welche nach EN1993-6 [1] bestimmt wurden, um beinahe um das 3-fache höher als die der FE-Berechnung.

## 6.4 FE-Analyse Kastenquerschnitt 2 (Querschnitt 4)

Die genauen Abmessungen des Querschnittes sind dem Kapitel 2.3.4 zu entnehmen.

### 6.4.1 System mit Blockschiene

Die Abmessungen der Blockschiene sowie die Belastungsfälle sind in folgendem Bild dargestellt.

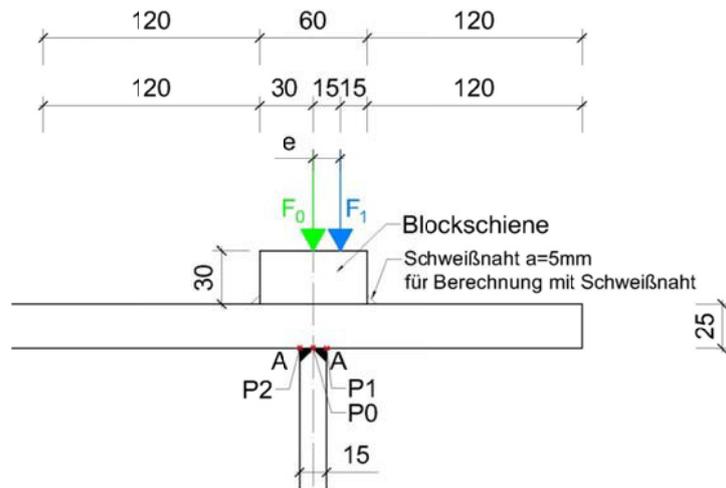


Abbildung 6-60: System Kastenquerschnitt 2

Das System in Längsrichtung ist ident mit dem Kastenquerschnitt 1. Abbildung 6-61 zeigt den Kastenquerschnitt nach der FE-Berechnung.



Abbildung 6-61: Gesamtübersicht FE-Modell Kastenquerschnitt 2

In Abbildung 6-62 und Abbildung 6-63 ist das Ergebnis des zentrischen Belastungsfall mit einer Belastung von 120kN dargestellt.

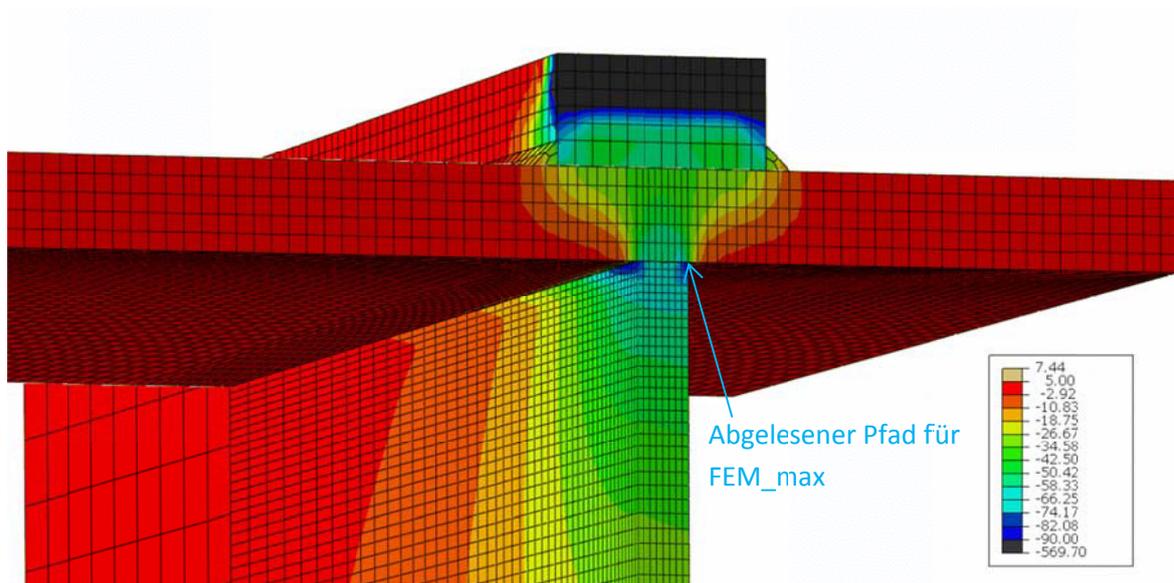


Abbildung 6-62: Maximalspannungen in N/mm<sup>2</sup> Belastung = 120 kN

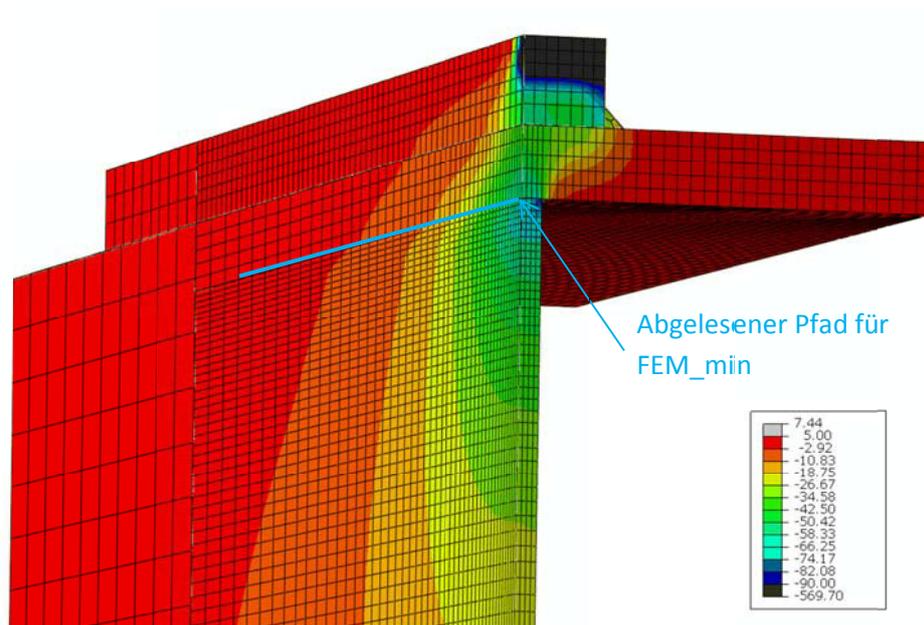


Abbildung 6-63: Minimalspannungen in N/mm<sup>2</sup> Belastung =120 kN

Die Abbildung 6-64 und Abbildung 6-65 zeigen die Ergebnisse aus der FE-Berechnung für die Systeme 4.1C.0 und 4.1C.3. Die berechneten Spannungen sind dabei auf die Drucknormalspannungen  $\sigma_{0,z,EC}$ , welche laut EN1993-6 [1] berechnet sind, bezogen.

