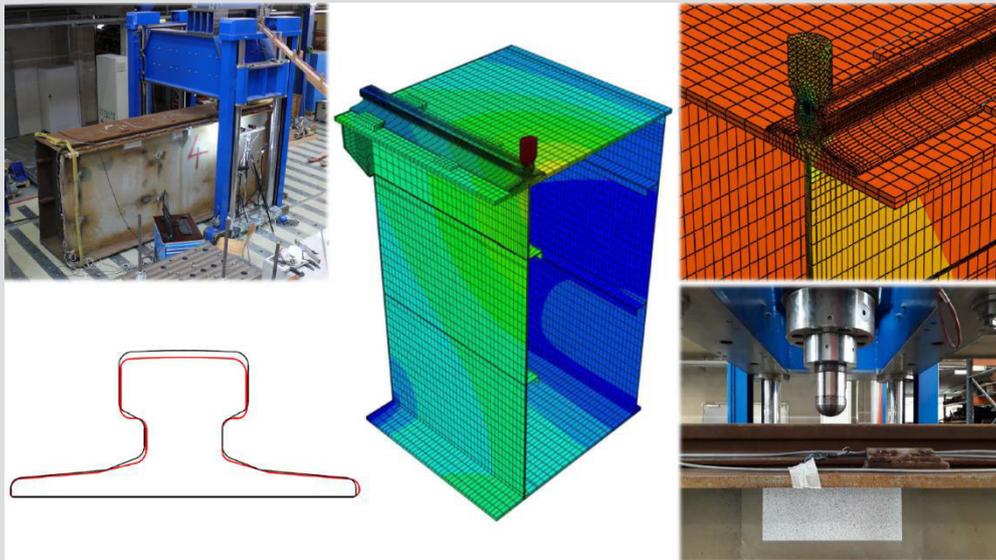


# Lokale Radlasteinleitung bei Hohlkasten-Kranbahnträgern: Laborversuche und numerische Berechnung



D-5-72/2018

**BSc. Christina Maria Macho**  
Institut für Stahlbau  
Technische Universität Graz



Christina Maria Macho, BSc

# **Lokale Radlasteinleitung bei Hohlkasten-Kranbahnträgern: Laborversuche und numerische Berechnung**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ.-Prof. DI Dr. techn. Harald Unterweger

Institut für Stahlbau

Ass. Prof. DI Dr. techn. Markus Kettler

## Eidesstattliche Erklärung

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

Graz, am .....      Unterschrift: .....

## Danksagung

Ich möchte mich sehr herzlich bei allen bedanken, die einen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit beigesteuert haben.

Besonderer Dank gilt hierbei Herrn Ass. Prof. DI Dr. techn. Markus Kettler, der mich von Anfang an immer engagiert und motiviert betreut hat und in vielen Gesprächen, das Entstehen dieser Masterarbeit positiv beeinflusst hat. Herzlichen Dank für die Unterstützung auch mit der Software Abaqus, die am Anfang nicht ganz ohne Tücken funktionieren wollte.

Ein großes Dankeschön auch an Herrn Univ.-Prof. DI Dr. techn. Harald Unterweger, dass ich am Stahlbauinstitut der Technischen Universität Graz meine Masterarbeit schreiben durfte.

Herzlichen Dank an meine Eltern, die mir immer zur Seite stehen und Bildung immer sehr gefördert haben. Euch verdanke ich einen großen Teil meiner Motivation und meines Durchhaltevermögens für mein Studium.

Dankeschön auch an meine beiden Schwestern, die immer Vorbilder waren und mich angespornt haben.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinem Lebenspartner Patrick für all die Unterstützung während des Studiums, die Ermutigungen und die unbeschwerte Freizeit bedanken.

## Kurzfassung

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit der lokalen Lasteinleitung bei Hohlkasten-Kranbahnträgern. Dabei werden die lokalen Spannungsfelder genauer analysiert, die unmittelbar unter der Radlast am Kranbahnträger entstehen. Dazu wurden Laborversuche an der Technischen Universität Graz durchgeführt, wobei verschiedene Trägerabschnitte durch Einzelradlasten belastet und unterschiedliche Lastexzentrizitäten getestet wurden. Des Weiteren wurde eine Studie mit der Finiten Elemente Methode durchgeführt mit dem Ziel, dass die Versuche so genau wie möglich mit der Software Abaqus simuliert werden. Außerdem wurde Eurocode 1993-6 herangezogen, um die Spannungsergebnisse aus den Versuchen und der FEM-Modellierung mit der aktuellen Norm zu vergleichen.

## Abstract

This master thesis examines the local load distribution in crane girders with welded box sections. This means that the local stress fields directly below the wheel load are analysed in detail. To achieve this goal, laboratory experiments were undertaken at Graz University of Technology where different sections of the girder were loaded (single wheel load), and various eccentricities were tested. Furthermore, a study with the finite element method was carried out with the aim to simulate the experiments as precisely as possible with the software Abaqus. Moreover, Eurocode 1993-6 was consulted in order to compare the stress results of the experiments and the FEM-modelling with the current standards.

# Inhaltsverzeichnis

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 1       | Einleitung und Überblick.....   | 1  |
| 1.1     | Allgemein .....   | 1  |
| 1.2     | Problemstellung und Ziel .....  | 1  |
| 1.3     | Aufbau der Arbeit .....   | 2  |
| 2       | Berechnungen der lokalen Spannungen.....  | 3  |
| 2.1     | Berechnung der Spannungen nach EN 1993-6 .....                                      | 3  |
| 2.2     | Berechnung der Biegespannungen infolge Exzentrizität nach J. Oxfort .....           | 5  |
| 2.3     | Berechnungsbeispiele: Übersicht und Vergleich .....                                 | 9  |
| 2.4     | Berechnungsbeispiel Variante 1: nicht abgenutzte Schiene.....                       | 11 |
| 2.4.1   | Berechnung der Spannungen ohne Exzentrizität (EC0).....                             | 11 |
| 2.4.2   | Berechnung der Dehnungen.....   | 12 |
| 2.4.2.1 | Allgemein .....   | 12 |
| 2.4.2.2 | Exkurs: Berechnung $\sigma_x$ und Faktor für das System LP II .....                 | 14 |
| 2.4.3   | Berechnung der Spannungen mit Exzentrizität (nach Oxfort) .....                     | 15 |
| 2.5     | Berechnungsbeispiel Variante 2: Schiene mit 25 % Abnutzung .....                    | 19 |
| 2.5.1   | Berechnung der Spannungen ohne Exzentrizität (EC0).....                             | 19 |
| 2.5.2   | Berechnung der Dehnungen.....   | 20 |
| 2.5.3   | Berechnung der Spannungen mit Exzentrizität (nach Oxfort) .....                     | 21 |
| 2.6     | Berechnungsbeispiel Variante 3: Schiene mit gemessener Abnutzung von ca. 12,5 % ... | 25 |
| 2.6.1   | Berechnung der Spannungen ohne Exzentrizität (EC0).....                             | 25 |
| 2.6.2   | Berechnung der Dehnungen.....   | 26 |
| 2.6.3   | Berechnung der Spannungen mit Exzentrizität (nach Oxfort) .....                     | 27 |
| 3       | Vorstudie zu den FEM-Spannungsberechnungen .....                                    | 31 |
| 3.1     | Modell der FEM-Berechnung zur Vorstudie .....                                       | 31 |
| 3.2     | Ergebnisse der FEM-Vorstudie und Vergleich mit der Normberechnung für Schiene A 75  | 33 |
| 3.2.1   | System LP I, ohne Exzentrizität.....  | 33 |
| 3.2.2   | LP I, Exzentrizität: +10 mm .....   | 35 |
| 3.2.3   | LP I, Exzentrizität: +20 mm .....   | 37 |
| 3.2.4   | LP I, Exzentrizität: -10 mm .....   | 39 |
| 3.2.5   | LP I, Exzentrizität: -20 mm .....   | 41 |
| 3.2.6   | LP II, ohne Exzentrizität .....   | 43 |
| 3.2.7   | LP II, Exzentrizität: +10 mm .....  | 45 |
| 3.2.8   | LP II, Exzentrizität: +20 mm .....  | 47 |
| 3.2.9   | LP II, Exzentrizität: -10 mm .....  | 49 |
| 3.2.10  | LP II, Exzentrizität: -20 mm .....  | 51 |
| 3.2.11  | LP III, ohne Exzentrizität.....   | 53 |
| 3.2.12  | LP III, Exzentrizität: +10 mm .....   | 55 |
| 3.2.13  | LP III, Exzentrizität: +20 mm .....   | 57 |
| 3.2.14  | LP III, Exzentrizität: -10 mm .....   | 59 |
| 3.2.15  | LP III, Exzentrizität: -20 mm .....   | 61 |
| 4       | Laborversuche .....   | 63 |
| 4.1     | Prüfkonzept .....   | 63 |
| 4.2     | Anpassungen an die Baupraxis .....  | 64 |
| 4.2.1   | Schienenabnutzung .....   | 64 |
| 4.2.2   | Anpassung des Versuchsausmaßes an die Schienenexzentrizität .....                   | 66 |
| 4.3     | Vergleich Lastaufbringung: Laststempel vs. Kranrad .....                            | 70 |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 5       | Auswertung der Laborversuche .....   | 75  |
| 5.1     | System LP I .....  | 75  |
| 5.1.1   | Ergebnisse für die Exzentrizität $e=+10$ mm .....                          | 75  |
| 5.1.2   | Ergebnisse für die Exzentrizität $e=+20$ mm .....                          | 76  |
| 5.1.3   | Ergebnisse für die Exzentrizität $e=+30$ mm .....                          | 76  |
| 5.1.4   | Ergebnisse ohne Exzentrizität $e=0$ mm (Stempel) .....                     | 77  |
| 5.1.5   | Ergebnisse für die Exzentrizität $e=-10$ mm .....                          | 77  |
| 5.2     | System LP II .....   | 78  |
| 5.2.1   | Ergebnisse für die Exzentrizität $e=+10$ mm .....                          | 78  |
| 5.2.2   | Ergebnisse für die Exzentrizität $e=+20$ mm .....                          | 79  |
| 5.2.3   | Ergebnisse für die Exzentrizität $e=+30$ mm .....                          | 80  |
| 5.2.4   | Ergebnisse ohne Exzentrizität $e=0$ mm (Stempel) .....                     | 81  |
| 5.2.5   | Ergebnisse für die Exzentrizität $e=-10$ mm .....                          | 82  |
| 5.3     | System LP III .....  | 83  |
| 5.3.1   | Ergebnisse für die Exzentrizität $e=+10$ mm .....                          | 83  |
| 5.3.2   | Ergebnisse für die Exzentrizität $e=+20$ mm .....                          | 83  |
| 5.3.3   | Ergebnisse für die Exzentrizität $e=+30$ mm .....                          | 84  |
| 5.3.4   | Ergebnisse ohne Exzentrizität $e=0$ mm (Stempel) .....                     | 84  |
| 5.3.5   | Ergebnisse für die Exzentrizität $e=-10$ mm .....                          | 85  |
| 6       | Numerische Berechnung .....  | 86  |
| 6.1     | FE-Modelle im Überblick .....  | 86  |
| 6.2     | Netzfeinheit der einzelnen FE-Modelle .....                                | 88  |
| 6.2.1   | Ursprüngliches FE-Modell .....   | 88  |
| 6.2.2   | Netzverfeinerung - Schritt 1 .....   | 89  |
| 6.2.3   | Netzverfeinerung - Schritt 2 .....   | 90  |
| 6.2.4   | Netzverfeinerung - Schritt 3 .....   | 91  |
| 6.2.5   | Ergebnisbetrachtung und Gegenüberstellung .....                            | 92  |
| 6.3     | FE-Modell 0 im Detail .....  | 96  |
| 6.3.1   | Ergebnisvergleich für System LP I .....                                    | 98  |
| 6.3.1.1 | System LP I – zentrische Lasteinleitung ( $e=0$ ) .....                    | 98  |
| 6.3.1.2 | System LP I – Lasteinleitung $e=+10$ mm .....                              | 99  |
| 6.3.1.3 | System LP I – Lasteinleitung $e=+20$ mm .....                              | 100 |
| 6.3.1.4 | System LP I – Lasteinleitung $e=+30$ mm .....                              | 101 |
| 6.3.1.5 | System LP I – Lasteinleitung $e=-10$ mm .....                              | 102 |
| 6.3.1.6 | System LP I – Lasteinleitung $e=-20$ mm .....                              | 103 |
| 6.3.1.7 | System LP I – Vergleich Kontaktdruck und Abhebungen (Kontaktverlust) ..... | 104 |
| 6.3.2   | Ergebnisvergleich für System LP III .....                                  | 108 |
| 6.3.2.1 | System LP III – zentrische Lasteinleitung ( $e=0$ ) .....                  | 108 |
| 6.3.2.2 | System LP III – Lasteinleitung: $e=+10$ mm .....                           | 109 |
| 6.3.2.3 | System LP III – Lasteinleitung: $e=+20$ mm .....                           | 110 |
| 6.3.2.4 | System LP III – Lasteinleitung: $e=+30$ mm .....                           | 111 |
| 6.3.2.5 | System LP III – Lasteinleitung: $e=-10$ mm .....                           | 112 |
| 6.3.2.6 | System LP III – Lasteinleitung: $e=-20$ mm .....                           | 113 |
| 6.4     | Vergleich Vorstudie mit Modell 0 .....                                     | 114 |
| 6.4.1   | Ergebnisvergleich für System LP I .....                                    | 114 |
| 6.4.1.1 | System LP I – zentrische Lasteinleitung ( $e=0$ ) .....                    | 114 |
| 6.4.1.2 | System LP I – exzentrische Lasteinleitung bei $e=+30$ .....                | 116 |
| 6.5     | FE-Modell 1 im Detail .....  | 117 |
| 6.5.1   | Ergebnisvergleich für System LP I .....                                    | 118 |
| 6.5.1.1 | System LP I – zentrische Lasteinleitung ( $e=0$ ) .....                    | 118 |
| 6.5.1.2 | System LP I – Lasteinleitung $e=+10$ mm .....                              | 119 |
| 6.5.1.3 | System LP I – Lasteinleitung $e=+20$ mm .....                              | 120 |
| 6.5.1.4 | System LP I – Lasteinleitung $e=+30$ mm .....                              | 121 |
| 6.5.1.5 | System LP I – Lasteinleitung $e=-10$ mm .....                              | 122 |
| 6.5.2   | Ergebnisvergleich für System LP III .....                                  | 123 |
| 6.5.2.1 | System LP III – zentrische Lasteinleitung ( $e=0$ ) .....                  | 123 |
| 6.5.2.2 | System LP III – Lasteinleitung $e=+10$ mm .....                            | 124 |
| 6.5.2.3 | System LP III – Lasteinleitung $e=+20$ mm .....                            | 125 |
| 6.5.2.4 | System LP III – Lasteinleitung $e=+30$ mm .....                            | 126 |
| 6.5.2.5 | System LP III – Lasteinleitung $e=-10$ mm .....                            | 127 |