### 6.4.2 Ergebnisse Kastenquerschnitt 2 mit aufgeschweißter Blockschiene 4.1C10

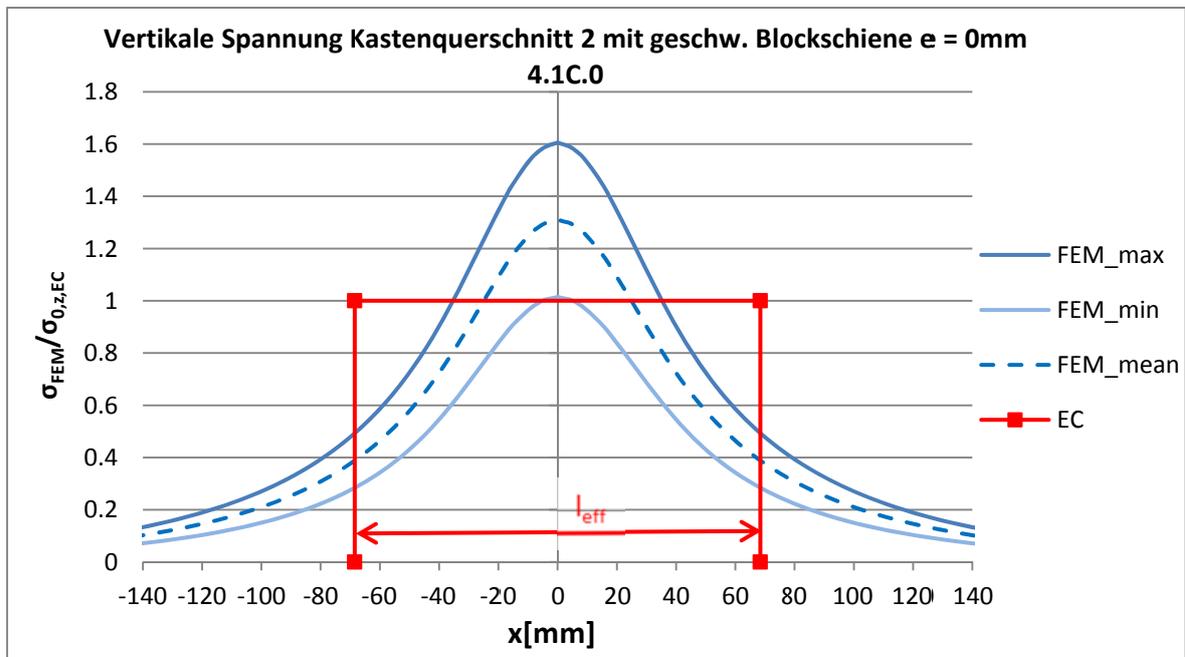


Abbildung 6-64: FE-Ergebnisse für das System 4.1C.0 (geschweißte Schiene)

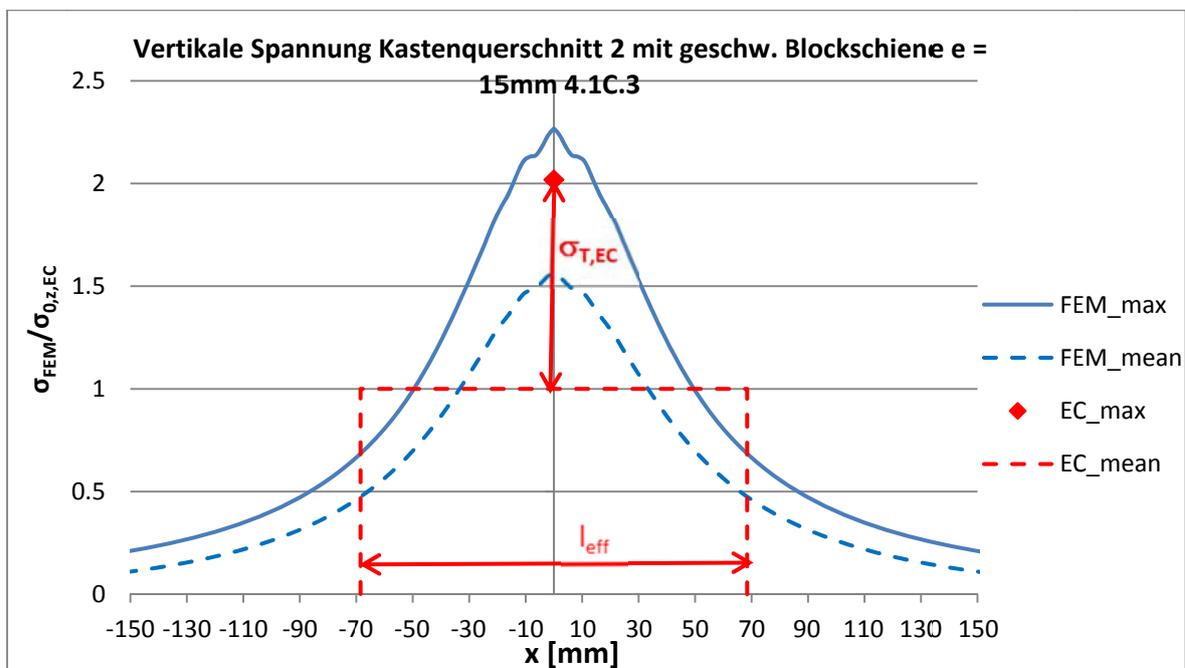


Abbildung 6-65: FE Ergebnisse für das System 4.1C.3 (geschweißte Schiene)

Die Abbildung 6-66 und Abbildung 6-67 zeigen die Ergebnisse aus der FE-Berechnung für die Systeme 4.1C.0 und 4.1C.3. Die berechneten Spannungen sind dabei auf die Drucknormalspannungen  $\sigma_{0,z,EC}$ , welche laut EN1993-6 [1] berechnet sind, bezogen.