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| 6.6      | FE-Modell 2 im Detail .....   | 128 |
| 6.6.1    | Ergebnisvergleich für System LP I .....   | 129 |
| 6.6.1.1  | System LP I – zentrische Lasteinleitung ( $e=0$ ) .....                         | 129 |
| 6.6.1.2  | System LP I – Lasteinleitung $e=+10$ mm .....                                   | 130 |
| 6.6.1.3  | System LP I – Lasteinleitung $e=+20$ mm .....                                   | 131 |
| 6.6.1.4  | System LP I – Lasteinleitung $e=+30$ mm .....                                   | 132 |
| 6.6.1.5  | System LP I – Lasteinleitung $e=-10$ mm .....                                   | 133 |
| 6.6.2    | Ergebnisvergleich für System LP III .....                                       | 134 |
| 6.6.2.1  | System LP III – zentrische Lasteinleitung ( $e=0$ ) .....                       | 134 |
| 6.6.2.2  | System LP III – Lasteinleitung $e=+10$ mm .....                                 | 135 |
| 6.6.2.3  | System LP III – Lasteinleitung $e=+20$ mm .....                                 | 136 |
| 6.6.2.4  | System LP III – Lasteinleitung $e=+30$ mm .....                                 | 137 |
| 6.6.2.5  | System LP III – Lasteinleitung $e=-10$ mm .....                                 | 138 |
| 6.7      | FE-Modell 3 im Detail .....   | 139 |
| 6.7.1    | Ergebnisvergleich für System LP I .....   | 140 |
| 6.7.1.1  | System LP I – zentrische Lasteinleitung ( $e=0$ ) .....                         | 140 |
| 6.7.1.2  | System LP I – Lasteinleitung $e=+10$ mm .....                                   | 141 |
| 6.7.1.3  | System LP I – Lasteinleitung $e=+20$ mm .....                                   | 142 |
| 6.7.1.4  | System LP I – Lasteinleitung $e=+30$ mm .....                                   | 143 |
| 6.7.1.5  | System LP I – Lasteinleitung $e=-10$ mm .....                                   | 144 |
| 6.7.2    | Ergebnisvergleich für System LP III .....                                       | 145 |
| 6.7.2.1  | System LP III – zentrische Lasteinleitung ( $e=0$ ) .....                       | 145 |
| 6.7.2.2  | System LP III – Lasteinleitung $e=+10$ mm .....                                 | 146 |
| 6.7.2.3  | System LP III – Lasteinleitung $e=+20$ mm .....                                 | 147 |
| 6.7.2.4  | System LP III – Lasteinleitung $e=+30$ mm .....                                 | 148 |
| 6.7.2.5  | System LP III – Lasteinleitung $e=-10$ mm .....                                 | 149 |
| 7        | Analyse der Ergebnisse – Versuch vs. Numerische Berechnung .....                | 150 |
| 7.1      | Vergleich zwischen den Versuchsergebnissen und der FEM-Studie .....             | 150 |
| 7.1.1    | Modell 2 im Vergleich zum Versuch .....   | 150 |
| 7.1.1.1  | System LP I, ohne Exzentrizität .....   | 150 |
| 7.1.1.2  | System LP I, mit Exzentrizität $e=+10$ mm .....                                 | 151 |
| 7.1.1.3  | System LP I, mit Exzentrizität $e=+20$ mm .....                                 | 152 |
| 7.1.1.4  | System LP I, mit Exzentrizität $e=+30$ mm .....                                 | 153 |
| 7.1.1.5  | System LP I, mit Exzentrizität $e=-10$ mm .....                                 | 154 |
| 7.1.1.6  | System LP III, ohne Exzentrizität .....   | 155 |
| 7.1.1.7  | System LP III, mit Exzentrizität $e=+10$ mm .....                               | 156 |
| 7.1.1.8  | System LP III, mit Exzentrizität $e=+20$ mm .....                               | 157 |
| 7.1.1.9  | System LP III, mit Exzentrizität $e=+30$ mm .....                               | 158 |
| 7.1.1.10 | System LP III, mit Exzentrizität $e=-10$ mm .....                               | 159 |
| 7.1.2    | Modell 3 im Vergleich zum Versuch .....   | 160 |
| 7.1.2.1  | System LP I, ohne Exzentrizität .....   | 160 |
| 7.1.2.2  | System LP I, mit Exzentrizität $e=+10$ mm .....                                 | 161 |
| 7.1.2.3  | System LP I, mit Exzentrizität $e=+20$ mm .....                                 | 162 |
| 7.1.2.4  | System LP I, mit Exzentrizität $e=+30$ mm .....                                 | 163 |
| 7.1.2.5  | System LP I, mit Exzentrizität $e=-10$ mm .....                                 | 164 |
| 7.1.2.6  | System LP III, ohne Exzentrizität .....   | 165 |
| 7.1.2.7  | System LP III, mit Exzentrizität $e=+10$ mm .....                               | 166 |
| 7.1.2.8  | System LP III, mit Exzentrizität $e=+20$ mm .....                               | 167 |
| 7.1.2.9  | System LP III, mit Exzentrizität $e=+30$ mm .....                               | 168 |
| 7.1.2.10 | System LP III, mit Exzentrizität $e=-10$ mm .....                               | 169 |
| 7.2      | Ergebnisvergleich aus den einzelnen Modellen anhand von LP I $e=+20$ mm .....   | 170 |
| 7.3      | Vergleich von System LP I zu System LP III .....                                | 175 |
| 7.3.1    | Ergebnisse ohne Exzentrizität .....   | 175 |
| 7.3.2    | Ergebnisvergleich der Systeme LP I zu LP III mit Exzentrizität $e=+20$ mm ..... | 178 |
| 8        | Zusammenfassung und Ausblick .....  | 181 |
|          | Literaturverzeichnis .....  | 182 |

# 1 Einleitung und Überblick

## 1.1 Allgemein

Diese Masterarbeit befasst sich mit den Spannungen und Dehnungen im Steg von Hohlkasten-Kranbahnträgern, die aufgrund von lokalen Radlasteinleitungen entstehen. Damit dieses Thema fundiert betrachtet werden kann, werden Studien mit der Finiten Elemente Methode mit der Software Abaqus durchgeführt. Des Weiteren werden Laborversuche an der Technischen Universität Graz gemacht, um so versuchstechnische Ergebnisse zu erlangen. Außerdem wird das Thema auch theoretisch bearbeitet, indem Normen und Regelwerke studiert werden.

## 1.2 Problemstellung und Ziel

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die lokalen Spannungen im Steg von Hohlkasten-Kranbahnträgern realistisch abzubilden und dadurch Vergleiche zwischen der Norm, den FEM-Studien und den Laborversuchen durchführen zu können.

Um einen ersten Überblick zu geben, zeigt Abbildung 1.1 den untersuchten Hohlkasten-Kranbahnträger und das Versuchsausmaß. Die vertikale Radlast wurde unabhängig voneinander an drei Stellen eingeleitet, die in dieser Arbeit mit LP I, LP II und LP III bezeichnet werden. Da die Lagerung des Trägers dabei variiert (vgl. Abbildung 1.1), wird nachfolgend von den Systemen LP I, LP II und LP III gesprochen. Bei System LP I besitzt der Träger eine Stützweite von 2000 mm und zwei Längssteifen (L80/40/6) je Steg. Bei System LP II wurde der gesamte Träger mit einer Stützweite von 4000 mm betrachtet. Bei System LP III besitzt der Träger auch eine Stützweite von 2000 mm, allerdings ohne Längssteifen an den Stegen in diesem Bereich. Der Träger weist insgesamt drei Querschotte auf, mit Abständen von 2000 mm in Trägerlängsrichtung.

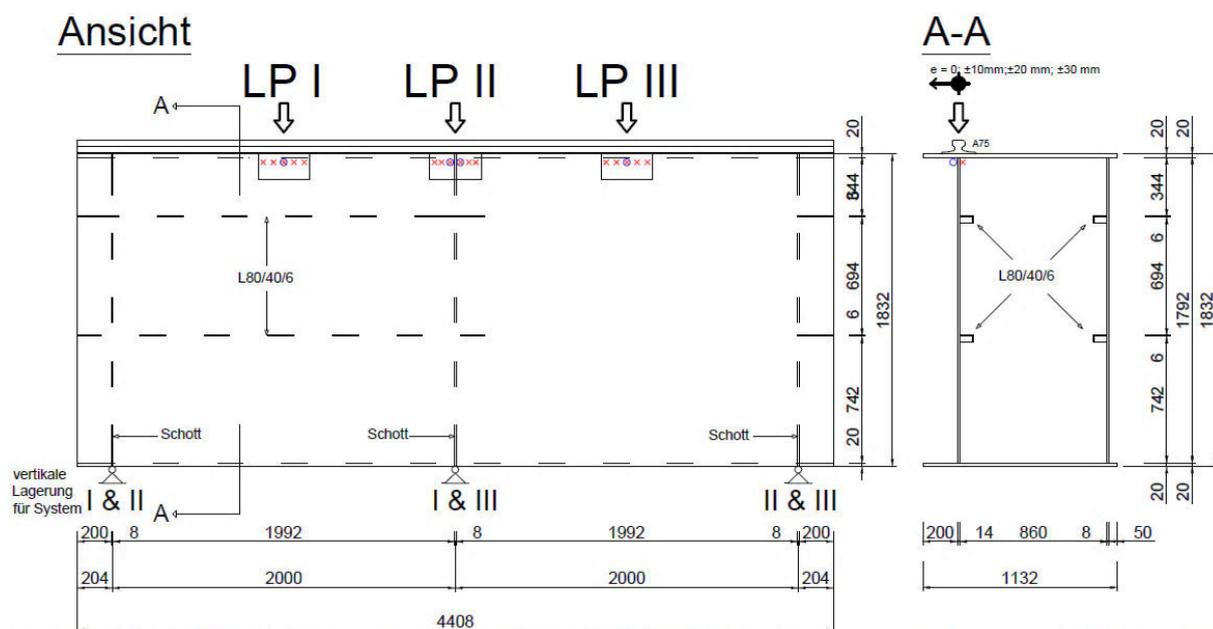


Abbildung 1.1: Übersicht über das Versuchsausmaß

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Im ersten Kapitel dieser Masterarbeit werden Aufgabenstellung und Zielsetzung erläutert und ein Überblick über die einzelnen Kapitel gegeben.

Im zweiten Kapitel werden die lokalen Spannungen berechnet und es wird detailliert auf den Eurocode eingegangen. Dabei werden auch die Spannungen, die aus der exzentrischen Belastung entstehen, nach J. Oxford berechnet. In diesem Kapitel werden nicht nur die theoretischen Hintergründe beleuchtet, sondern auch praktische Berechnungsbeispiele gegeben, um so dem Leser nachvollziehbar das Wesentliche darzulegen.

Das dritte Kapitel beschäftigt sich mit einer Vorstudie. Die Vorstudie wurde mittels der Finiten Elemente Methode durchgeführt und berücksichtigt keinerlei Abnutzungen der Schiene. In diesem Kapitel befindet sich auch ein Vergleich mit der Norm.

Im vierten Kapitel wird auf die Laborversuche eingegangen. Hier befindet sich ein Überblick über das Versuchsausmaß, die tatsächlichen Gegebenheiten beim Versuch und die daraus resultierenden erforderlichen Anpassungen der numerischen Modelle. Die Abnutzungen der Schiene, die sich aufgrund einer jahrzehntelangen Nutzung ergeben haben, werden hier detailliert aufgearbeitet und modelliert. Des Weiteren wird hier ein Ergebnisvergleich zwischen der Lastaufbringung mittels Laststempel und mittels Rad gezogen.

Das nächste Kapitel beschäftigt sich mit der Auswertung der Laborversuche. Hierbei werden vor allem Diagramme zur Kraft-Dehnungs-Beziehung gezeigt.

Im sechsten Kapitel wird intensiv auf die numerischen Berechnungen eingegangen. Hier werden die verschiedenen Modelle und Iterationsschritte genau erklärt und die Ergebnisse der FEM-Studien dargelegt und mit der Norm verglichen. Außerdem wird auch eine Studie zur Netzverfeinerung für die Finite Elemente Berechnung präsentiert.

Im siebenten Kapitel werden die Ergebnisse der numerischen Berechnungen und der Laborversuche analysiert und daraus Schlüsse gezogen. Besonderes Augenmerk wird dabei auf den Vergleich zwischen Versuchsergebnissen und der FEM-Studie gelegt. Hierbei werden bei ersterem sowohl die Ergebnisse zu den einzelnen Dehnmessstreifen als auch das Mercury-System betrachtet. Das Mercury-System ist eine bildbezogene Messmethode, welches über Kameras die Verschiebungen der einzelnen Punkte misst und daraus Dehnungen berechnet. Des Weiteren wird ein Vergleich zwischen den Systemen LP I und LP III angestellt und zusätzlich werden hier die Ergebnisse mit einer FEM-Berechnung, die als Grenzfall das Modell mit unendlich steifen Längssteifen abbildet, verglichen.

Im achten und letzten Kapitel dieser Masterarbeit wird dem Leser eine Zusammenfassung und ein Ausblick gegeben.

## 2 Berechnungen der lokalen Spannungen

In diesem Kapitel wird auf den *Eurocode 3, Teil 6: Kranbahnen* [1], eingegangen und es werden beispielhaft drei unterschiedliche Berechnungen für die Kranschiene A 75 durchgeführt. Die erste Berechnung befasst sich mit der Schiene ohne Abnutzung, die zweite mit der nominell-abgenutzten Schiene und die dritte mit der tatsächlichen Abnutzung der Schiene, die sich auf circa 12,5 % der Höhe des Schienenkopfes beläuft. Des Weiteren werden die Biegespannungen, die sich aus der Exzentrizität der Radlasteinleitung ergeben, nach J. Oxfort [3] berechnet.

### 2.1 Berechnung der Spannungen nach EN 1993-6

Der Eurocode EN 1993-6 [1], Abschnitt 5.7 gibt die Formel für die lokale vertikale Druckspannung wie folgt an:

$$\sigma_{0z,Ed} = \frac{F_{z,Ed}}{l_{eff} * t_w}$$

Dabei ist:

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

Die effektive Lastausbreitungslänge  $l_{eff}$  darf dabei nach nachstehender Tabelle 2.1 ermittelt werden. Die Abbildung 2.1 stellt die Länge  $l_{eff}$  grafisch dar. [1, 2]

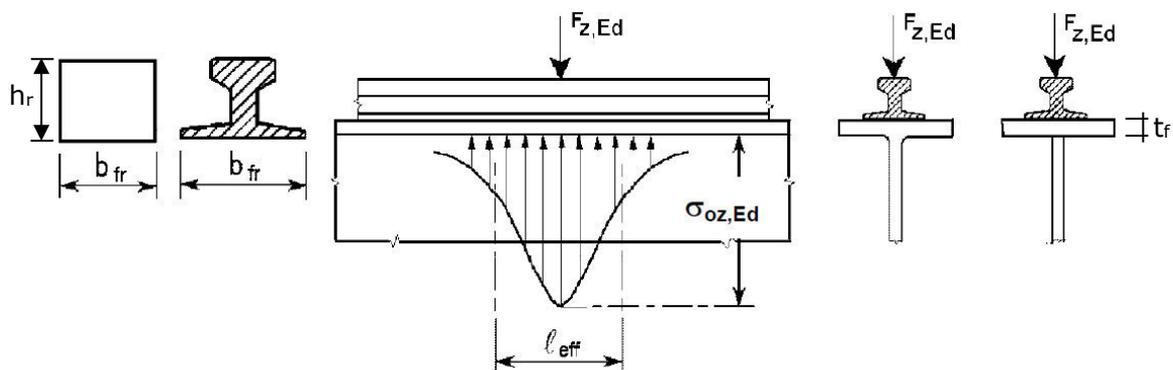


Abbildung 2.1: Effektive Lastausbreitungslänge  $l_{eff}$  [1]

Tabelle 2.1: Formeln für  $l_{\text{eff}}$  und  $b_{\text{eff}}$  für diverse Fälle [1]

| Fall  | Beschreibung   | Effektive Lastausbreitungslänge $l_{\text{eff}}$               |
|---|--|--|
| (a)   | Kranschiene Schubstarr am Flansch befestigt  | $l_{\text{eff}} = 3,25 [I_{\text{ff}} / t_w]^{1/3}$            |
| (b)   | Kranschiene nicht Schubstarr am Flansch befestigt  | $l_{\text{eff}} = 3,25 [(I_r + I_{\text{f,eff}}) / t_w]^{1/3}$ |
| (c)   | Kranschiene auf einer mind. 6mm dicken nachgiebigen Elastomerunterlage   | $l_{\text{eff}} = 4,25 [(I_r + I_{\text{f,eff}}) / t_w]^{1/3}$ |
| $I_{\text{f,eff}}$  | Flächenmoment zweiten Grades um die horizontale Schwerlinie des Flansches mit der effektiven Breite $b_{\text{eff}}$   |  |
| $I_r$   | Flächenmoment zweiten Grades um die horizontale Schwerlinie der Schiene  |  |
| $I_{\text{ff}}$   | Flächenmoment zweiten Grades um die horizontale Schwerlinie des zusammengesetzten Querschnitts einschließlich der Schiene und des Flansches mit der effektiven Breite $b_{\text{eff}}$ |  |
| $t_w$   | Stegdicke  |  |
| $b_{\text{eff}} = b_{\text{fr}} + h_r + t_f$ aber $b_{\text{eff}} \leq b$   |  |  |
| Dabei ist   |  |  |
| $b$   | die Gesamtbreite des Obergurtes;   |  |
| $b_{\text{fr}}$   | die Breite des Schienenfußes, siehe Abbildung 2.1  |  |
| $h_r$   | die Schienenhöhe, siehe Abbildung 2.1  |  |
| $t_f$   | die Flanschdicke.  |  |
| ANMERKUNG Der Verschleiß der Kranschiene wird bei der Bestimmung von $I_r$ , $I_{\text{ff}}$ und $h_r$ berücksichtigt, siehe 5.6.2(2) und 5.6.2(3). |  |  |

Für die Berechnungen in dieser Masterarbeit wurde Fall (b) verwendet, das heißt, dass die Kranschiene nicht Schubstarr am Flansch befestigt war (siehe Tabelle 2.1). Die Schiene ist längs verschieblich gelagert.

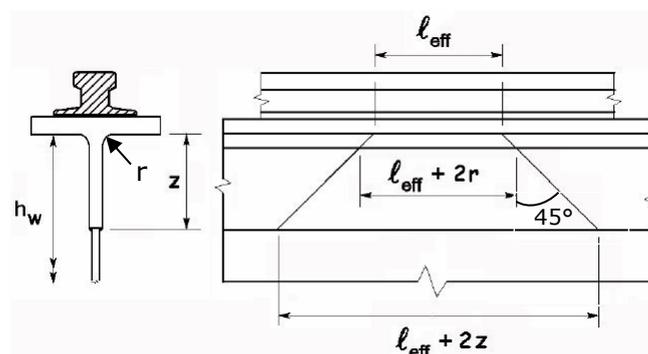


Abbildung 2.2: Abklingen der Spannungen über die Steghöhe mit einem Lastausbreitungswinkel von  $45^\circ$  [1]

Da die Spannungen nicht an der Unterkante des Flansches, sondern in einem vertikalen Abstand  $z$  gesucht waren, wurde das Abklingen der Spannungen nach Abbildung 2.2 berechnet.

## 2.2 Berechnung der Biegespannungen infolge Exzentrizität nach J. Oxfort

Für die Spannungen, die infolge von Radexzentrizitäten entstehen, wurde das Modell von J. Oxfort [3] zur Berechnung herangezogen. Dieses nachfolgende Modell berücksichtigt auch die Mitwirkung des Obergurts bei Kastenprofilen nach [4].