### 6.4.3 Ergebnisse Kastenquerschnitt 2 mit loser Blockschiene 4.1A.0 bzw. 4.1A.3

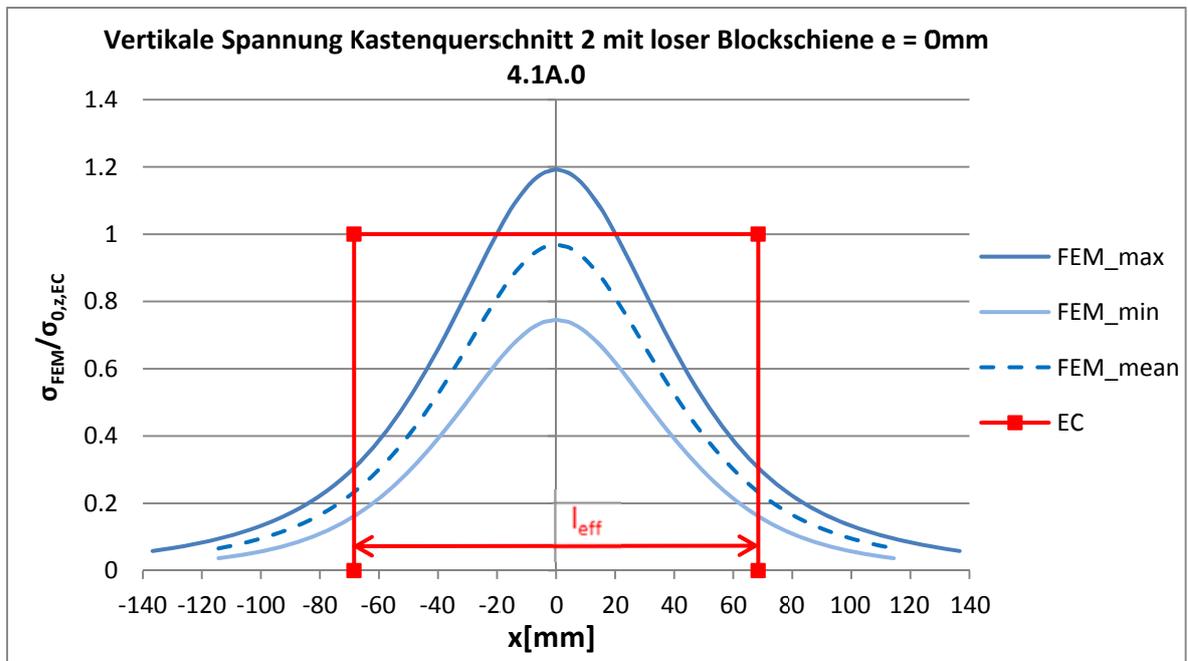


Abbildung 6-66: FE Ergebnisse für das System 4.1A.0 (lose Schiene)

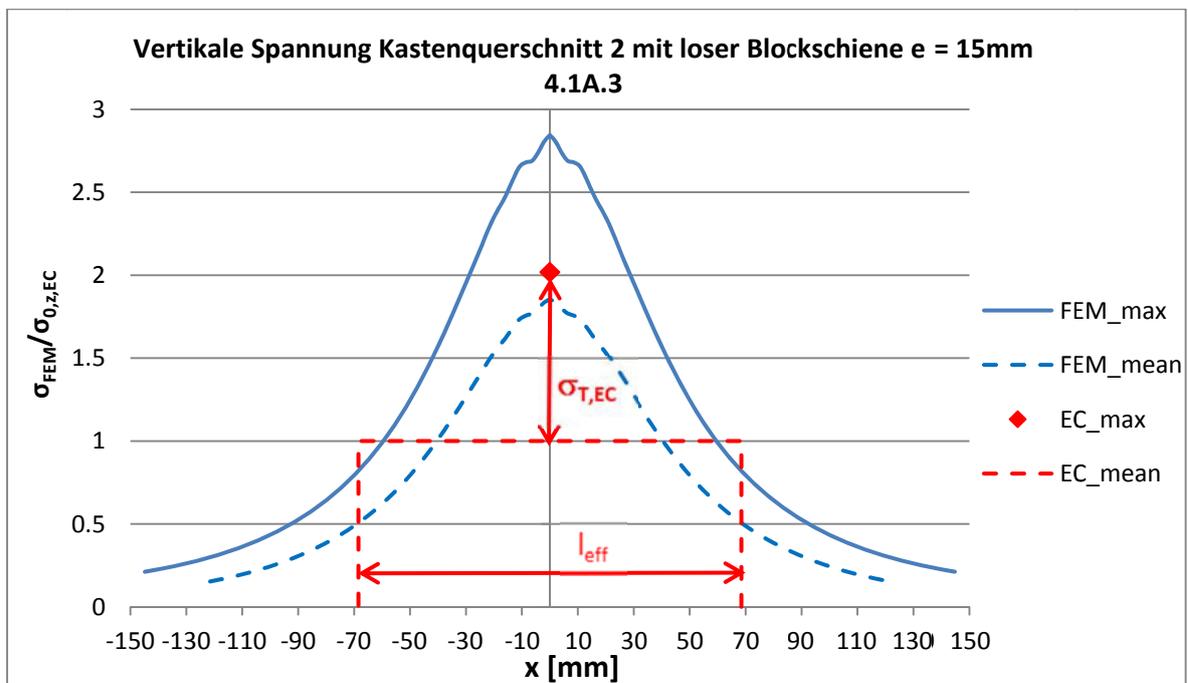


Abbildung 6-67: FE Ergebnisse für das System 4.1A.3 (lose Schiene)

#### 6.4.4 Ergebnisse Kastenquerschnitt 2 mit A45 4.45B.0 bzw. 4.45B.3

In Abbildung 6-68 und Abbildung 6-69 ist das Ergebnis des zentrischen Belastungsfall mit einer Belastung von 120kN dargestellt.

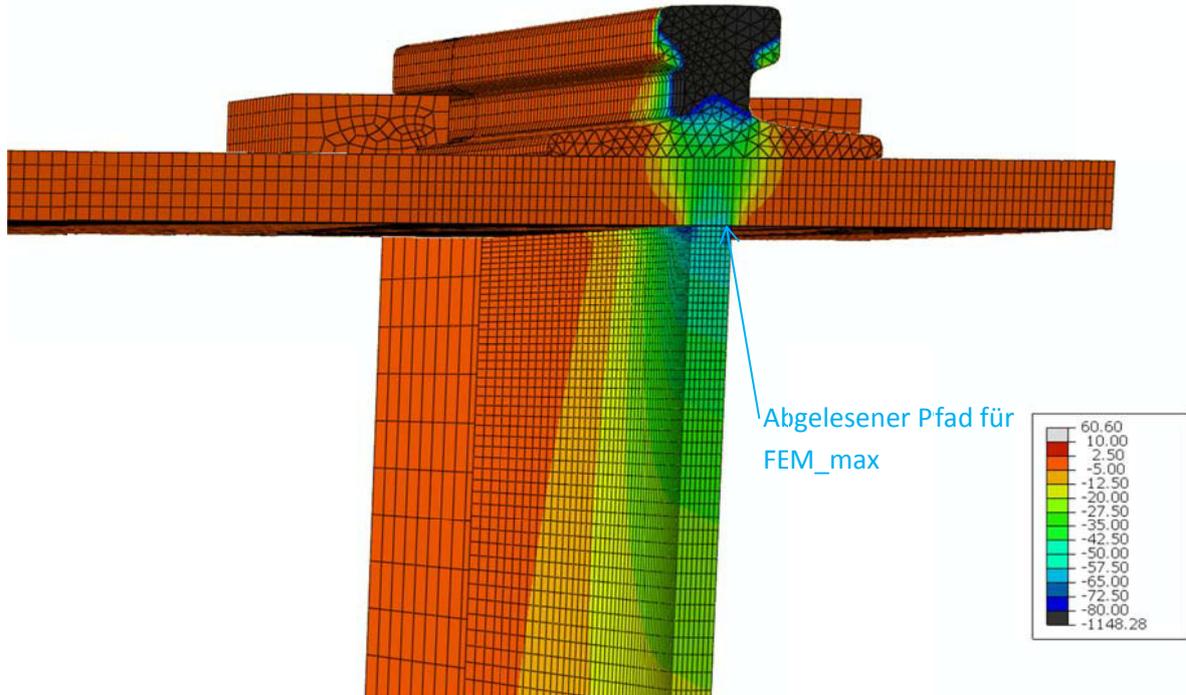


Abbildung 6-68: maximale Spannungen in N/mm<sup>2</sup> Belastung ist 120 kN

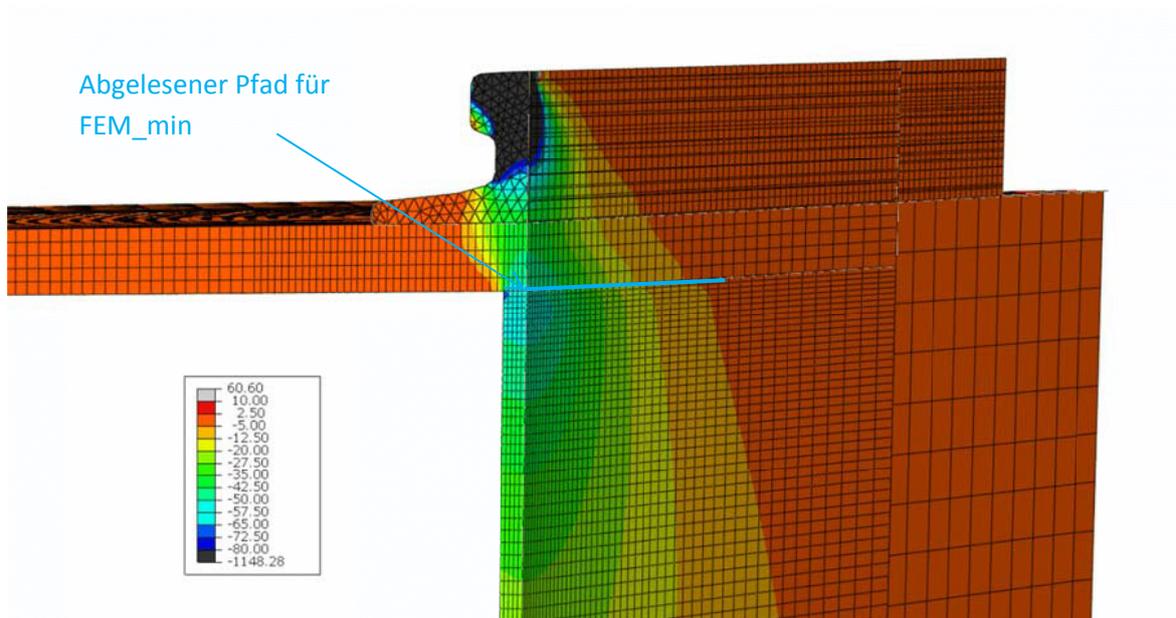


Abbildung 6-69: minimale Spannungen in N/mm<sup>2</sup> Belastung ist 120 kN

Die Abbildung 6-70 und Abbildung 6-71 zeigen die Ergebnisse aus der FE-Berechnung für die Systeme 4.45B.0 und 4.45B.3. Die berechneten Spannungen sind dabei auf die Drucknormalspannungen  $\sigma_{0,z,EC}$ , welche laut EN1993-6 [1] berechnet sind, bezogen.