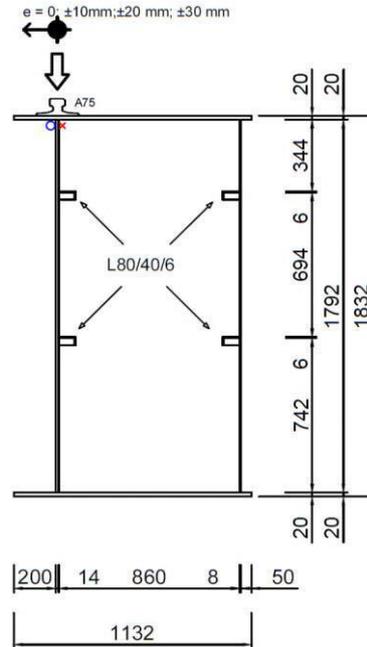


Abbildung 2.3: Maße des betrachteten Kranbahnträgers

Abbildung 2.3 zeigt die Maße des Kranbahnträgers, der für diese Masterarbeit herangezogen wurde. Der Träger besitzt vier Längssteifen im Bereich von LP I und eine Schiene vom Typ A 75, die zentrisch und exzentrisch belastet wird.

Die Vorgehensweise der Spannungsberechnungen wird nachfolgend dargestellt. Die detaillierten Ergebnisse für die einzelnen Lastpositionen und Exzentrizitäten sind dann tabellarisch in den jeweiligen Berechnungskapiteln zu finden.

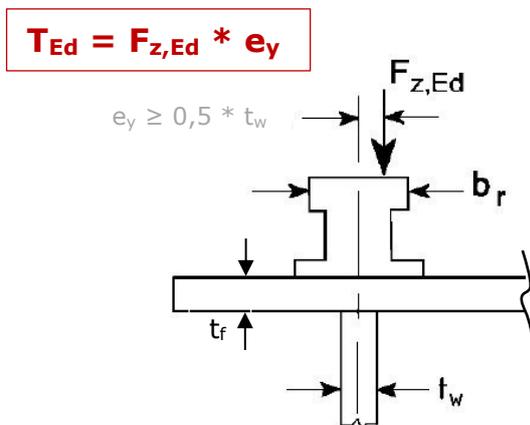


Abbildung 2.4: Torsion des Obergurts eines Kastenquerschnitts

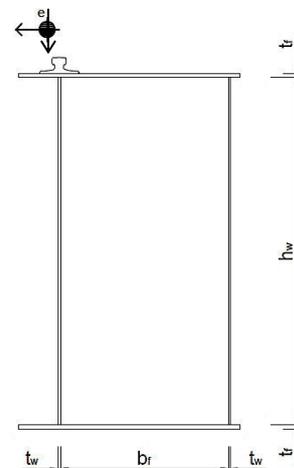


Abbildung 2.5: Querschnittsbezeichnungen

Als Eingangswerte werden folgende Werte benötigt (Bezeichnung nach Originalliteratur):

Geometrische Eingangswerte (vergleiche Abbildung 2.5):

|                              |     |  |
|------------------------------|-----|--|
| $a$                          | ... | Abstand der Quersteifen im Steg; hier $a = 2000$ mm                          |
| $h_w$                        | ... | Höhe des Steges bzw. Höhe bis zur ersten Längssteife (vom Obergurt gemessen) |
| $t_{s, \text{Profil}} = t_w$ | ... | Stegdicke  |
| $b_f = b$                    | ... | Flanschbreite  |
| $t_{fl} = t$                 | ... | Flanschdicke   |
| $I_{T,G^*}$                  | ... | Torsionsträgheitsmoment  |

Das Torsionsträgheitsmoment  $I_{T,G^*}$  setzt sich ausschließlich aus dem Torsionsträgheitsmoment der Schiene zusammen, da die Steifigkeit des Flansches bereits durch die im Modell berücksichtigte Plattentragwirkung eingerechnet wird. [3,4]

Materialspezifische Eingangswerte:

|       |     |                      |                                     |
|-------|-----|----------------------|-------------------------------------|
| $\nu$ | ... | Querkontraktionszahl | ( $\nu = 0,30$ )                    |
| $G$   | ... | Schubmodul           | ( $G = 81.000$ N/mm <sup>2</sup> )  |
| $E$   | ... | Elastizitätsmodul    | ( $E = 210.000$ N/mm <sup>2</sup> ) |

Nachfolgend werden die Berechnungsformeln Schritt für Schritt erläutert. In den weiteren Kapiteln, in denen sich die Zahlenwerte befinden, werden nur noch die Zwischenergebnisse und das Endergebnis angeführt.

In einem ersten Schritt wird die effektive Steghöhe  $h^*$  unter Berücksichtigung der Plattenwirkung des Stegs berechnet. Dafür wird der Abstand zwischen den Quersteifen (Maß  $a$ ) und die Höhe des Steges ( $h_w$ ) benötigt.

$$h^* = \frac{a}{4,19} \frac{(\operatorname{sinhyp}\left(2 * \frac{\pi}{a} * h_w\right)) - 2 * \frac{\pi}{a} * h_w}{\operatorname{sinhyp}^2\left(\frac{\pi}{a} * h_w\right)}$$

Für die Berechnung der effektiven Verdreh-Steifigkeit  $\overline{m}_d$  wird das soeben berechnete  $h^*$ , der E-Modul ( $E$ ), die Stegdicke ( $t_{s, \text{Profil}}$ ) und die Querkontraktionszahl ( $\nu$ ) verwendet.

$$\overline{m}_d = \frac{1}{h^*} * 3 * E * \frac{t_{s, \text{Profil}}^3}{12 * (1 - \nu^2)}$$

Danach werden die Werte  $\overline{m}_d$ , der Schubmodul ( $G$ ) und das Torsionsträgheitsmoment ( $I_{T,G^*}$ ) gebraucht, um die Hilfsgröße  $\lambda$  auszurechnen.

$$\lambda = \sqrt{\frac{\overline{m}_d}{G * I_{T,G^*}}}$$

In einem weiteren Schritt wird die effektive Gurtbreite  $b^*$  berechnet, nämlich mit den Werten: Abstand zwischen den Quersteifen (Maß  $a$ ) und der Flanschbreite ( $b$ ).

$$b^* = \frac{a}{4,19} \frac{(\operatorname{sinhyp}\left(2 * \frac{\pi}{a} * b\right)) - 2 * \frac{\pi}{a} * b}{\operatorname{sinhyp}^2\left(\frac{\pi}{a} * b\right)}$$

Danach wird die Verdrehsteifigkeit  $\overline{m}_d^*$  der oberen Stegkante, unter zusätzlicher Berücksichtigung der Obergurt-Steifigkeit, mit den Werten  $b^*$ , dem E-Modul, der Flanschdicke ( $t_{fl}$ ), der Querkontraktionszahl und  $\overline{m}_d$  ermittelt.

$$\overline{m}_d^* = \frac{1}{b^*} * 3 * E * \frac{t_{fl}^3}{12 * (1 - \nu^2)} + \overline{m}_d$$

Zur Ermittlung von  $\lambda^*$  werden die Werte  $\overline{m}_d^*$ , der Schubmodul ( $G$ ) und das Flächenträgheitsmoment ( $I_{T,G^*}$ ) benötigt.

$$\lambda^* = \sqrt{\frac{\overline{m}_d^*}{G * I_{T,G^*}}}$$

Im nächsten Schritt wird die maximale Verdrehung der oberen Stegkante  $\varphi_m$  berechnet. Dafür wird das Torsionsmoment ( $T_{Ed}$ ),  $\lambda^*$ , der Schubmodul ( $G$ ), das Torsionsträgheitsmoment ( $I_{T,G^*}$ ) und der Abstand zwischen den Quersteifen ( $a$ ) herangezogen.

$$\varphi_m = \frac{T_{Ed}}{(2 * \lambda^* * G * I_{T,G^*})} * \operatorname{tanhyp}\left(\frac{\lambda^* * a}{2}\right)$$

Mit:  $T_{Ed} = F_{z,Ed} * e_y$

Somit erhält man schlussendlich die vertikale Normalspannung (Stegbiegung) infolge Torsion  $\sigma_{T,Ed}$  durch Einsetzen von  $\varphi_m$ ,  $\overline{m}_d$  und der Stegdicke ( $t_{s,Profil}$ ).

$$\sigma_{T,Ed} = \frac{6}{t_{s,Profil}^2} * \varphi_m * \overline{m}_d$$

Die Berechnungen der Normalspannungen wurden für zwei Grenzfälle durchgeführt, die im weiteren Verlauf der Arbeit als System LP I und LP III bezeichnet werden. Bei System LP I handelt es sich um einen Kastenträger, der zwei Längssteifen je Seite besitzt. Der Träger bei System LP III besitzt jedoch keine Längssteifen. Das heißt, dass bei der Berechnung der Biegespannungen  $\sigma_{T,Ed}$  für das System LP I wurde als Höhe  $h_w$  die Höhe Flanschunterkante bis zur Längssteife eingesetzt (Anmerkung: dies setzt eine ausreichend hohe Biegesteifigkeit der Längssteife aus der Stegebene voraus) und für die Berechnung bei System LP III als Höhe  $h_w$  die gesamte Steghöhe (siehe Abbildung 2.6 und Abbildung 2.7).

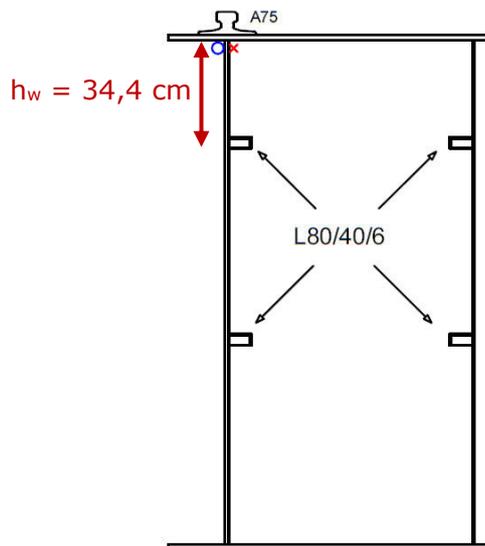


Abbildung 2.6: Schemaskizze zu System LP I

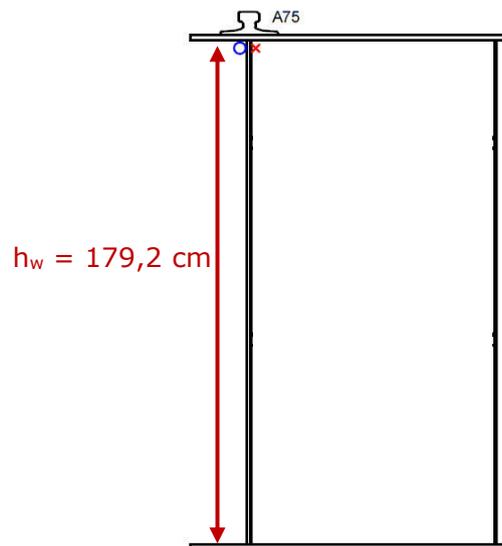


Abbildung 2.7: Schemaskizze zu System LP III

### 2.3 Berechnungsbeispiele: Übersicht und Vergleich

Die Berechnungen wurden für System I und III mit folgenden drei Varianten der Kran-  
 schiene A 75 durchgeführt:

- Bei Variante 1 wurde die Schiene ohne jegliche Abnutzung verwendet.
- Die zweite Berechnung (Variante 2) behandelt die in der Norm für den Tragsicher-  
 heitsnachweis vorgeschriebene Abnutzung, also eine um circa 25 % abgeschliffene  
 Schiene (Bezug auf Schienenkopfhöhe  $h_3$ ). Dabei ist laut Tabelle 2.2 die Abnutzung  
 $a$  (siehe Abbildung 2.7) acht Millimeter.

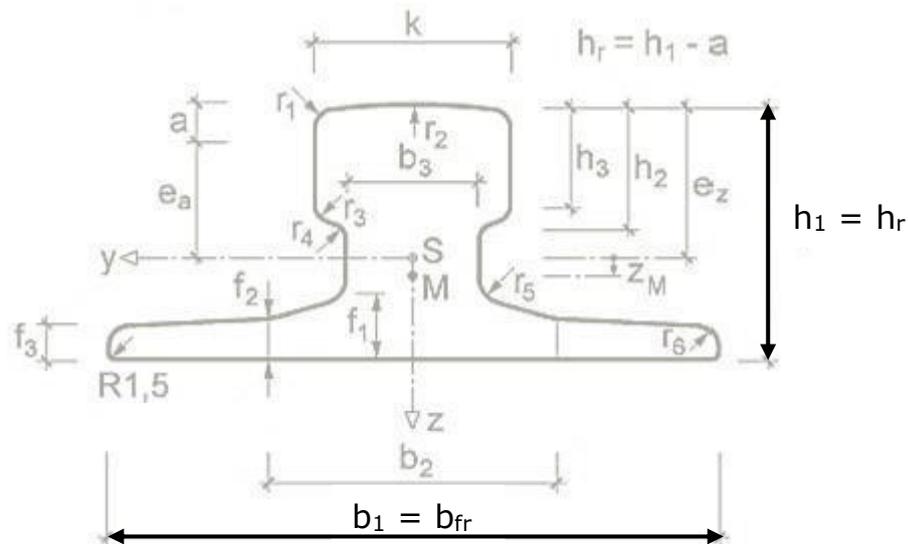


Abbildung 2.8: Schiene der Form A [5]

- Die dritte Berechnung (Variante 3) wurde mit der realen Schiene durchgeführt, so  
 wie sie auch während der Versuche am Kranbahnträger vorhanden war. Dazu wur-  
 den die angefertigten AutoCAD-Zeichnungen ausgewertet und parallel in dem Paper  
 von Kraus et al [5] (Querschnittswerte von abgenutzten Schienen) recherchiert.

Die geometrischen Abweichungen für die Gesamthöhe der Schiene  $h_r$  beträgt zwischen  
 unabgenutzter Schiene ( $h_r=85$  mm) und der um ca. 12,5 % abgenutzten Schiene  
 ( $h_r=81$  mm) 4 mm. Die gesamte Schienenfußbreite  $b_{fr}$  beträgt als Sollmaß 200 mm (A 75)  
 und als Ist-Maß während der Versuche 202 mm. Die Abweichung beträgt somit 2 mm.

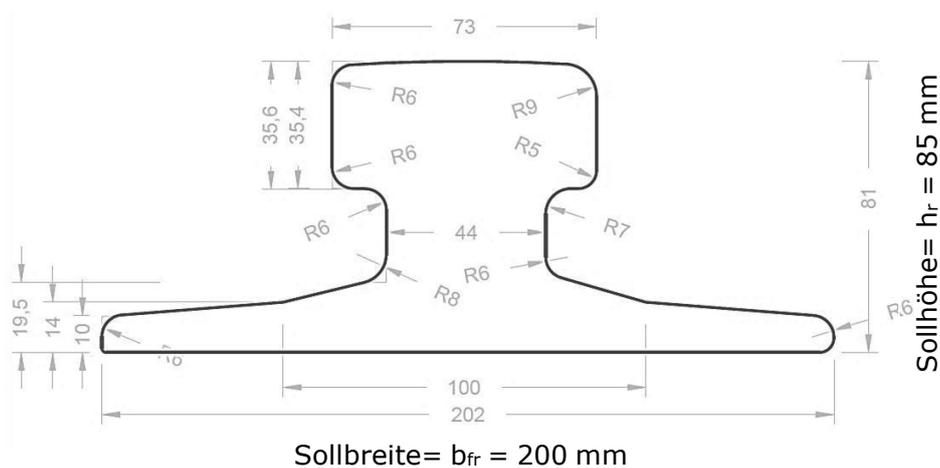


Abbildung 2.9: Abmessungen der realen Schiene

In nachstehender Tabelle 2.2 findet man eine Gegenüberstellung der maßgebenden Werte.

Tabelle 2.2: Vergleich der maßgebenden Werte für Variante 3: AutoCAD zur Literatur

|                                      | <b>Reale Schiene /<br/>AutoCAD</b> | <b>Abnutzung 12,5 %<br/>(Werte aus [5])</b> | <b>Absolute<br/>Abweichung</b> | <b>Prozentuelle<br/>Abweichung</b> |
|--------------------------------------|------------------------------------|---|--------------------------------|------------------------------------|
| <b>a</b>                             | 4,0 mm                             | 4,4 mm                                      | 0,4 mm                         | 0,09 %                             |
| <b>A</b>                             | 67,54 cm <sup>2</sup>              | 68,47 cm <sup>2</sup>                       | 0,93 cm <sup>2</sup>           | 0,01 %                             |
| <b>I<sub>y</sub> = I<sub>r</sub></b> | 457,57 cm <sup>4</sup>             | 459,00 cm <sup>4</sup>                      | 1,43 cm <sup>4</sup>           | 0,30 %                             |
| <b>I<sub>z</sub></b>                 | 952,14 cm <sup>4</sup>             | 997,70 cm <sup>4</sup>                      | 44,86 cm <sup>4</sup>          | 4,50 %                             |
| <b>I<sub>T</sub></b>                 |                                    | 271,3 cm <sup>4</sup>                       |                                |                                    |

Als Erklärung der Tabelle ist hierbei zu erwähnen, dass es sich bei den Werten des Papers von Kraus et al [5] um eine Abnutzung von 12,5 % handelt. Dies ist also genau jene Abnutzung, die laut Norm [1] auch für die Ermüdungsberechnungen heranzuziehen ist.

Da die Abweichungen der realen Schiene zu den publizierten Werten vernachlässigbar gering sind, wurden die Querschnittswerte von Kraus et al [5] übernommen.

Die nachstehende Tabelle 2.3 zeigt eine Übersicht und einen Vergleich der für die Berechnung notwendigen Werte:

Tabelle 2.3: Maßgebende Werte für die Berechnungsbeispiele

|                      | <b>A 75<br/>(Werte aus [6])</b> | <b>25 % Abnutzung<br/>(Werte aus [6])</b> | <b>12,5 % Abnutzung<br/>(Werte aus [5])</b> |
|----------------------|---------------------------------|---|---|
| <b>a</b>             | 0,0 mm                          | 8,0 mm                                    | 4,4 mm                                      |
| <b>I<sub>y</sub></b> | 536,3 cm <sup>4</sup>           | 400,7 cm <sup>4</sup>                     | 459,0 cm <sup>4</sup>                       |
| <b>I<sub>T</sub></b> | 309,5 cm <sup>4</sup>           | 242,6 cm <sup>4</sup>                     | 271,3 cm <sup>4</sup>                       |

## 2.4 Berechnungsbeispiel Variante 1: nicht abgenutzte Schiene

In diesem Unterkapitel werden die Spannungen und Dehnungen für die Schiene ohne Abnutzung ( $h_r = 85 \text{ mm}$ ,  $b_{fr} = 200 \text{ mm}$ ) berechnet. Es gibt einen Einblick in die Berechnung und dient zum besseren Verständnis und der Nachvollziehbarkeit der Vergleiche. Die Ergebnisse werden als Vergleich für die Vorstudie herangezogen.

### 2.4.1 Berechnung der Spannungen ohne Exzentrizität (ECO)

Hierbei wird plakativ die Berechnung für die Lastposition LP I und für eine Last von 400 kN geführt.

$$\sigma_{o,z,Ed} = \frac{F_{z,Ed}}{l_{eff} * t_w}$$

Dabei ist nun:

$F_{z,Ed} = 400 \text{ kN}$  ... der Bemessungswert der Radlast

$t_w = 14 \text{ mm}$  ... die Dicke des Stegblechs

Die effektive Lastausbreitungslänge  $l_{eff}$  wurde mit folgender Formel berechnet:

$$l_{eff} = 3,25 * ((I_r + I_{f,eff}) / t_w)^{\frac{1}{3}}$$
$$l_{eff} = 3,25 * (556,63 / 1,4)^{\frac{1}{3}} * 10 = 240 \text{ mm}$$

Die Bezeichnung  $(I_r + I_{f,eff})$  steht für das Flächenträgheitsmoment zweiten Grades um die horizontale Achse und setzt sich aus einem Anteil für die Schiene und einem für den Flansch zusammen (vgl. Tabelle 2.1). Damit das Flächenträgheitsmoment für den Flansch berechnet werden konnte, musste eine effektive Breite ermittelt werden.

$$b_{eff} = b_{fr} + h_r + t_f = 200 \text{ mm} + 85 \text{ mm} + 20 \text{ mm} = 305 \text{ mm} \leq b = 1000 \text{ mm} \quad \checkmark$$

$$I_{f,eff} = \frac{30,5 \text{ cm} * 2^3 \text{ cm}}{12} = 20,33 \text{ cm}^4$$

$$I_{y,Schiene} = I_r = 536,3 \text{ cm}^4 \quad \dots \text{ siehe Tabelle 2.3}$$

Anmerkung: Die Berechnung wurde mit der nicht abgenutzten Schiene durchgeführt, um so den Vergleich mit dem FEM-Modell der Vorstudie repräsentativ durchführen zu können. Laut Norm müsste eine nominelle Abnutzung berücksichtigt werden.

Daraus ergibt sich nun ein Wert für  $(I_r + I_{f,eff})$  von  $556,63 \text{ cm}^4$ .

Mit diesem Ergebnis kann man nun die Länge  $l_{eff}$  berechnen (siehe oben).

Da die Spannung aber nicht an der Unterkante des Obergurts, sondern 30 Millimeter unterhalb benötigt wird (Lage der DMS im Versuch), muss die Lastausbreitungslänge neu berechnet werden (siehe auch Abbildung 2.2).

$$l_{eff,z=30} = l_{eff} + 2 * z = 240 \text{ mm} + 2 * 30 \text{ mm} = 300 \text{ mm}$$

Damit ergibt sich  $\sigma_{0,z,Ed}$  im Abstand von 30 Millimeter unterhalb der Obergurtunterkante des Trägers zu:

$$\sigma_{0,z,Ed} = \frac{400 \text{ kN}}{30,0 \text{ cm} * 1,4 \text{ cm}} = 9,52 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 95,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

## 2.4.2 Berechnung der Dehnungen

### 2.4.2.1 Allgemein

Um die Spannungen in Dehnungen umzurechnen, wurden zwei verschiedene Varianten verwendet.

- Bei der ersten Variante D1 wurde aus dem Hook'schen Gesetz, ohne Berücksichtigung der Querdehnung, die Dehnung in z-Richtung berechnet ( $\sigma_z$  entspricht hierbei  $\sigma_{0,z,Ed}$ ).

$$\sigma_z = E * \varepsilon \rightarrow \varepsilon_{z,1} = \frac{\sigma_z}{E}$$

- Bei der zweiten Variante D2 wurde die Querdehnung sehr wohl berücksichtigt. Dabei wurde die Querdehnzahl von  $\nu = 0,3$  verwendet. Der Wert  $\sigma_z$  wurde dabei aus der obenstehenden Normberechnung verwendet und der Wert der Längsnormalspannung  $\sigma_x$  wurde händisch berechnet. Die Formel für diese Variante lautet:

$$\varepsilon_{z,2} = \frac{1}{E} * (\sigma_z - \nu * \sigma_x)$$

Auch diese Berechnungen sollen hier plakativ für das System LP I und ohne Exzentrizität geführt werden. Aus dem Kapitel 2.4.1 kann der Wert für die Spannung in z-Richtung übernommen werden:

$$\sigma_{0,z,Ed} = 95,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Mit diesem Wert und einem E-Modul für Stahl von 210.000 N/mm<sup>2</sup> kann man bereits die Dehnung für Variante D1 ausrechnen:

$$\varepsilon_{z,1} = \frac{\sigma_z}{E} = \frac{-95,2 \text{ N/mm}^2}{210.000 \text{ N/mm}^2} = -0,000453 = -0,0453 \%$$

Der Wert  $\sigma_x$ , den man für Variante D2 benötigt, wurde mittels der nachstehenden Formel berechnet:

$$\sigma_x = \frac{M_y}{W_y} = \frac{200 * 10^6 \text{ Nmm}}{-2,291808153 * 10^7 \text{ mm}^3} = -8,73 \text{ N/mm}^2$$

Mit:

- Maximales Biegemoment  $M_y$  für das System LP I (Trägerlänge  $l = 2000 \text{ mm}$ ):

$$M_y = \frac{F * l}{4} = \frac{400 \text{ kN} * 2 \text{ m}}{4} = 200 \text{ kNm}$$

- Vereinfachte Berechnung als doppeltsymmetrischer I-Querschnitt:

$$I_y = \frac{1792^3 * 14}{12} + 2 * 400 * 20 * 906^2 = 1,985 * 10^{10} \text{ mm}^4$$

$$z = \frac{h_{\text{Steg}}}{2} - 30 \text{ mm} = \frac{1792 \text{ mm}}{2} - 30 \text{ mm} = 866 \text{ mm}$$

$$W_y = \frac{I_y}{z} = \frac{1,985 * 10^{10}}{866} = 2,292 * 10^7 \text{ mm}^3$$

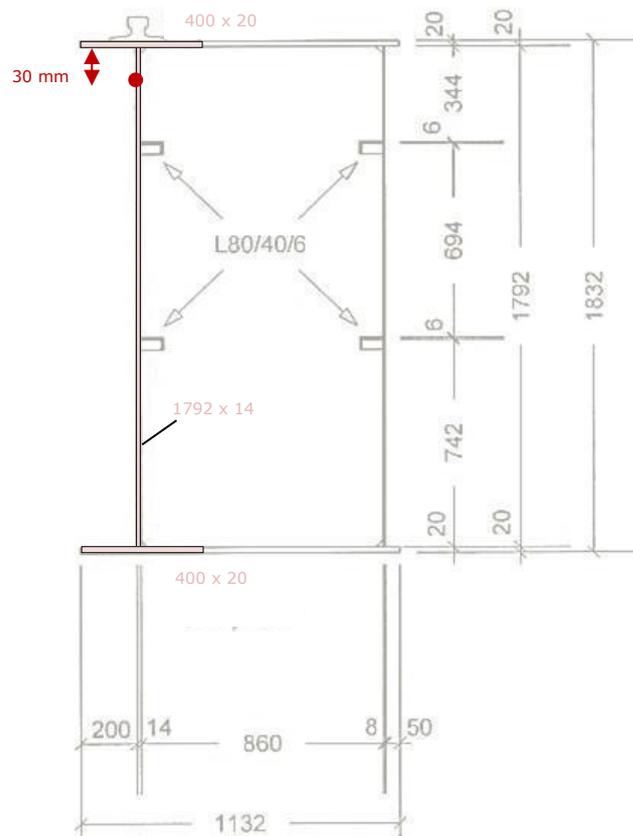


Abbildung 2.10: Maße für die Ermittlung des Flächenträgheitsmoments des Kastenprofils

Mit diesen Werten kann die Dehnung auch nach Variante D2 für System LP I berechnet werden:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{z,2} &= \frac{1}{E} * (\sigma_z - \nu * \sigma_x) = \frac{1}{210.000 \frac{N}{\text{mm}^2}} * \left( -95,2 \frac{N}{\text{mm}^2} - 0,3 * \left( -8,73 \frac{N}{\text{mm}^2} \right) \right) = -0,000441 \\ &= -0,0441\% \end{aligned}$$

Daraus ergibt sich ein Faktor  $f_{\varepsilon}$ , mit dem alle weiteren Berechnungen für Variante D2 geführt wurden:

$$\sigma_x = \frac{8,73}{95,2} * \sigma_z = 0,0917 * \sigma_z$$

Für die Berechnung der Dehnungen lautet der Faktor  $f_\varepsilon$  somit:

$$\varepsilon_{z,2} = \varepsilon_{z,1} * f_\varepsilon = \frac{1}{E} * (\sigma_z - 0,0917 * 0,3 * \sigma_z) = \frac{\sigma_z}{E} * \mathbf{0,9725}$$

Diese Werte wurden mit den Ergebnissen der Dehnungen des FE-Modells verglichen.

#### 2.4.2.2 Exkurs: Berechnung $\sigma_x$ und Faktor für das System LP II

Vergleichsweise wurde auch für das System LP II der Wert  $\sigma_x$  und der Faktor  $f_\varepsilon$  berechnet. Der Unterschied zwischen den Systemen LP I und LP II begründet sich in der Spannweite, die bei LP II vier Meter beträgt. Die genauen Abmessungen finden sich in Abbildung 1.1.

Der Wert  $\sigma_x$  wurde wiederum mittels der nachstehenden Formel berechnet:

$$\sigma_x = \frac{M_y}{W_y} = \frac{400 * 10^6 \text{ Nmm}}{-53.858.957 \text{ mm}^3} = -7,43 \text{ N/mm}^2$$

Mit:

$$M_y = \frac{F * l}{4} = \frac{400 \text{ kN} * 4 \text{ m}}{4} = 400 \text{ kNm}$$

$$I_y = 47.719.036.075 \text{ mm}^4 \quad \dots \text{ Gesamtquerschnitt (Berechnung mit Excel)}$$

Anmerkung: Durch das vorhandene Querschott direkt unter der Last ist die Aktivierung des Gesamtquerschnitts für die globale Biegebeanspruchung möglich.

$$z = \frac{h_w}{2} - 30 \text{ mm} = \frac{1792 \text{ mm}}{2} - 30 \text{ mm} = 866 \text{ mm}$$

$$W_y = \frac{I_y}{z} = \frac{47.719.036.075}{866} = 53.858.957 \text{ mm}^3$$

Mit diesen Werten kann die Dehnung auch nach Variante D2 berechnet werden:

$$\varepsilon_{z,2} = \frac{1}{E} * (\sigma_z - \nu * \sigma_x) = \frac{1}{210.000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} * \left( -95,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} - 0,3 * \left( -7,43 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right) \right) = -0,0464\%$$

Daraus ergibt sich ein Spannungsverhältnis:

$$\sigma_x = \frac{7,43}{95,2} * \sigma_z = 0,0780 * \sigma_z$$

Für die Berechnung der Dehnungen für System LP II lautet der Faktor  $f_\varepsilon$  daher:

$$\varepsilon_{z,2} = \varepsilon_{z,1} * f_\varepsilon = \frac{1}{E} * (\sigma_z - 0,0780 * 0,3 * \sigma_z) = \frac{\sigma_z}{E} * 0,9766$$

Somit liegt die Abweichung zwischen den Faktoren  $f_\varepsilon$  von LP I und LP II bei circa einem Prozent. Diese Abweichung wird im Folgenden vernachlässigt und es wird auch bei Lastposition II mit dem Faktor von LP I, also mit  $f_\varepsilon = \mathbf{0,9725}$  gerechnet.

### 2.4.3 Berechnung der Spannungen mit Exzentrizität (nach Oxfort)

Da die Kranbahnschiene im Versuch und im FEM-Modell auch exzentrisch belastet wird, wurden auch die Spannungen aus den exzentrischen Radlasten berechnet. Im Folgenden werden diese wiederum beispielhaft für die Last von 400 kN ermittelt.

Zuerst wird das Torsionsmoment berechnet:

$$T_{Ed} = F_{z,Ed} * e_y \quad \dots \quad \text{Torsionsmoment}$$

Anmerkung: dabei muss laut Norm  $e_y \geq 0,5 * t_w$  sein;

hier ist  $e_y$  in den Versuchen 10 mm bzw. 20 mm bzw. 30 mm;

$$t_w = 14 \text{ mm, daraus folgt also: } e_y \geq 0,5 * 14 \text{ mm} = 7 \text{ mm} \quad \checkmark$$

$$T_{Ed,10\text{mm}} = 400 \text{ kN} * 1 \text{ cm} = 400 \text{ kNcm}$$

$$T_{Ed,20\text{mm}} = 400 \text{ kN} * 2 \text{ cm} = 800 \text{ kNcm}$$

$$T_{Ed,30\text{mm}} = 400 \text{ kN} * 3 \text{ cm} = 1200 \text{ kNcm}$$

Hier werden noch einmal die geometrischen Eingangswerte aufgelistet:

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| $t_w = 14 \text{ mm}$             | ... Stegdicke  |
| $a = 2000 \text{ mm}$             | ... Abstand der Quersteifen im Steg                              |
| $h_{w,LP I} = 344 \text{ mm}$     | ... Steghöhe oberhalb der ersten Längssteife (für System LP I)   |
| $h_{w,LP III} = 1792 \text{ mm}$  | ... Gesamthöhe des Stegs (für System LP III)                     |
| $b_f = 860 \text{ mm}$            | ... Flanschbreite (Breite zwischen den Stegen des Kastenprofils) |
| $I_{T(A75)} = 309,5 \text{ cm}^4$ | ... Torsionsträgheitsmoment der Schiene aus Tabelle 2.3          |

Nachfolgend sind die Berechnungen für das System LP I, also dem Kastenträger mit Längssteifen im Steg (somit gilt  $h_{w,LP I} = 344 \text{ mm}$ ), für die drei verschiedenen Exzentrizitäten aufgelistet:

**LP I e=10mm** nicht abgenutzte, nominelle Schiene

| EINGANGSWERTE  |         |
|----------------|---------|
| a              | 200,0   |
| $h_w$          | 34,4    |
| $t_{S,Profil}$ | 1,4     |
| v              | 0,3     |
| G              | 8100,0  |
| $I_{T,G^*}$    | 309,5   |
| $\pi$          | 3,14    |
| E              | 21000,0 |

... Abstand der Quersteifen im Steg [cm]  
 ... Höhe des Stegs bzw. bis zur Längssteife [cm]  
 ... Stegdicke [cm]  
 ... Querdehnzahl [-]  
 ... Schubmodul [kN/cm<sup>2</sup>]  
 ... Torsionsträgheitsmoment [cm<sup>4</sup>]  
 [-]  
 [kN/cm<sup>2</sup>]

| ERGEBNISSE        |             |
|-------------------|-------------|
| $h^*$             | 33,10       |
| $m_d$             | 478,20      |
| $\lambda$         | 0,01        |
| $\varphi_m$       | 0,00        |
| $b^*$             | 69,43       |
| $m_d^*$           | 1142,93     |
| $\lambda^*$       | 0,02        |
| $\sigma_{T,Ed}^*$ | <b>5,32</b> |

[kN/cm<sup>2</sup>]

|          |       |
|----------|-------|
| $T_{Ed}$ | 400,0 |
| $b_f$    | 86,0  |
| $t_{f1}$ | 2,0   |

[kNcm]  
 ... Flanscbreite[cm]  
 ... Flanschdicke [cm]

**LP I e=20mm** nicht abgenutzte, nominelle Schiene

| EINGANGSWERTE  |         |
|----------------|---------|
| a              | 200,0   |
| $h_w$          | 34,4    |
| $t_{S,Profil}$ | 1,4     |
| v              | 0,3     |
| G              | 8100,0  |
| $I_{T,G^*}$    | 309,5   |
| $\pi$          | 3,14    |
| E              | 21000,0 |

... Abstand der Quersteifen im Steg [cm]  
 ... Höhe des Stegs bzw. bis zur Längssteife [cm]  
 ... Stegdicke [cm]  
 ... Querdehnzahl [-]  
 ... Schubmodul [kN/cm<sup>2</sup>]  
 ... Torsionsträgheitsmoment [cm<sup>4</sup>]  
 [-]  
 [kN/cm<sup>2</sup>]

| ERGEBNISSE        |              |
|-------------------|--------------|
| $h^*$             | 33,10        |
| $m_d$             | 478,20       |
| $\lambda$         | 0,01         |
| $\varphi_m$       | 0,01         |
| $b^*$             | 69,43        |
| $m_d^*$           | 1142,93      |
| $\lambda^*$       | 0,02         |
| $\sigma_{T,Ed}^*$ | <b>10,64</b> |

[kN/cm<sup>2</sup>]

|          |       |
|----------|-------|
| $T_{Ed}$ | 800,0 |
| $b_f$    | 86,0  |
| $t_{f1}$ | 2,0   |

[kNcm]  
 ... Flanscbreite[cm]  
 ... Flanschdicke [cm]

**LP I e=30mm** nicht abgenutzte, nominelle Schiene

**EINGANGSWERTE**

|                       |         |  |
|-----------------------|---------|--|
| a                     | 200,0   | ... Abstand der Quersteifen im Steg [cm]         |
| h <sub>w</sub>        | 34,4    | ... Höhe des Stegs bzw. bis zur Längssteife [cm] |
| t <sub>S,Profil</sub> | 1,4     | ... Stegdicke [cm]                               |
| v                     | 0,3     | ... Querdehnzahl [-]                             |
| G                     | 8100,0  | ... Schubmodul [kN/cm <sup>2</sup> ]             |
| I <sub>T,G*</sub>     | 309,5   | ... Torsionsträgheitsmoment [cm <sup>4</sup> ]   |
| π                     | 3,14    | [-]  |
| E                     | 21000,0 | [kN/cm <sup>2</sup> ]                            |

**ERGEBNISSE**

|                          |              |                            |
|--------------------------|--------------|----------------------------|
| h*                       | 33,10        |                            |
| md                       | 478,20       |                            |
| λ                        | 0,01         |                            |
| φ <sub>m</sub>           | 0,01         |                            |
| b*                       | 69,43        |                            |
| md*                      | 1142,93      |                            |
| λ*                       | 0,02         |                            |
| <b>σ<sub>T,Ed*</sub></b> | <b>15,96</b> | <b>[kN/cm<sup>2</sup>]</b> |

|                 |        |                       |
|-----------------|--------|-----------------------|
| T <sub>Ed</sub> | 1200,0 | [kNcm]                |
| b <sub>f</sub>  | 86,0   | ... Flanscbreite[cm]  |
| t <sub>f1</sub> | 2,0    | ... Flanschdicke [cm] |

Daraus ergeben sich nun folgende Gesamtspannungen für den Träger mit der nicht abgenutzten Schiene bei System LP I:

|                          |  |
|--------------------------|--|
| σ <sub>ges,Ed,0</sub>    | = 95,2 N/mm <sup>2</sup>   |
| σ <sub>ges,Ed,10mm</sub> | = 95,2 N/mm <sup>2</sup> + 53,2 N/mm <sup>2</sup> = 148,4 N/mm <sup>2</sup>  |
| σ <sub>ges,Ed,20mm</sub> | = 95,2 N/mm <sup>2</sup> + 106,4 N/mm <sup>2</sup> = 201,6 N/mm <sup>2</sup> |
| σ <sub>ges,Ed,30mm</sub> | = 95,2 N/mm <sup>2</sup> + 159,6 N/mm <sup>2</sup> = 254,8 N/mm <sup>2</sup> |

Nachfolgend sind die Berechnungen für das System LP III, also ohne Längssteifen im Steg (somit gilt h<sub>w,LP III</sub> = 1792 mm), für die drei verschiedenen Exzentrizitäten aufgelistet:

**LP III e=10mm** nicht abgenutzte, nominelle Schiene

**EINGANGSWERTE**

|                       |         |  |
|-----------------------|---------|--|
| a                     | 200,0   | ... Abstand der Quersteifen im Steg [cm]         |
| h <sub>w</sub>        | 179,2   | ... Höhe des Stegs bzw. bis zur Längssteife [cm] |
| t <sub>S,Profil</sub> | 1,4     | ... Stegdicke [cm]                               |
| v                     | 0,3     | ... Querdehnzahl [-]                             |
| G                     | 8100,0  | ... Schubmodul [kN/cm <sup>2</sup> ]             |
| I <sub>T,G*</sub>     | 309,5   | ... Torsionsträgheitsmoment [cm <sup>4</sup> ]   |
| π                     | 3,14    | [-]  |
| E                     | 21000,0 | [kN/cm <sup>2</sup> ]                            |

**ERGEBNISSE**

|                          |             |                            |
|--------------------------|-------------|----------------------------|
| h*                       | 92,27       |                            |
| md                       | 171,58      |                            |
| λ                        | 0,01        |                            |
| φ <sub>m</sub>           | 0,00        |                            |
| b*                       | 69,43       |                            |
| md*                      | 836,31      |                            |
| λ*                       | 0,02        |                            |
| <b>σ<sub>T,Ed*</sub></b> | <b>2,18</b> | <b>[kN/cm<sup>2</sup>]</b> |

|                 |       |                       |
|-----------------|-------|-----------------------|
| T <sub>Ed</sub> | 400,0 | [kNcm]                |
| b <sub>f</sub>  | 86,0  | ... Flanscbreite[cm]  |
| t <sub>f1</sub> | 2,0   | ... Flanschdicke [cm] |

**LP III e=20mm** nicht abgenutzte, nominelle Schiene

| EINGANGSWERTE         |         |  | ERGEBNISSE               |                                 |
|-----------------------|---------|--|--------------------------|---------------------------------|
| a                     | 200,0   | ... Abstand der Quersteifen im Steg [cm]         | h*                       | 92,27                           |
| h <sub>w</sub>        | 179,2   | ... Höhe des Stegs bzw. bis zur Längssteife [cm] | m <sub>d</sub>           | 171,58                          |
| t <sub>S,Profil</sub> | 1,4     | ... Stegdicke [cm]                               | λ                        | 0,01                            |
| v                     | 0,3     | ... Querdehnzahl [-]                             | φ <sub>m</sub>           | 0,01                            |
| G                     | 8100,0  | ... Schubmodul [kN/cm <sup>2</sup> ]             | b*                       | 69,43                           |
| I <sub>T,G*</sub>     | 309,5   | ... Torsionsträgheitsmoment [cm <sup>4</sup> ]   | m <sub>d</sub> *         | 836,31                          |
| π                     | 3,14    | [-]  | λ*                       | 0,02                            |
| E                     | 21000,0 | [kN/cm <sup>2</sup> ]                            | <b>σ<sub>T,Ed</sub>*</b> | <b>4,36 [kN/cm<sup>2</sup>]</b> |

|                 |       |                       |
|-----------------|-------|-----------------------|
| T <sub>Ed</sub> | 800,0 | [kNcm]                |
| b <sub>f</sub>  | 86,0  | ... Flanschbreite[cm] |
| t <sub>f1</sub> | 2,0   | ... Flanschdicke [cm] |

**LP III e=30mm** nicht abgenutzte, nominelle Schiene

| EINGANGSWERTE         |         |  | ERGEBNISSE               |                                 |
|-----------------------|---------|--|--------------------------|---------------------------------|
| a                     | 200,0   | ... Abstand der Quersteifen im Steg [cm]         | h*                       | 92,27                           |
| h <sub>w</sub>        | 179,2   | ... Höhe des Stegs bzw. bis zur Längssteife [cm] | m <sub>d</sub>           | 171,58                          |
| t <sub>S,Profil</sub> | 1,4     | ... Stegdicke [cm]                               | λ                        | 0,01                            |
| v                     | 0,3     | ... Querdehnzahl [-]                             | φ <sub>m</sub>           | 0,01                            |
| G                     | 8100,0  | ... Schubmodul [kN/cm <sup>2</sup> ]             | b*                       | 69,43                           |
| I <sub>T,G*</sub>     | 309,5   | ... Torsionsträgheitsmoment [cm <sup>4</sup> ]   | m <sub>d</sub> *         | 836,31                          |
| π                     | 3,14    | [-]  | λ*                       | 0,02                            |
| E                     | 21000,0 | [kN/cm <sup>2</sup> ]                            | <b>σ<sub>T,Ed</sub>*</b> | <b>6,53 [kN/cm<sup>2</sup>]</b> |

|                 |        |                       |
|-----------------|--------|-----------------------|
| T <sub>Ed</sub> | 1200,0 | [kNcm]                |
| b <sub>f</sub>  | 86,0   | ... Flanschbreite[cm] |
| t <sub>f1</sub> | 2,0    | ... Flanschdicke [cm] |

Daraus ergeben sich nun folgende Gesamtspannungen für den Träger mit der nicht abgenutzten Schiene bei System LP III:

$$\sigma_{ges,Ed,0} = 95,2 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{ges,Ed,10mm} = 95,2 \text{ N/mm}^2 + 21,8 \text{ N/mm}^2 = 117,0 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{ges,Ed,20mm} = 95,2 \text{ N/mm}^2 + 43,6 \text{ N/mm}^2 = 138,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{ges,Ed,30mm} = 95,2 \text{ N/mm}^2 + 65,3 \text{ N/mm}^2 = 160,5 \text{ N/mm}^2$$

## 2.5 Berechnungsbeispiel Variante 2: Schiene mit 25 % Abnutzung

In diesem Unterkapitel werden die Spannungen und Dehnungen für die Schiene mit der nominellen Abnutzung berechnet, wie es die Norm für ULS-Nachweise vorsieht.

### 2.5.1 Berechnung der Spannungen ohne Exzentrizität (EC0)

Hierbei wird plakativ die Berechnung für das System LP I und für eine Last von 400 kN geführt.

$$\sigma_{o,z,Ed} = \frac{F_{z,Ed}}{l_{eff} * t_w}$$

Dabei ist nun:

$F_{z,Ed} = 400 \text{ kN}$  ... der Bemessungswert der Radlast

$t_w = 14 \text{ mm}$  ... die Dicke des Stegblechs

Die effektive Lastausbreitungslänge  $l_{eff}$  wurde mit folgender Formel berechnet:

$$l_{eff} = 3,25 * ((I_r + I_{f,eff}) / t_w)^{\frac{1}{3}}$$

$$l_{eff} = 3,25 * (420,5 / 1,4)^{\frac{1}{3}} * 10 = 218 \text{ mm}$$

Die Bezeichnung  $(I_r + I_{f,eff})$  steht für das Flächenträgheitsmoment zweiten Grades um die horizontale Achse und setzt sich aus einem Anteil für die Schiene und einem für den Flansch zusammen. Damit das Flächenträgheitsmoment für den Flansch berechnet werden konnte, musste eine effektive Breite ermittelt werden.

$$b_{eff} = b_{fr} + h_r + t_f = 200 \text{ mm} + 77 \text{ mm} + 20 \text{ mm} = 297 \text{ mm} \leq b = 1000 \text{ mm} \quad \checkmark$$

$$I_{f,eff} = \frac{29,7 \text{ cm} * 2^3 \text{ cm}}{12} = 19,80 \text{ cm}^4$$

$$I_{y,Schiene} = I_r = 400,7 \text{ cm}^4 \quad \dots \text{ siehe Tabelle 2.3}$$

Anmerkung: Die Berechnung wurde mit der nominell abgenutzten Schiene, so wie es die Norm vorschreibt, durchgeführt.

Daraus ergibt sich nun ein  $(I_r + I_{f,eff})$  von  $420,5 \text{ cm}^4$ .

Mit diesem Ergebnis kann man nun die Länge  $l_{eff}$  berechnen (siehe oben).

Da die Spannung aber nicht an der Unterkante des Obergurts, sondern 30 Millimeter unterhalb benötigt wird, muss die Lastausbreitungslänge neu berechnet werden (siehe auch Abbildung 2.2).

$$l_{eff,z=30} = l_{eff} + 2 * z = 218 \text{ mm} + 2 * 30 \text{ mm} = 278 \text{ mm}$$

Damit ergibt sich das  $\sigma_{0,z,Ed}$  zu:

$$\sigma_{0,z,Ed} = \frac{400 \text{ kN}}{27,8 \text{ cm} * 1,4 \text{ cm}} = 10,28 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 102,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

## 2.5.2 Berechnung der Dehnungen

Um die Spannungen in Dehnungen umzurechnen, wurden zwei verschiedene Methoden verwendet.

- Bei der Variante D1 wurde aus dem Hook'schen Gesetz, ohne Berücksichtigung der Querdehnung, die Dehnung in z-Richtung berechnet.

$$\sigma = E * \varepsilon \rightarrow \varepsilon_{z,1} = \frac{\sigma_z}{E}$$

- Bei der Variante D2 wurde die Querdehnung berücksichtigt. Dabei wurde die Querdehnzahl von  $\nu = 0,3$  verwendet. Der Wert  $\sigma_z$  wurde dabei aus der Norm (siehe obenstehende Berechnung) verwendet und der Wert  $\sigma_x$  wurde angepasst an die Versuchskonfiguration händisch berechnet. Die Formel für die Variante D2 lautet:

$$\varepsilon_{z,2} = \frac{1}{E} * (\sigma_z - \nu * \sigma_x)$$

Auch diese Berechnungen sollen hier plakativ für das System LP I und ohne Exzentrizität geführt werden. Aus dem Kapitel 2.5.1 kann der Wert für die Spannung in z-Richtung übernommen werden:

$$\sigma_{0,z,Ed} = 102,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Mit diesem Wert und einem E-Modul für Stahl von 210.000 N/mm<sup>2</sup> kann man die Dehnung für Variante D1 ausrechnen:

$$\varepsilon_{z,1} = \frac{\sigma_z}{E} = \frac{-102,8 \text{ N/mm}^2}{210.000 \text{ N/mm}^2} = -0,00049 = -0,049 \%$$

Wie bereits in Kapitel 2.4.2 hergeleitet, wurde ein Faktor  $f_\varepsilon$  für die Umrechnung der Spannungen zu den Dehnungen verwendet. Nachfolgend befindet sich nun das Ergebnis der Dehnungen nach Variante D2:

$$\varepsilon_{z,2} = \frac{1}{210.000} * (-102,8) * \mathbf{0,9725} = 0,000476 = 0,0476 \%$$

### 2.5.3 Berechnung der Spannungen mit Exzentrizität (nach Oxfort)

Da die Kranbahnschiene im Versuch und im FEM-Modell auch exzentrisch belastet wird, wurden auch die Spannungen aus den exzentrischen Radlasten berechnet. Im Folgenden werden diese wiederum beispielhaft für die Last von 400 kN ermittelt.