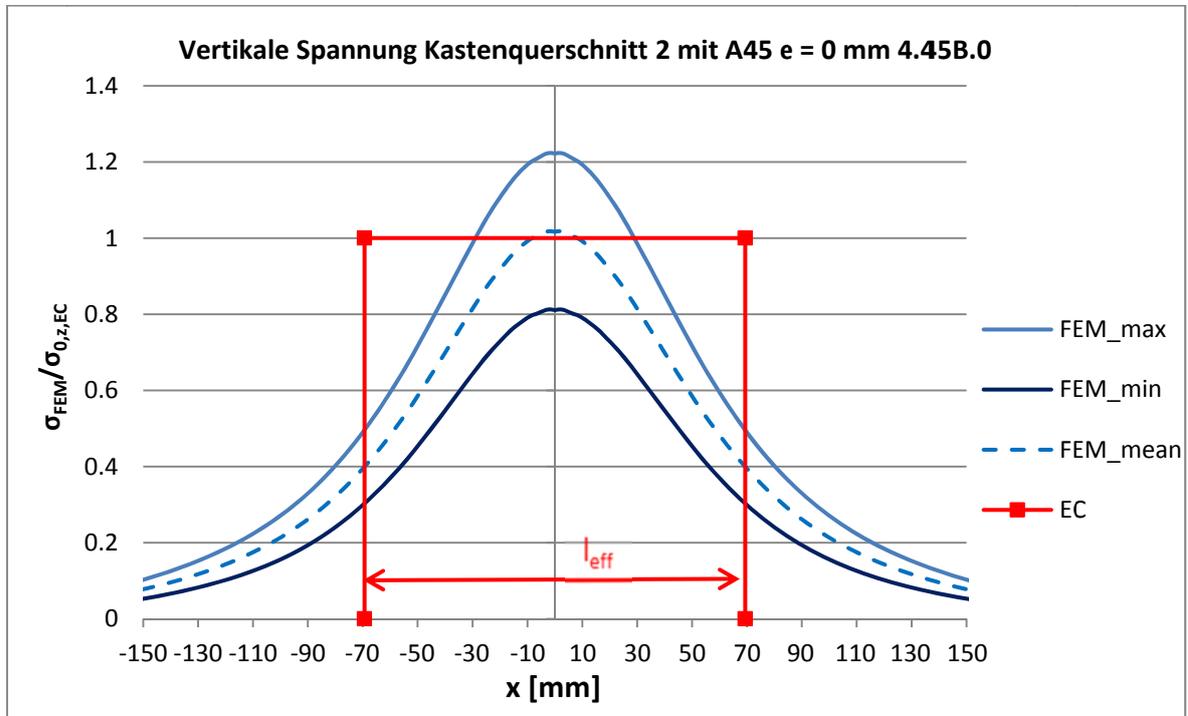


Abbildung 6-70: FE Ergebnisse für das System 4.45B.0 (geklemmte Schiene)

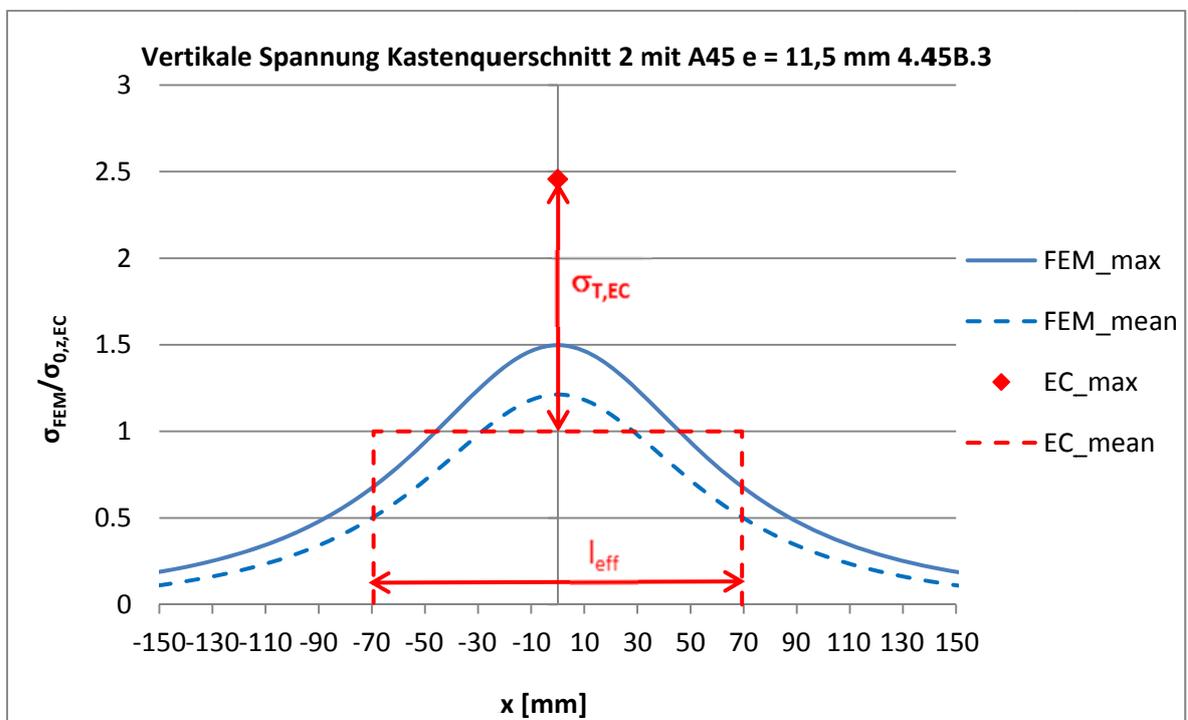


Abbildung 6-71: FE Ergebnisse für das System 4.45B.3 (geklemmte Schiene)

### 6.4.5 Ergebnisse Kastenquerschnitt 2 mit A75 4.75B.0 bzw. 4.75B.3

In Abbildung 6-72 und Abbildung 6-73 ist das Ergebnis des zentrischen Belastungsfall mit einer Belastung von 120kN dargestellt.

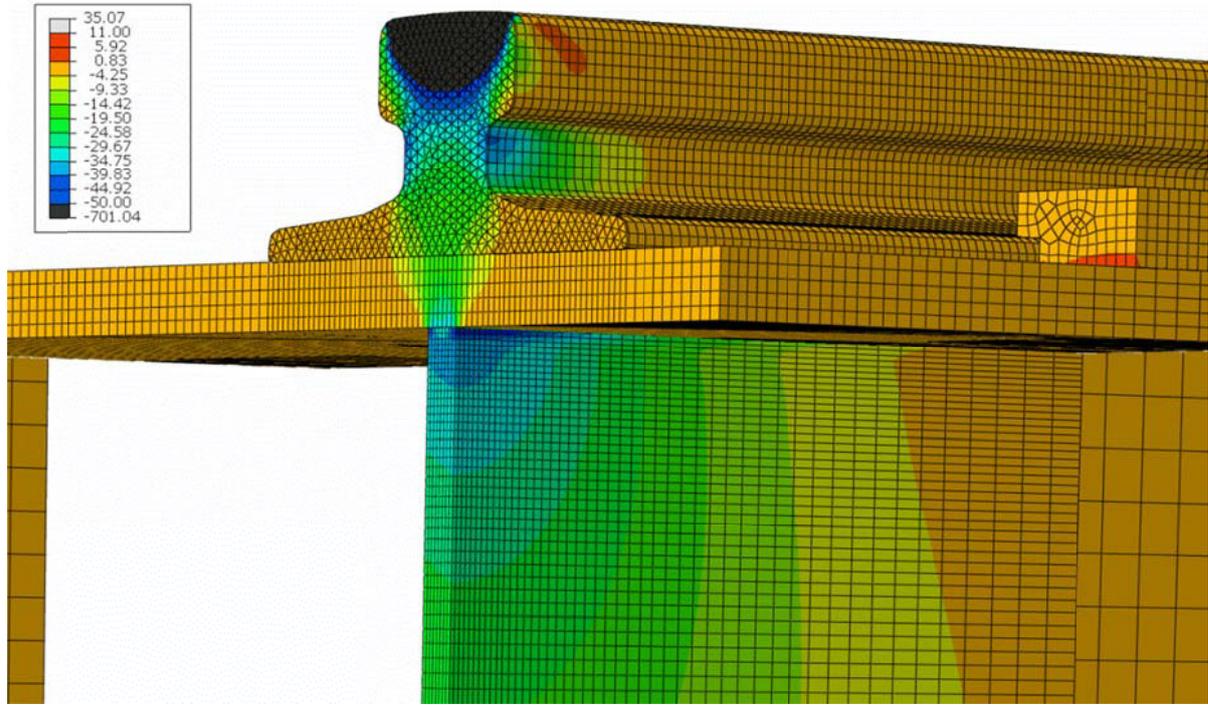


Abbildung 6-72: maximale Spannungen in  $\text{N}/\text{mm}^2$  Belastung = 120kN

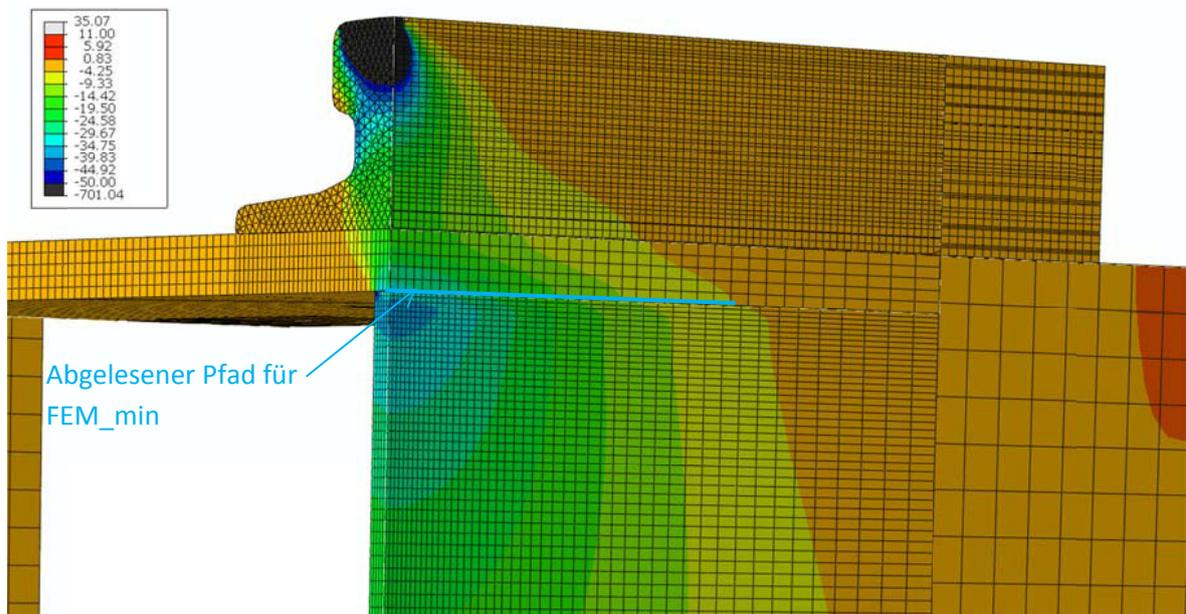


Abbildung 6-73: minimale Spannungen in  $\text{N}/\text{mm}^2$  Belastung = 120kN

Die Abbildung 6-74 und Abbildung 6-75 zeigen die Ergebnisse aus der FE-Berechnung für die Systeme 4.75B.0 und 4.75B.3. Die berechneten Spannungen sind dabei auf die Drucknormalspannungen  $\sigma_{0,z,EC}$ , welche laut EN1993-6 [1] berechnet sind, bezogen.