Zuerst wird das Torsionsmoment berechnet:

$$T_{Ed} = F_{z,Ed} * e_y \quad \dots \quad \text{Torsionsmoment}$$

Anmerkung: dabei muss laut Norm  $e_y \geq 0,5 * t_w$  sein;

hier ist  $e_y$  in den Versuchen 10 mm bzw. 20 mm bzw. 30 mm;

$$t_w = 14 \text{ mm, daraus folgt also: } e_y \geq 0,5 * 14 \text{ mm} = 7 \text{ mm} \quad \checkmark$$

$$T_{Ed,10\text{mm}} = 400 \text{ kN} * 1 \text{ cm} = 400 \text{ kNcm}$$

$$T_{Ed,20\text{mm}} = 400 \text{ kN} * 2 \text{ cm} = 800 \text{ kNcm}$$

$$T_{Ed,30\text{mm}} = 400 \text{ kN} * 3 \text{ cm} = 1200 \text{ kNcm}$$

Hier werden noch einmal die geometrischen Eingangswerte aufgelistet:

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| $t_w = 14 \text{ mm}$               | ... Stegdicke  |
| $a = 2000 \text{ mm}$               | ... Abstand der Quersteifen im Steg                              |
| $h_{w,LP I} = 344 \text{ mm}$       | ... Steghöhe oberhalb der ersten Längssteife (für System LP I)   |
| $h_{w,LP III} = 1792 \text{ mm}$    | ... Gesamthöhe des Stegs (für System LP III)                     |
| $b_f = 860 \text{ mm}$              | ... Flanschbreite (Breite zwischen den Stegen des Kastenprofils) |
| $I_{T(25 \%)} = 242,6 \text{ cm}^4$ | ... Torsionsträgheitsmoment der Schiene aus Tabelle 2.3          |

Nachfolgend sind die Berechnungen für System LP I, also mit Längssteifen im Steg (somit gilt  $h_{w,LP I} = 344 \text{ mm}$ ), für die drei verschiedenen Exzentrizitäten aufgelistet:

**LP I e=10mm** Schiene mit 25 % Abnutzung

| EINGANGSWERTE         |         |
|-----------------------|---------|
| a                     | 200,0   |
| h <sub>w</sub>        | 34,4    |
| t <sub>s,Profil</sub> | 1,4     |
| v                     | 0,3     |
| G                     | 8100,0  |
| I <sub>T,G*</sub>     | 242,6   |
| Π                     | 3,14    |
| E                     | 21000,0 |

... Abstand der Quersteifen im Steg [cm]  
 ... Höhe des Stegs bzw. bis zur Längssteife [cm]  
 ... Stegdicke [cm]  
 ... Querdehnzahl [-]  
 ... Schubmodul [kN/cm<sup>2</sup>]  
 ... Torsionsträgheitsmoment [cm<sup>4</sup>]  
 [-]  
 [kN/cm<sup>2</sup>]

| ERGEBNISSE               |             |
|--------------------------|-------------|
| h*                       | 33,10       |
| m <sub>d</sub>           | 478,20      |
| λ                        | 0,02        |
| φ <sub>m</sub>           | 0,00        |
| b*                       | 69,43       |
| m <sub>d</sub> *         | 1142,93     |
| λ*                       | 0,02        |
| <b>σ<sub>T,Ed*</sub></b> | <b>6,08</b> |

**[kN/cm<sup>2</sup>]**

|                 |       |
|-----------------|-------|
| T <sub>Ed</sub> | 400,0 |
| b <sub>f</sub>  | 86,0  |
| t <sub>f1</sub> | 2,0   |

[kNcm]  
 ... Flanschbreite[cm]  
 ... Flanschdicke [cm]

**LP I e=20mm** Schiene mit 25 % Abnutzung

| EINGANGSWERTE         |         |
|-----------------------|---------|
| a                     | 200,0   |
| h <sub>w</sub>        | 34,4    |
| t <sub>s,Profil</sub> | 1,4     |
| v                     | 0,3     |
| G                     | 8100,0  |
| I <sub>T,G*</sub>     | 242,6   |
| Π                     | 3,14    |
| E                     | 21000,0 |

... Abstand der Quersteifen im Steg [cm]  
 ... Höhe des Stegs bzw. bis zur Längssteife [cm]  
 ... Stegdicke [cm]  
 ... Querdehnzahl [-]  
 ... Schubmodul [kN/cm<sup>2</sup>]  
 ... Torsionsträgheitsmoment [cm<sup>4</sup>]  
 [-]  
 [kN/cm<sup>2</sup>]

| ERGEBNISSE               |              |
|--------------------------|--------------|
| h*                       | 33,10        |
| m <sub>d</sub>           | 478,20       |
| λ                        | 0,02         |
| φ <sub>m</sub>           | 0,01         |
| b*                       | 69,43        |
| m <sub>d</sub> *         | 1142,93      |
| λ*                       | 0,02         |
| <b>σ<sub>T,Ed*</sub></b> | <b>12,16</b> |

**[kN/cm<sup>2</sup>]**

|                 |       |
|-----------------|-------|
| T <sub>Ed</sub> | 800,0 |
| b <sub>f</sub>  | 86,0  |
| t <sub>f1</sub> | 2,0   |

[kNcm]  
 ... Flanschbreite[cm]  
 ... Flanschdicke [cm]

**LP I e=30mm** **Schiene mit 25 % Abnutzung**

| EINGANGSWERTE         |         |
|-----------------------|---------|
| a                     | 200,0   |
| h <sub>w</sub>        | 34,4    |
| t <sub>S,Profil</sub> | 1,4     |
| v                     | 0,3     |
| G                     | 8100,0  |
| I <sub>T,G*</sub>     | 242,6   |
| π                     | 3,14    |
| E                     | 21000,0 |

... Abstand der Quersteifen im Steg [cm]  
 ... Höhe des Stegs bzw. bis zur Längssteife [cm]  
 ... Stegdicke [cm]  
 ... Querdehnzahl [-]  
 ... Schubmodul [kN/cm<sup>2</sup>]  
 ... Torsionsträgheitsmoment [cm<sup>4</sup>]  
 [-]  
 [kN/cm<sup>2</sup>]

| ERGEBNISSE               |              |
|--------------------------|--------------|
| h*                       | 33,10        |
| m <sub>d</sub>           | 478,20       |
| λ                        | 0,02         |
| φ <sub>m</sub>           | 0,01         |
| b*                       | 69,43        |
| m <sub>d</sub> *         | 1142,93      |
| λ*                       | 0,02         |
| <b>σ<sub>T,Ed</sub>*</b> | <b>18,24</b> |

**[kN/cm<sup>2</sup>]**

|                 |        |
|-----------------|--------|
| T <sub>Ed</sub> | 1200,0 |
| b <sub>f</sub>  | 86,0   |
| t <sub>f1</sub> | 2,0    |

[kNcm]  
 ... Flanschbreite[cm]  
 ... Flanschdicke [cm]

Daraus ergeben sich nun folgende Gesamtspannungen für den Träger mit der Schiene mit 25 % Abnutzung bei System LP I:

|                          |   |
|--------------------------|---|
| σ <sub>ges,Ed,0</sub>    | = 102,8 N/mm <sup>2</sup>   |
| σ <sub>ges,Ed,10mm</sub> | = 102,8 N/mm <sup>2</sup> + 60,8 N/mm <sup>2</sup> = 163,6 N/mm <sup>2</sup>  |
| σ <sub>ges,Ed,20mm</sub> | = 102,8 N/mm <sup>2</sup> + 121,6 N/mm <sup>2</sup> = 224,4 N/mm <sup>2</sup> |
| σ <sub>ges,Ed,30mm</sub> | = 102,8 N/mm <sup>2</sup> + 182,4 N/mm <sup>2</sup> = 285,2 N/mm <sup>2</sup> |

Nachfolgend sind die Berechnungen für System LP III, also ohne Längssteifen im Steg (somit gilt h<sub>w,LP III</sub> = 1792 mm), für die drei verschiedenen Exzentrizitäten aufgelistet:

**LP III e=10mm** **Schiene mit 25 % Abnutzung**

| EINGANGSWERTE         |         |
|-----------------------|---------|
| a                     | 200,0   |
| h <sub>w</sub>        | 179,2   |
| t <sub>S,Profil</sub> | 1,4     |
| v                     | 0,3     |
| G                     | 8100,0  |
| I <sub>T,G*</sub>     | 242,6   |
| π                     | 3,14    |
| E                     | 21000,0 |

... Abstand der Quersteifen im Steg [cm]  
 ... Höhe des Stegs bzw. bis zur Längssteife [cm]  
 ... Stegdicke [cm]  
 ... Querdehnzahl [-]  
 ... Schubmodul [kN/cm<sup>2</sup>]  
 ... Torsionsträgheitsmoment [cm<sup>4</sup>]  
 [-]  
 [kN/cm<sup>2</sup>]

| ERGEBNISSE               |             |
|--------------------------|-------------|
| h*                       | 92,27       |
| m <sub>d</sub>           | 171,58      |
| λ                        | 0,01        |
| φ <sub>m</sub>           | 0,00        |
| b*                       | 69,43       |
| m <sub>d</sub> *         | 836,31      |
| λ*                       | 0,02        |
| <b>σ<sub>T,Ed</sub>*</b> | <b>2,51</b> |

**[kN/cm<sup>2</sup>]**

|                 |       |
|-----------------|-------|
| T <sub>Ed</sub> | 400,0 |
| b <sub>f</sub>  | 86,0  |
| t <sub>f1</sub> | 2,0   |

[kNcm]  
 ... Flanschbreite[cm]  
 ... Flanschdicke [cm]

**LP III e=20mm** **Schiene mit 25 % Abnutzung**

| EINGANGSWERTE         |         |  | ERGEBNISSE               |                                 |
|-----------------------|---------|--|--------------------------|---------------------------------|
| a                     | 200,0   | ... Abstand der Quersteifen im Steg [cm]         | h*                       | 92,27                           |
| h <sub>w</sub>        | 179,2   | ... Höhe des Stegs bzw. bis zur Längssteife [cm] | m <sub>d</sub>           | 171,58                          |
| t <sub>S,Profil</sub> | 1,4     | ... Stegdicke [cm]                               | λ                        | 0,01                            |
| v                     | 0,3     | ... Querdehnzahl [-]                             | φ <sub>m</sub>           | 0,01                            |
| G                     | 8100,0  | ... Schubmodul [kN/cm <sup>2</sup> ]             | b*                       | 69,43                           |
| I <sub>T,G*</sub>     | 242,6   | ... Torsionsträgheitsmoment [cm <sup>4</sup> ]   | m <sub>d</sub> *         | 836,31                          |
| Π                     | 3,14    | [-]  | λ*                       | 0,02                            |
| E                     | 21000,0 | [kN/cm <sup>2</sup> ]                            | <b>σ<sub>T,Ed</sub>*</b> | <b>5,02 [kN/cm<sup>2</sup>]</b> |

|                 |       |                       |
|-----------------|-------|-----------------------|
| T <sub>Ed</sub> | 800,0 | [kNcm]                |
| b <sub>f</sub>  | 86,0  | ... Flanschbreite[cm] |
| t <sub>f1</sub> | 2,0   | ... Flanschdicke [cm] |

**LP III e=30mm** **Schiene mit 25 % Abnutzung**

| EINGANGSWERTE         |         |  | ERGEBNISSE               |                                 |
|-----------------------|---------|--|--------------------------|---------------------------------|
| a                     | 200,0   | ... Abstand der Quersteifen im Steg [cm]         | h*                       | 92,27                           |
| h <sub>w</sub>        | 179,2   | ... Höhe des Stegs bzw. bis zur Längssteife [cm] | m <sub>d</sub>           | 171,58                          |
| t <sub>S,Profil</sub> | 1,4     | ... Stegdicke [cm]                               | λ                        | 0,01                            |
| v                     | 0,3     | ... Querdehnzahl [-]                             | φ <sub>m</sub>           | 0,01                            |
| G                     | 8100,0  | ... Schubmodul [kN/cm <sup>2</sup> ]             | b*                       | 69,43                           |
| I <sub>T,G*</sub>     | 242,6   | ... Torsionsträgheitsmoment [cm <sup>4</sup> ]   | m <sub>d</sub> *         | 836,31                          |
| Π                     | 3,14    | [-]  | λ*                       | 0,02                            |
| E                     | 21000,0 | [kN/cm <sup>2</sup> ]                            | <b>σ<sub>T,Ed</sub>*</b> | <b>7,53 [kN/cm<sup>2</sup>]</b> |

|                 |        |                       |
|-----------------|--------|-----------------------|
| T <sub>Ed</sub> | 1200,0 | [kNcm]                |
| b <sub>f</sub>  | 86,0   | ... Flanschbreite[cm] |
| t <sub>f1</sub> | 2,0    | ... Flanschdicke [cm] |

Daraus ergeben sich nun folgende Gesamtspannungen für den Träger mit der Schiene mit 25 % Abnutzung bei System LP III:

|                          |  |
|--------------------------|--|
| σ <sub>ges,Ed,0</sub>    | = 102,8 N/mm <sup>2</sup>  |
| σ <sub>ges,Ed,10mm</sub> | = 102,8 N/mm <sup>2</sup> + 25,1 N/mm <sup>2</sup> = 127,9 N/mm <sup>2</sup> |
| σ <sub>ges,Ed,20mm</sub> | = 102,8 N/mm <sup>2</sup> + 50,2 N/mm <sup>2</sup> = 153,0 N/mm <sup>2</sup> |
| σ <sub>ges,Ed,30mm</sub> | = 102,8 N/mm <sup>2</sup> + 75,3 N/mm <sup>2</sup> = 178,1 N/mm <sup>2</sup> |

## 2.6 Berechnungsbeispiel Variante 3: Schiene mit gemessener Abnutzung von ca. 12,5 %

In diesem Unterkapitel werden die Spannungen und Dehnungen für die reale Schiene berechnet. Wie bereits oben erläutert, werden die Querschnittswerte der abgenutzten Schiene aus dem Paper Kraus et al [5] verwendet. Im Folgenden wird ein Einblick in die Berechnung gegeben, um das Verständnis und der Nachvollziehbarkeit der Vergleiche zu verbessern.

### 2.6.1 Berechnung der Spannungen ohne Exzentrizität (EC0)

Hierbei wird plakativ die Berechnung für System LP I und für eine Last von 400 kN geführt.

$$\sigma_{o,z,Ed} = \frac{F_{z,Ed}}{l_{eff} * t_w}$$

Dabei ist nun:

$F_{z,Ed} = 400 \text{ kN}$  ... der Bemessungswert der Radlast

$t_w = 14 \text{ mm}$  ... die Dicke des Stegblechs

Die effektive Lastausbreitungslänge  $l_{eff}$  wurde mit folgender Formel berechnet:

$$l_{eff} = 3,25 * ((I_r + I_{f,eff}) / t_w)^{\frac{1}{3}}$$
$$l_{eff} = 3,25 * (478,8 / 1,4)^{\frac{1}{3}} * 10 = 227 \text{ mm}$$

Die Bezeichnung  $(I_r + I_{f,eff})$  steht für das Flächenträgheitsmoment zweiten Grades um die horizontale Achse und setzt sich aus einem Anteil für die Schiene und einem für den Flansch zusammen. Damit das Flächenträgheitsmoment für den Flansch berechnet werden konnte, musste eine effektive Breite ermittelt werden.

$$b_{eff} = b_{fr} + h_r + t_f = 200 \text{ mm} + 77 \text{ mm} + 20 \text{ mm} = 297 \text{ mm} \leq b = 1000 \text{ mm} \quad \checkmark$$

$$I_{f,eff} = \frac{29,7 \text{ cm} * 2^3 \text{ cm}}{12} = 19,80 \text{ cm}^4$$

$$I_{y,Schiene} = I_r = 459,0 \text{ cm}^4 \quad \dots \text{ siehe Tabelle 2.3}$$

$$\text{Daraus ergibt sich nun: } (I_r + I_{f,eff}) = 478,8 \text{ cm}^4$$

Mit diesem Ergebnis kann man nun die Länge  $l_{eff}$  berechnen (siehe oben).

Da die Spannung aber nicht an der Unterkante des Obergurts, sondern 30 Millimeter unterhalb benötigt wird, muss die Lastausbreitungslänge neu berechnet werden (siehe auch Abbildung 2.2).

$$l_{eff,z=30} = l_{eff} + 2 * z = 227 \text{ mm} + 2 * 30 \text{ mm} = 287 \text{ mm}$$

Damit ergibt sich das  $\sigma_{0,z,Ed}$  zu:

$$\sigma_{0,z,Ed} = \frac{400 \text{ kN}}{28,7 \text{ cm} * 1,4 \text{ cm}} = 9,96 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 99,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

## 2.6.2 Berechnung der Dehnungen

Um die Spannungen in Dehnungen umzurechnen, wurden zwei verschiedene Methoden verwendet.

- Bei der ersten Variante (D1) wurde aus dem Hook'schen Gesetz, ohne Berücksichtigung der Querdehnung, die Dehnung in z-Richtung berechnet.

$$\sigma = E * \varepsilon \rightarrow \varepsilon_{z,1} = \frac{\sigma_z}{E}$$

- Bei der zweiten Variante (D2) wurde die Querdehnung berücksichtigt. Dabei wurde die Querdehnzahl von  $\nu = 0,3$  verwendet. Der Wert  $\sigma_z$  wurde dabei aus der Norm (siehe obenstehende Berechnung) verwendet und der Wert  $\sigma_x$  wurde auch händisch für die zutreffende Versuchskonfiguration berechnet. Die Formel für die Variante D2 lautet:

$$\varepsilon_{z,2} = \frac{1}{E} * (\sigma_z - \nu * \sigma_x)$$

Auch diese Berechnungen sollen hier plakativ für das System LP I und ohne Exzentrizität geführt werden. Aus dem Kapitel 2.6.1 kann der Wert für die Spannung in z-Richtung übernommen werden:

$$\sigma_{0,z,Ed} = 99,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Mit diesem Wert und einem E-Modul für Stahl von 210.000 N/mm<sup>2</sup> kann man die Dehnung für Variante D1 ausrechnen:

$$\varepsilon_{z,1} = \frac{\sigma_z}{E} = \frac{-99,6 \text{ N/mm}^2}{210.000 \text{ N/mm}^2} = -0,000474 = -0,0474 \%$$

Wie bereits in Kapitel 2.4.2 hergeleitet, wurde ein Faktor  $f_\varepsilon$  für die Umrechnung der Spannungen zu den Dehnungen verwendet.

$$\varepsilon_{z,2} = \frac{1}{210.000} * (-99,6) * \mathbf{0,9725} = 0,000461 = 0,0461 \%$$

Diese Werte wurden mit den Ergebnissen der Dehnung des FE-Modells verglichen.

### 2.6.3 Berechnung der Spannungen mit Exzentrizität (nach Oxfort)

Da die Kranbahnschiene im Versuch und im FEM-Modell auch exzentrisch belastet wird, wurden auch die Spannungen aus den exzentrischen Radlasten laut Norm berechnet. Im Folgenden werden diese wiederum beispielhaft für die Last von 400 kN ermittelt.