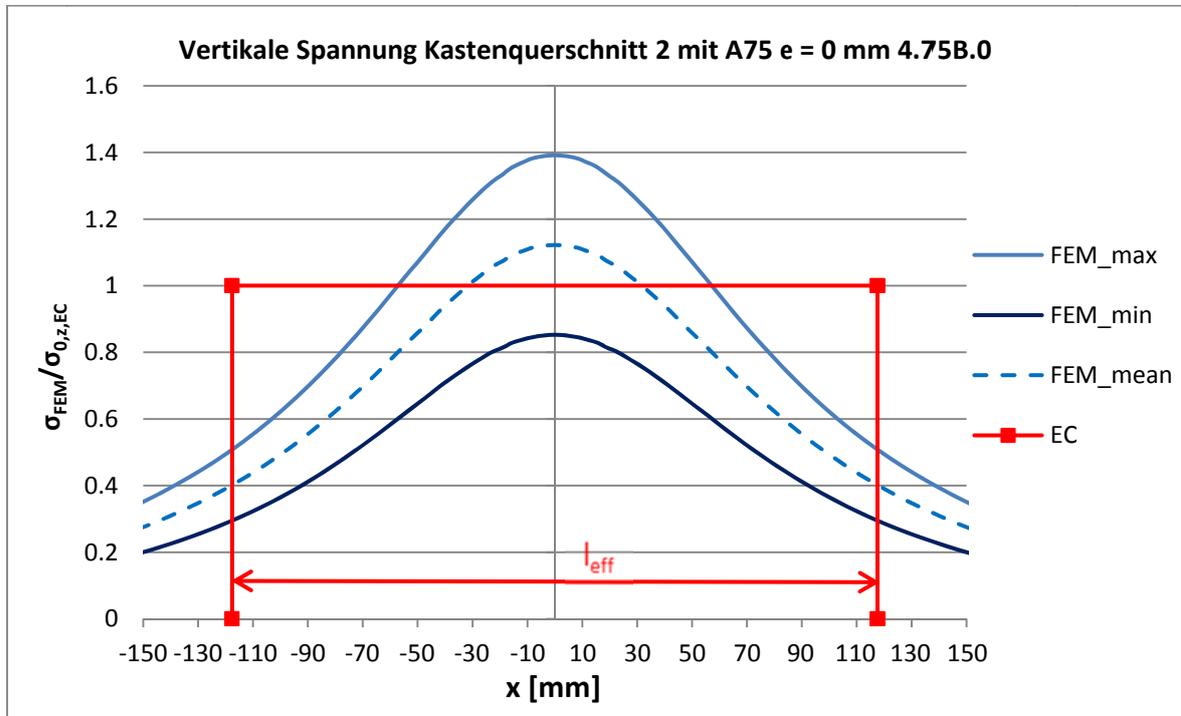


Abbildung 6-74: FE Ergebnisse für das System 4.75B.0 (geklemmte Schiene)

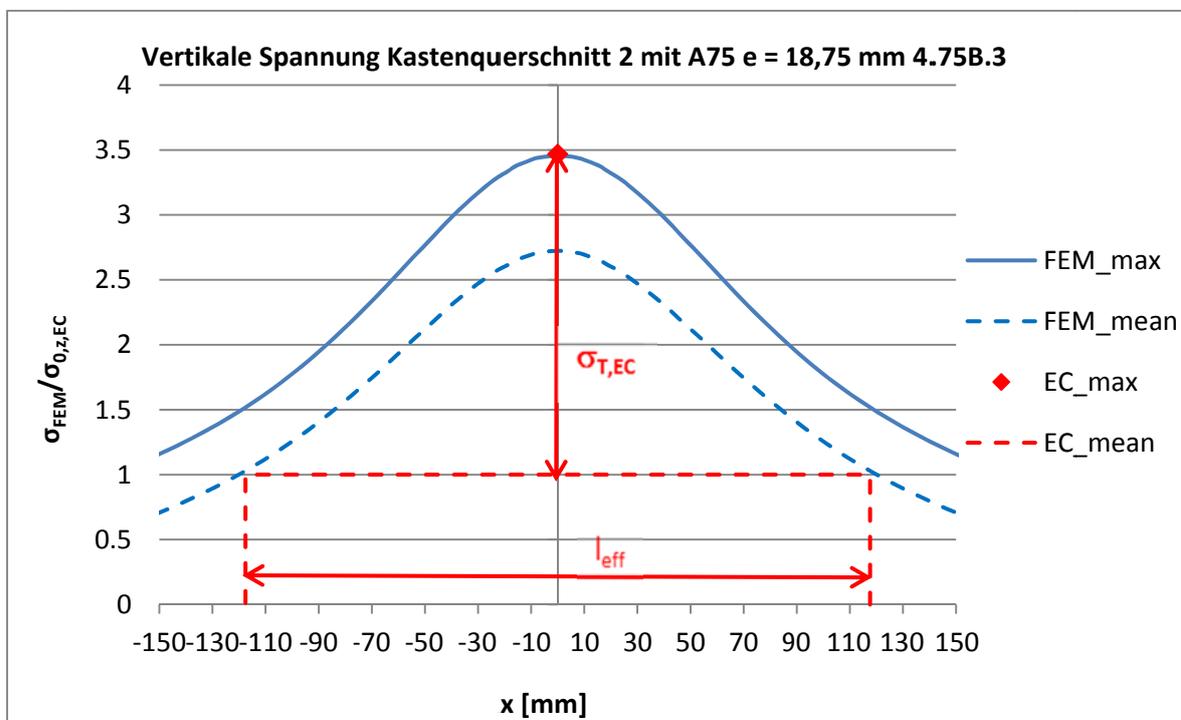


Abbildung 6-75: : FE Ergebnisse für das System 4.75B.3 (geklemmte Schiene)

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1 Versuche

Die Ergebnisse des Versuches mit loser Schiene und ohne Schiene beim HEA 300 Profil liefern eine sehr gute Übereinstimmung mit der FE-Berechnung. Die Abweichung zwischen FE-Berechnung und Versuch beträgt beim HEA Profil ohne Schiene 1,71% (siehe Tabelle 5-3) und bei jenem mit loser Schiene 5,47% (siehe Tabelle 5-4), daraus lässt sich schließen, dass die FE Modellierung zuverlässige Ergebnisse liefert.

Die durchgeführten Versuche zeigen jedoch auch, dass die lokalen Spannungen im Steg sehr stark von der Lagerung der Schiene am Träger abhängen. Imperfektionen, die bei der Herstellung der Kranbahnträger auftreten, haben einen großen Einfluss auf die maximal auftretenden Spannungen im Steg. Bei dem in Kapitel 5 gezeigten Laborversuch, wird bei jedem Querschnitt nur mit einem Prüfkörper gearbeitet. Mittels einer Versuchsreihe mit mehreren Prüfkörpern bzw. mit verschiedenen Belastungsstellen in Trägerlängsrichtung, könnte eine bessere Vergleichbarkeit mit der FE-Berechnung erzielt werden.

### 7.2 Parameterstudie

Die Parameterstudie zeigt, dass die mittels FE-Berechnung ermittelten lokalen Spannungen aus den zentrischen Belastungsfällen höhere Werte als jene nach EN1993-6 [1] liefern. Vor allem bei der starr verbundenen Blockschiene ist ein deutlicher Unterschied zwischen der vollkommen starr modellierten Verbindung und jener mit Schweißnähten zu erkennen. Bei der Berechnung nach EN 1993-6 [1] wird jedoch von einer vollkommen starren Verbindung ausgegangen.