Zuerst wird das Torsionsmoment berechnet:

$$T_{Ed} = F_{z,Ed} * e_y \quad \dots \quad \text{Torsionsmoment}$$

Anmerkung: dabei muss laut Norm  $e_y \geq 0,5 * t_w$  sein

hier ist  $e_y$  in den Versuchen 10 mm bzw. 20 mm bzw. 30 mm

$t_w = 14$  mm, daraus folgt also:  $e_y \geq 0,5 * 14$  mm = 7 mm ✓

$$T_{Ed,10\text{mm}} = 400 \text{ kN} * 1 \text{ cm} = 400 \text{ kNcm}$$

$$T_{Ed,20\text{mm}} = 400 \text{ kN} * 2 \text{ cm} = 800 \text{ kNcm}$$

$$T_{Ed,30\text{mm}} = 400 \text{ kN} * 3 \text{ cm} = 1200 \text{ kNcm}$$

Hier werden noch einmal die geometrischen Eingangswerte aufgelistet:

|  |  |
|--|--|
| $t_w = 14$ mm                            | ... Stegdicke  |
| $a = 2000$ mm                            | ... Abstand der Quersteifen im Steg                              |
| $h_{w,LP I} = 344$ mm                    | ... Steghöhe oberhalb der ersten Längssteife (für System LP I)   |
| $h_{w,LP III} = 1792$ mm                 | ... Gesamthöhe des Stegs (für System LP III)                     |
| $b_f = 860$ mm                           | ... Flanschbreite (Breite zwischen den Stegen des Kastenprofils) |
| $I_{T(12,5 \%)} = 271,3$ cm <sup>4</sup> | ... Torsionsträgheitsmoment der Schiene aus Tabelle 2.3          |

Nachfolgend sind die Berechnungen für System LP I, also mit Längssteifen im Steg (somit gilt  $h_{w,LP I} = 344 \text{ mm}$ ), für die drei verschiedenen Exzentrizitäten aufgelistet:

**LP I e=10mm** Schiene mit 12,5 % Abnutzung

| EINGANGSWERTE         |         |
|-----------------------|---------|
| a                     | 200,0   |
| h <sub>w</sub>        | 34,4    |
| t <sub>s,Profil</sub> | 1,4     |
| v                     | 0,3     |
| G                     | 8100,0  |
| I <sub>T,G*</sub>     | 271,3   |
| Π                     | 3,14    |
| E                     | 21000,0 |

... Abstand der Quersteifen im Steg [cm]  
 ... Höhe des Stegs bzw. bis zur Längssteife [cm]  
 ... Stegdicke [cm]  
 ... Querdehnzahl [-]  
 ... Schubmodul [kN/cm<sup>2</sup>]  
 ... Torsionsträgheitsmoment [cm<sup>4</sup>]  
 [-]  
 [kN/cm<sup>2</sup>]

| ERGEBNISSE               |             |
|--------------------------|-------------|
| h*                       | 33,10       |
| m <sub>d</sub>           | 478,20      |
| λ                        | 0,01        |
| φ <sub>m</sub>           | 0,00        |
| b*                       | 69,43       |
| m <sub>d</sub> *         | 1142,93     |
| λ*                       | 0,02        |
| <b>σ<sub>T,Ed*</sub></b> | <b>5,72</b> |

[kN/cm<sup>2</sup>]

|                 |       |
|-----------------|-------|
| T <sub>Ed</sub> | 400,0 |
| b <sub>f</sub>  | 86,0  |
| t <sub>f1</sub> | 2,0   |

[kNcm]  
 ... Flanschbreite[cm]  
 ... Flanschdicke [cm]

**LP I e=20mm** Schiene mit 12,5 % Abnutzung

| EINGANGSWERTE         |         |
|-----------------------|---------|
| a                     | 200,0   |
| h <sub>w</sub>        | 34,4    |
| t <sub>s,Profil</sub> | 1,4     |
| v                     | 0,3     |
| G                     | 8100,0  |
| I <sub>T,G*</sub>     | 271,3   |
| Π                     | 3,14    |
| E                     | 21000,0 |

... Abstand der Quersteifen im Steg [cm]  
 ... Höhe des Stegs bzw. bis zur Längssteife [cm]  
 ... Stegdicke [cm]  
 ... Querdehnzahl [-]  
 ... Schubmodul [kN/cm<sup>2</sup>]  
 ... Torsionsträgheitsmoment [cm<sup>4</sup>]  
 [-]  
 [kN/cm<sup>2</sup>]

| ERGEBNISSE               |              |
|--------------------------|--------------|
| h*                       | 33,10        |
| m <sub>d</sub>           | 478,20       |
| λ                        | 0,01         |
| φ <sub>m</sub>           | 0,01         |
| b*                       | 69,43        |
| m <sub>d</sub> *         | 1142,93      |
| λ*                       | 0,02         |
| <b>σ<sub>T,Ed*</sub></b> | <b>11,44</b> |

[kN/cm<sup>2</sup>]

|                 |       |
|-----------------|-------|
| T <sub>Ed</sub> | 800,0 |
| b <sub>f</sub>  | 86,0  |
| t <sub>f1</sub> | 2,0   |

[kNcm]  
 ... Flanschbreite[cm]  
 ... Flanschdicke [cm]

**LP I e=30mm** Schiene mit 12,5 % Abnutzung

**EINGANGSWERTE**

|                       |         |  |
|-----------------------|---------|--|
| a                     | 200,0   | ... Abstand der Quersteifen im Steg [cm]         |
| h <sub>w</sub>        | 34,4    | ... Höhe des Stegs bzw. bis zur Längssteife [cm] |
| t <sub>S,Profil</sub> | 1,4     | ... Stegdicke [cm]                               |
| v                     | 0,3     | ... Querdehnzahl [-]                             |
| G                     | 8100,0  | ... Schubmodul [kN/cm <sup>2</sup> ]             |
| I <sub>T,G*</sub>     | 271,3   | ... Torsionsträgheitsmoment [cm <sup>4</sup> ]   |
| π                     | 3,14    | [-]  |
| E                     | 21000,0 | [kN/cm <sup>2</sup> ]                            |

**ERGEBNISSE**

|                          |                                    |
|--------------------------|------------------------------------|
| h*                       | 33,10                              |
| m <sub>d</sub>           | 478,20                             |
| λ                        | 0,01                               |
| φ <sub>m</sub>           | 0,01                               |
| b*                       | 69,43                              |
| m <sub>d</sub> *         | 1142,93                            |
| λ*                       | 0,02                               |
| <b>σ<sub>T,Ed*</sub></b> | <b>17,16</b> [kN/cm <sup>2</sup> ] |

|                 |        |                       |
|-----------------|--------|-----------------------|
| T <sub>Ed</sub> | 1200,0 | [kNcm]                |
| b <sub>f</sub>  | 86,0   | ... Flanschbreite[cm] |
| t <sub>f1</sub> | 2,0    | ... Flanschdicke [cm] |

Daraus ergeben sich nun folgende Gesamtspannungen für den Träger mit der Schiene mit 12,5 % Abnutzung bei System LP I:

|                          |  |
|--------------------------|--|
| σ <sub>ges,Ed,0</sub>    | = 99,6 N/mm <sup>2</sup>   |
| σ <sub>ges,Ed,10mm</sub> | = 99,6 N/mm <sup>2</sup> + 57,2 N/mm <sup>2</sup> = 156,8 N/mm <sup>2</sup>  |
| σ <sub>ges,Ed,20mm</sub> | = 99,6 N/mm <sup>2</sup> + 114,4 N/mm <sup>2</sup> = 214,0 N/mm <sup>2</sup> |
| σ <sub>ges,Ed,30mm</sub> | = 99,6 N/mm <sup>2</sup> + 171,6 N/mm <sup>2</sup> = 271,2 N/mm <sup>2</sup> |

Nachfolgend sind die Berechnungen für System LP III, also ohne Längssteifen im Steg (somit gilt h<sub>w,LP III</sub> =1792 mm), für die drei verschiedenen Exzentrizitäten aufgelistet:

**LP III e=10mm** Schiene mit 12,5 % Abnutzung

**EINGANGSWERTE**

|                       |         |  |
|-----------------------|---------|--|
| a                     | 200,0   | ... Abstand der Quersteifen im Steg [cm]         |
| h <sub>w</sub>        | 179,2   | ... Höhe des Stegs bzw. bis zur Längssteife [cm] |
| t <sub>S,Profil</sub> | 1,4     | ... Stegdicke [cm]                               |
| v                     | 0,3     | ... Querdehnzahl [-]                             |
| G                     | 8100,0  | ... Schubmodul [kN/cm <sup>2</sup> ]             |
| I <sub>T,G*</sub>     | 271,3   | ... Torsionsträgheitsmoment [cm <sup>4</sup> ]   |
| π                     | 3,14    | [-]  |
| E                     | 21000,0 | [kN/cm <sup>2</sup> ]                            |

**ERGEBNISSE**

|                          |                                   |
|--------------------------|-----------------------------------|
| h*                       | 92,27                             |
| m <sub>d</sub>           | 171,58                            |
| λ                        | 0,01                              |
| φ <sub>m</sub>           | 0,00                              |
| b*                       | 69,43                             |
| m <sub>d</sub> *         | 836,31                            |
| λ*                       | 0,02                              |
| <b>σ<sub>T,Ed*</sub></b> | <b>2,35</b> [kN/cm <sup>2</sup> ] |

|                 |       |                       |
|-----------------|-------|-----------------------|
| T <sub>Ed</sub> | 400,0 | [kNcm]                |
| b <sub>f</sub>  | 86,0  | ... Flanschbreite[cm] |
| t <sub>f1</sub> | 2,0   | ... Flanschdicke [cm] |

**LP III e=20mm** Schiene mit 12,5 % Abnutzung

| EINGANGSWERTE         |         |
|-----------------------|---------|
| a                     | 200,0   |
| h <sub>w</sub>        | 179,2   |
| t <sub>S,Profil</sub> | 1,4     |
| v                     | 0,3     |
| G                     | 8100,0  |
| I <sub>T,G*</sub>     | 271,3   |
| π                     | 3,14    |
| E                     | 21000,0 |

... Abstand der Quersteifen im Steg [cm]  
 ... Höhe des Stegs bzw. bis zur Längssteife [cm]  
 ... Stegdicke [cm]  
 ... Querdehnzahl [-]  
 ... Schubmodul [kN/cm<sup>2</sup>]  
 ... Torsionsträgheitsmoment [cm<sup>4</sup>]  
 [-]  
 [kN/cm<sup>2</sup>]

| ERGEBNISSE               |             |
|--------------------------|-------------|
| h*                       | 92,27       |
| m <sub>d</sub>           | 171,58      |
| λ                        | 0,01        |
| φ <sub>m</sub>           | 0,01        |
| b*                       | 69,43       |
| m <sub>d</sub> *         | 836,31      |
| λ*                       | 0,02        |
| <b>σ<sub>T,Ed*</sub></b> | <b>4,71</b> |

[kN/cm<sup>2</sup>]

|                 |       |
|-----------------|-------|
| T <sub>Ed</sub> | 800,0 |
| b <sub>f</sub>  | 86,0  |
| t <sub>f1</sub> | 2,0   |

[kNcm]  
 ... Flanschbreite[cm]  
 ... Flanschdicke [cm]

**LP III e=30mm** Schiene mit 12,5 % Abnutzung

| EINGANGSWERTE         |         |
|-----------------------|---------|
| a                     | 200,0   |
| h <sub>w</sub>        | 179,2   |
| t <sub>S,Profil</sub> | 1,4     |
| v                     | 0,3     |
| G                     | 8100,0  |
| I <sub>T,G*</sub>     | 271,3   |
| π                     | 3,14    |
| E                     | 21000,0 |

... Abstand der Quersteifen im Steg [cm]  
 ... Höhe des Stegs bzw. bis zur Längssteife [cm]  
 ... Stegdicke [cm]  
 ... Querdehnzahl [-]  
 ... Schubmodul [kN/cm<sup>2</sup>]  
 ... Torsionsträgheitsmoment [cm<sup>4</sup>]  
 [-]  
 [kN/cm<sup>2</sup>]

| ERGEBNISSE               |             |
|--------------------------|-------------|
| h*                       | 92,27       |
| m <sub>d</sub>           | 171,58      |
| λ                        | 0,01        |
| φ <sub>m</sub>           | 0,01        |
| b*                       | 69,43       |
| m <sub>d</sub> *         | 836,31      |
| λ*                       | 0,02        |
| <b>σ<sub>T,Ed*</sub></b> | <b>7,06</b> |

[kN/cm<sup>2</sup>]

|                 |        |
|-----------------|--------|
| T <sub>Ed</sub> | 1200,0 |
| b <sub>f</sub>  | 86,0   |
| t <sub>f1</sub> | 2,0    |

[kNcm]  
 ... Flanschbreite[cm]  
 ... Flanschdicke [cm]

Daraus ergeben sich nun folgende Gesamtspannungen für den Träger mit der Schiene mit 12,5 % Abnutzung bei System LP III:

|                          |   |
|--------------------------|---|
| σ <sub>ges,Ed,0</sub>    | = 99,6 N/mm <sup>2</sup>  |
| σ <sub>ges,Ed,10mm</sub> | = 99,6 N/mm <sup>2</sup> + 23,5 N/mm <sup>2</sup> = 123,1 N/mm <sup>2</sup> |
| σ <sub>ges,Ed,20mm</sub> | = 99,6 N/mm <sup>2</sup> + 47,1 N/mm <sup>2</sup> = 146,7 N/mm <sup>2</sup> |
| σ <sub>ges,Ed,30mm</sub> | = 99,6 N/mm <sup>2</sup> + 70,6 N/mm <sup>2</sup> = 170,2 N/mm <sup>2</sup> |

### 3 Vorstudie zu den FEM-Spannungsberechnungen

In diesem Kapitel wird der Aufbau des Finite-Elemente-Modells erläutert und die Auswertung der Berechnungen angeführt. Im Anschluss kommt es zu einem Vergleich zwischen den FEM-Ergebnissen und der Norm-Berechnung, mit der unabgenutzten Schiene aus Kapitel 2.4.

In der nachfolgenden Abbildung kann man eine Darstellung der verschiedenen in dieser Masterarbeit gewählten Verfeinerungsschritte zum FEM-Modell erkennen. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Vorstudie, die im Bild blau umrahmt ist.

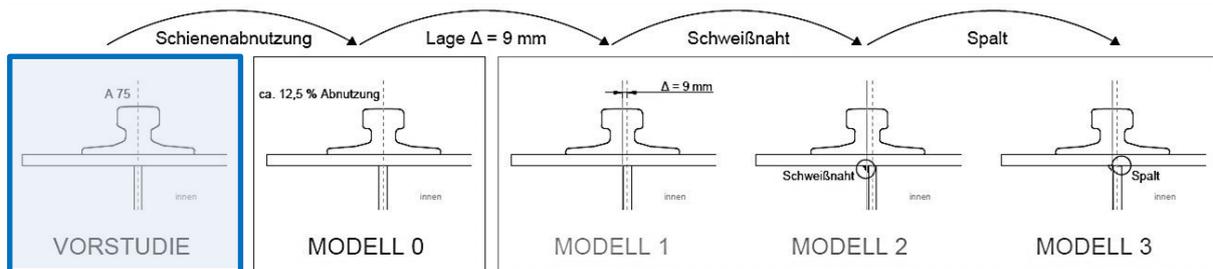


Abbildung 3.1: Schemaskizze der FEM-Studien

#### 3.1 Modell der FEM-Berechnung zur Vorstudie

Die Berechnung wurde mit der Software ABAQUS 6.14 [7] geführt. Dazu wurde ein Modell mit Volumselementen erzeugt, welches den Träger realistisch abbilden sollte. Für das System LP I wurde ein Viertel des gesamten Trägers modelliert und durch eine Symmetriebedingung der Träger zwischen dem äußeren und dem mittleren Auflager in der Rechnung erfasst. In einem Submodell wurden hinterher die Ergebnisse ausgewertet.

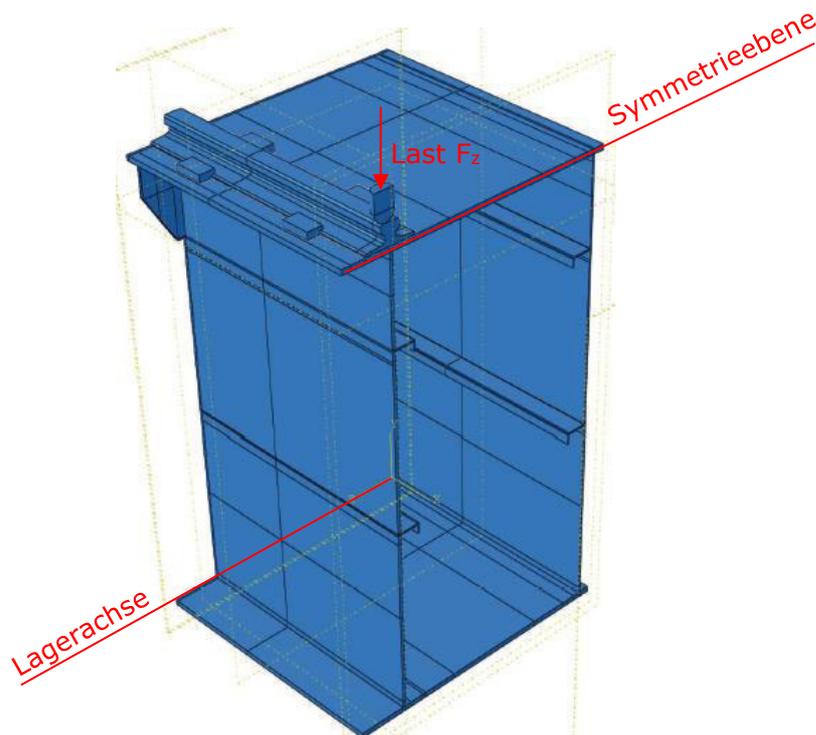


Abbildung 3.2: Abaqus-Modell von System LP I

Abbildung 3.3 zeigt das Abaqus-Modell für System LP II. In diesem Modell wurde der halbe Träger modelliert und wiederum durch eine Symmetriebedingung gespiegelt. Der Träger ist an den beiden Trägerenden gelagert und wird in der Mitte durch einen Laststempel belastet. Es handelt sich wiederum um ein Modell mit Volumselementen.

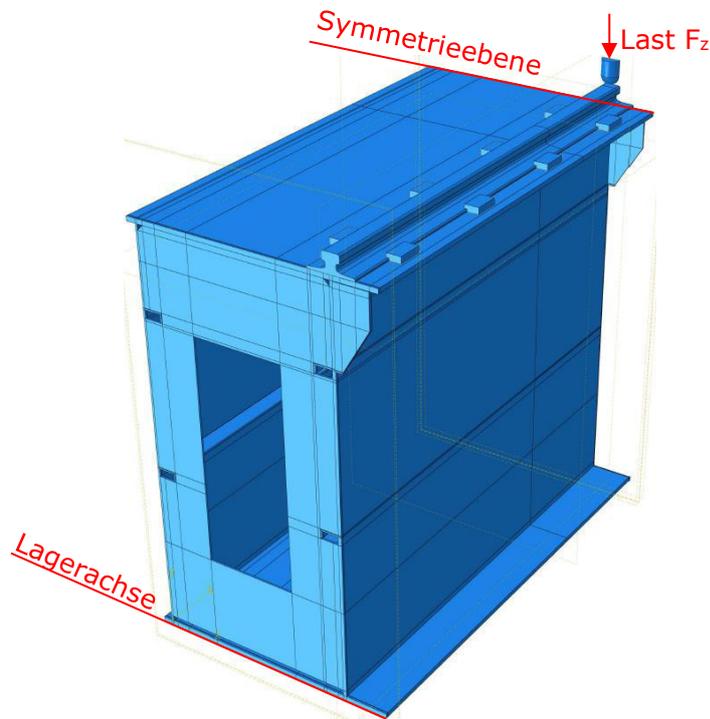


Abbildung 3.3: Abaqus-Modell von System LP II

Abbildung 3.4 zeigt das Abaqus-Modell für System LP III. Für diesen Lastfall wurde ein Viertel des gesamten Trägers modelliert und mithilfe einer Symmetriebedingung gespiegelt. Des Weiteren befinden sich keine Längssteifen in dem Steg unter der Schiene. Es handelt sich wiederum um ein Modell mit Volumselementen.

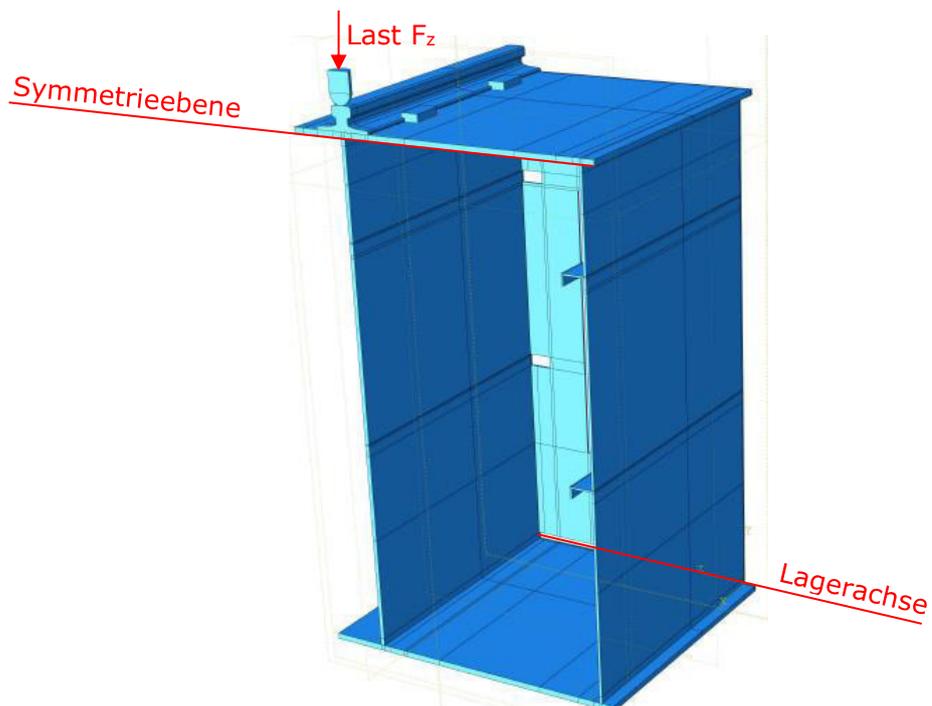


Abbildung 3.4: Abaqus-Modell von System LP III

### 3.2 Ergebnisse der FEM-Vorstudie und Vergleich mit der Normberechnung für Schiene A 75

In diesem Kapitel wird auf die Ergebnisse der Vorstudie eingegangen und die FEM-Daten mit den Berechnungen aus der Norm verglichen (siehe auch Kapitel 2.4). Dabei ist zu erwähnen, dass für jeden erläuterten Fall die FEM-Ergebnisse in einem vertikalen Abstand von 30 Millimeter zur Obergurtunterkante verwendet wurden. Derselbe Abstand wurde auch in den Laborversuchen verwendet. Vom FEM-Modell wurden drei verschiedene Bereiche analysiert: außenseitig am Steg, mittig im Steg und innenseitig am Steg.

Der Ausgangspunkt der Exzentrizität wurde so gewählt, dass sich der Lasteinleitungspunkt im Falle ohne Exzentrizität direkt über der Stegmitte und gleichzeitig über der Schienenmitte befindet.

#### 3.2.1 System LP I, ohne Exzentrizität

Nachfolgend werden die Spannungen und die Dehnungen jeweils grafisch dargestellt und auch die Werte tabellarisch erfasst.

Tabelle 3.1: Übersicht der Ergebnisse und Spannungsdifferenzen

|                          | <b>Maximales <math>\sigma_z</math></b> | <b>Delta =  FEM (innen)  -  WERT </b> |
|--------------------------|--|---------------------------------------|
| FEM (außenseitig)        | -113,5 N/mm <sup>2</sup>               | 10,2 N/mm <sup>2</sup>                |
| FEM (Stegmitte)          | -113,2 N/mm <sup>2</sup>               | 10,5 N/mm <sup>2</sup>                |
| <b>FEM (innenseitig)</b> | <b>-123,7 N/mm<sup>2</sup></b>         | <b>0,0 N/mm<sup>2</sup></b>           |
| EC_e=0 mm                | -95,2 N/mm <sup>2</sup>                | 28,5 N/mm <sup>2</sup>                |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die Spannungen der drei gemessenen Pfade und in roter Farbe den maximalen Normwert. Alle Werte sind in N/mm<sup>2</sup> ausgewiesen.

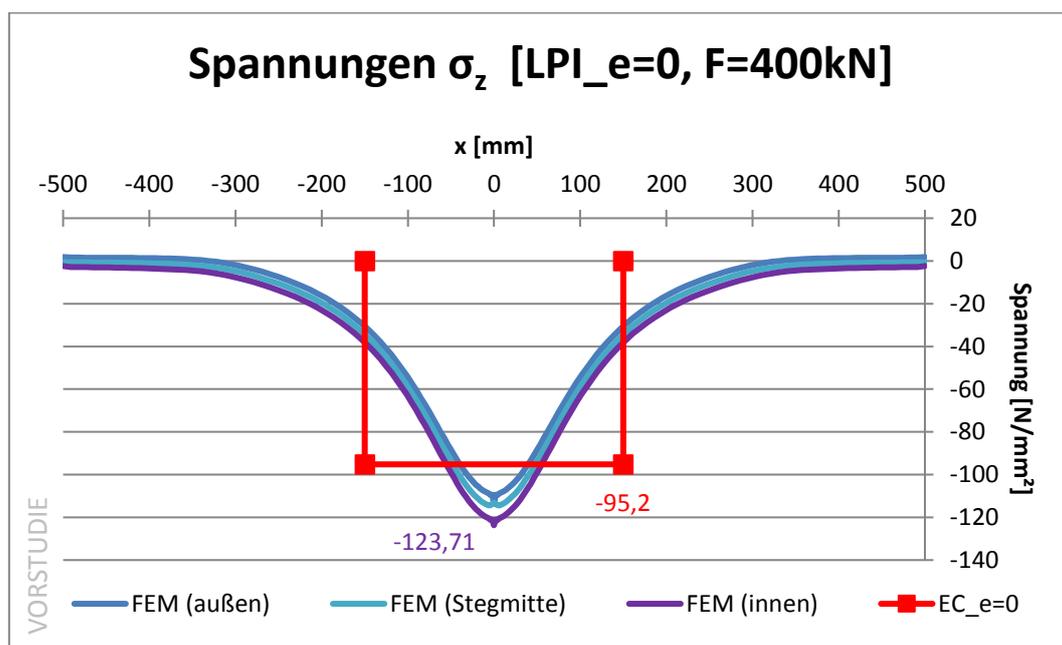


Abbildung 3.5: Spannungsdiagramm LP I, ohne Exzentrizität, Vorstudie

Es zeigt sich, dass die Ergebnisse aus den FEM-Berechnungen größere Spannungen liefern als die Werte, die mit Eurocode 1993-6 berechnet wurden.

Die Tabelle 3.2 zeigt den maximalen Wert für  $\epsilon_z$  der FEM-Berechnung und die Norm-Werte, die mit den zwei verschiedenen Varianten berechnet wurden. In der dritten Spalte ist der Absolutwert der Abweichung zwischen FEM-Ergebnis und Normberechnung gegeben.

Tabelle 3.2: Übersicht der Ergebnisse und Dehnungsdifferenzen

|                   | Maximales $\epsilon_z$ | Delta =  FEM (Stegmitte)  -  WERT |
|-------------------|------------------------|-----------------------------------|
| FEM (außenseitig) | -0,0517 %              | 0,0004 %                          |
| FEM (Stegmitte)   | <b>-0,0519 %</b>       | 0,0000 %                          |
| FEM (innenseitig) | -0,0588 %              | - 0,0069 %                        |
| EC_e=0 (Var. D1)  | -0,0453 %              | 0,0066 %                          |
| EC_e=0 (Var. D2)  | -0,0441 %              | 0,0078 %                          |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die grafische Darstellung der Ergebnisse für  $\epsilon_z$ . Die Ergebnisse wurden in der Stegmitte abgegriffen. Die Ergebnisse außenseitig und innenseitig am Steg verlaufen analog zu der dargestellten Kurve.

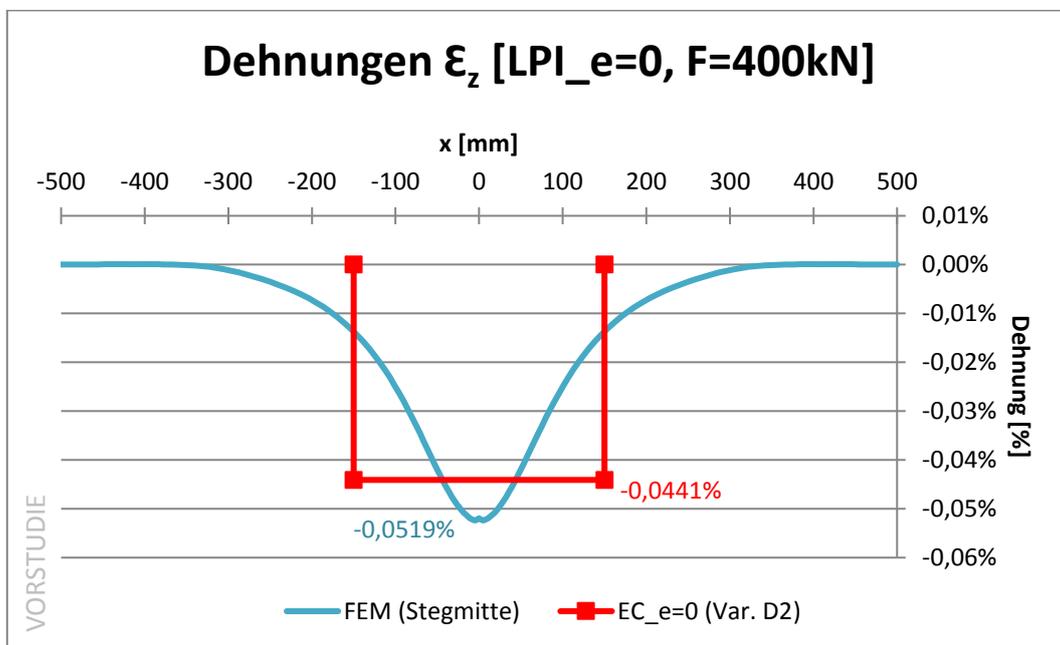


Abbildung 3.6: Dehnungsdiagramm LP I, ohne Exzentrizität, Vorstudie

### 3.2.2 LP I, Exzentrizität: +10 mm

Nachfolgend werden die Spannungen und die Dehnungen jeweils grafisch dargestellt und auch die Werte tabellarisch erfasst.

Tabelle 3.3: Übersicht der Ergebnisse und Spannungsdifferenzen

|                          | Maximales $\sigma_z$           | Delta =  FEM (außen)  -  WERT |
|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| <b>FEM (außenseitig)</b> | <b>-130,1 N/mm<sup>2</sup></b> | <b>0,0 N/mm<sup>2</sup></b>   |
| FEM (Stegmitte)          | -113,4 N/mm <sup>2</sup>       | 16,7 N/mm <sup>2</sup>        |
| FEM (innenseitig)        | -107,8 N/mm <sup>2</sup>       | 22,3 N/mm <sup>2</sup>        |
| EC_gesamt                | -148,4 N/mm <sup>2</sup>       | - 18,3 N/mm <sup>2</sup>      |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die Spannungen der drei gemessenen Pfade und in roter Farbe den maximalen Normwert. Alle Werte sind in N/mm<sup>2</sup> angegeben.

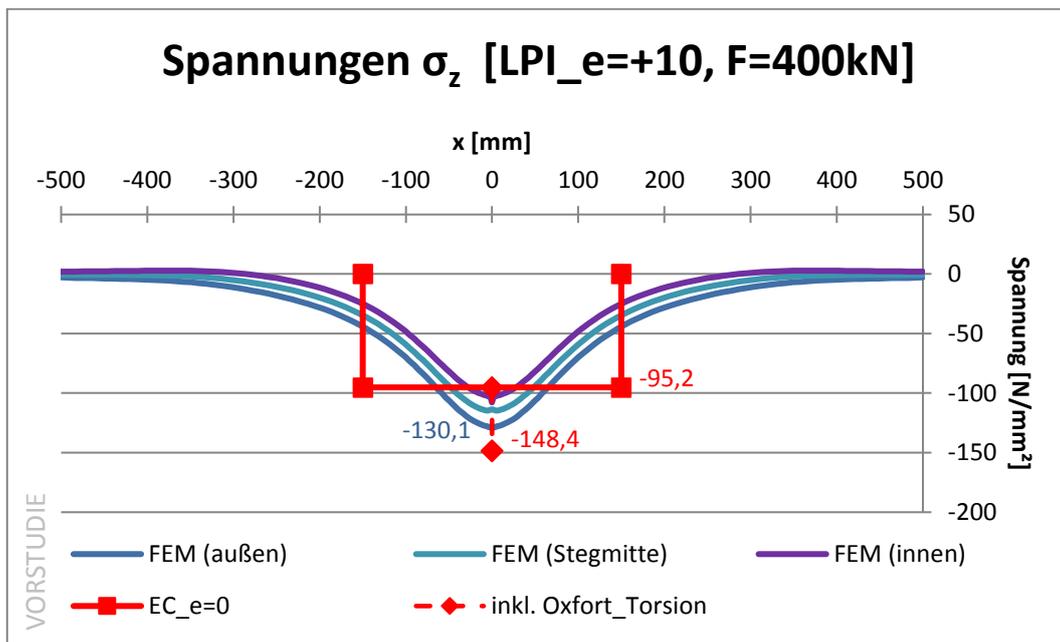


Abbildung 3.7: Spannungsdiagramm LP I, Exzentrizität +10 mm, Vorstudie

Es zeigt sich, dass die Norm mit den Oxfort-Anteilen gegenüber den FEM-Werten auf der sicheren Seite liegt.

Die Tabelle 3.4 zeigt den maximalen Wert für  $\varepsilon_z$  der FEM-Berechnung und die Norm-Werte, die mit den zwei verschiedenen Varianten berechnet wurden. In der dritten Spalte ist der Absolutwert der Abweichung zwischen FEM-Ergebnis und Normberechnung gegeben.

Tabelle 3.4: Übersicht der Ergebnisse und Dehnungsdifferenzen

|                   | Maximales $\varepsilon_z$ | Delta =  FEM (außen)  -  WERT |
|-------------------|---------------------------|-------------------------------|
| FEM (außenseitig) | <b>-0,0584 %</b>          | 0,0000 %                      |
| FEM (Stegmitte)   | -0,0519 %                 | 0,0065 %                      |
| FEM (innenseitig) | -0,0492 %                 | 0,0092 %                      |
| EC_e=0 (Var. D1)  | -0,0453 %                 |                               |
| EC_e=0 (Var. D2)  | -0,0441 %                 |                               |
| EC_gesamt         | -0,0687 %                 | - 0,0103 %                    |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die grafische Darstellung der Ergebnisse für  $\varepsilon_z$ . In diesem Fall wurde die Kurve für die Ergebnisse außenseitig am Steg dargestellt. Die beiden anderen Kurven weisen geringere Dehnungen auf und werden daher nicht dargestellt.