#### 7.2.1 HEA 300 Querschnitt 1

Bei der zentrischen Belastung mit starr verbundener Blockschiene liegt der Maximalwert aus der FE Berechnung 21% über den Wert des Eurocodes [1] (siehe Abbildung 6-8). Die FE-Berechnung mit der mittels Kehlnähte aufgeschweißten Blockschiene ergibt einen Maximalwert, welcher 36% über der Normspannung liegt (siehe Abbildung 6-10). Zwischen der starr verbunden Schiene und der aufgeschweißten ergibt sich demnach eine Differenz von 15%.

Die FE-Ergebnisse der zentrisch belasteten Fälle mit loser Blockschiene und den A-Schienen (A45 und A75) liefern jeweils ein um 20-25% höheres Ergebnis als die Normberechnung.

Bei der exzentrischen Belastung der Systeme mit Blockschiene zeigt sich, dass die Mittelspannung ( $EC_{mean}$ ), welche analog zum zentrischen Fall bestimmt wird, niedriger als jene aus der FE-Berechnung ist (siehe Abbildung 6-9 und Abbildung 6-11). Der Biegespannungsanteil nach EN 1993-6 [1] liefert ein gutes Ergebnis. Die Maximalspannung nach EN [1] ist jedoch aufgrund der zu niedrigen Mittelspannung kleiner als jene der FE-Berechnung.

An den Ergebnissen der Systeme mit den A-Schienen (A45 und A75) ist zu erkennen, dass bei der exzentrischen Belastung die Torsionssteifigkeit der Schiene einen erheblichen Einfluss auf die Spannungen hat. Je höher die Torsionssteifigkeit der Schiene ist, desto konservativer ist die Formel laut EN 1993-6 [1]. Bei der A75 Schiene ist die Maximalspannung aus Normal- und

Biegeanteil nach EN [1] um 278% (siehe Abbildung 6-25) höher als jener der FE-Berechnung. Um diesen Effekt genauer beschreiben zu können, müssten noch weitere Berechnungen mit verschiedenen Träger- und Schientypen durchgeführt werden.

### **7.2.2 Geschweißtes I-Profil (Querschnitt 2)**

Beim geschweißten I-Profil mit Blockschiene treten die gleichen Effekte wie beim gewalzten HEA 300 Profil auf.

### **7.2.3 Kastenquerschnitt 1 (Querschnitt 3)**

Bei zentrischer Belastung gleichen die Ergebnisse jenen des HEA 300 Profils.

Bei der exzentrischen Belastung mit der Blockschiene werden die Biegespannungen laut EN 1993-6 [1] unterschätzt, das kann daran liegen, dass die Formel im Eurocode für ein I Profil hergeleitet wurden. Die Berechnung der lokalen Biegespannung aufgrund von exzentrischer Radlasten bei Kastenquerschnitten benötigt daher eine genauere Betrachtung.

### **7.2.4 Kastenquerschnitt 2 (Querschnitt 4)**

Die Berechnung mit der Blockschiene liefert wiederum beinahe dasselbe Ergebnis als die vorherigen Querschnitte.

Bei den A-Schienen zeigt sich jedoch, dass die kleine A-Schiene (A45) bei der Normberechnung mit exzentrischer Lasteinleitung ein sehr konservatives Ergebnis liefert (96% höher als die FE-Berechnung, siehe Abbildung 6-71). Bei der größeren und damit steiferen A75 Schiene stimmt die Berechnung laut Norm [1] beinahe exakt mit jener aus der FE-Berechnung überein.

Auch in diesem Fall ist es notwendig weitere Parameterstudien und Versuche mit unterschiedlichen Kastenquerschnitten und Schienen durchzuführen, um das Ergebnis besser verifizieren zu können.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] ÖNORM 1993-6: Eurocode 3 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 6: Kranbahnen, 15.08.2010
- [2] *Seeßelberg C.*: „Kranbahnen Bemessung und konstruktive Gestaltung nach Eurocode 4. Auflage“, Beuth Verlag GmbH Berlin Wien Zürich, 2014
- [3] *Petersen C.*: „Stahlbau Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten 2. Auflage“, Verlag Vieweg, 1990
- [4] *Osterrieder P., Oxfort J.*: „Beanspruchung von Kranbahnträgern durch Radlasteinleitung“, in: Stahlbauheft 59, Wilhelm Ernst & Söhne Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin, 1990
- [5] *Vögele H.-G.*: „Ermittlung der Spannungen im Steg von I Trägern im Lasteinleitungsbereich bei Lastangriff an den Gurten“, in: Stahlbauheft 8, Berlin, 1972
- [6] *Tretter P.*: „Variantenstudie lokaler vertikaler Spannungen in Kranträgern nach Vögele mittels MatLab“, Masterprojekt an der TU Graz am Institut für Stahlbau, 2017
- [7] Dassault Systèmes Simulia Corp., Softwarepaket Abaqus Version 6.14-5, 2015
- [8] *Rieve, J.*: „Stabilität I-förmiger Querschnitte unter der örtlichen Lasteinleitung“, Bautechnik-Archiv, Heft 7, Verlag Ernst & Söhne, Berlin 1953
- [9] *Girkmann, K.*: „Stegblechbeulen unter örtlichem Lastangriff“, Sitzungsbericht Österr. Akad. d. Wiss., Math-Nat. Kl. Abt. IIa, 145. Bd., Wien 1936
- [10] *Parkes, E. W.*: „The Stress Distribution near a Loading Point in a Uniform Flanged Beam“, Phil. Trans. Roy. Soc. Series A, Volume 244, London 1951-1952
- [11] ÖNORM 1991-3: Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 3: Einwirkungen infolge von Kranen und Maschinen, 01.04.2007

Dies ist eine Veröffentlichung des

## **FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ**

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe:

D – Diplom-, Masterarbeiten/Dissertationen | F – Forschungsberichte  
S – Skripten, Vorlesungsunterlagen | V – Vorträge, Tagungen

Institutskenzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau  
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau & Flächentragwerke  
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft  
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik  
10 – Labor für Konstruktiven Ingenieurbau

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl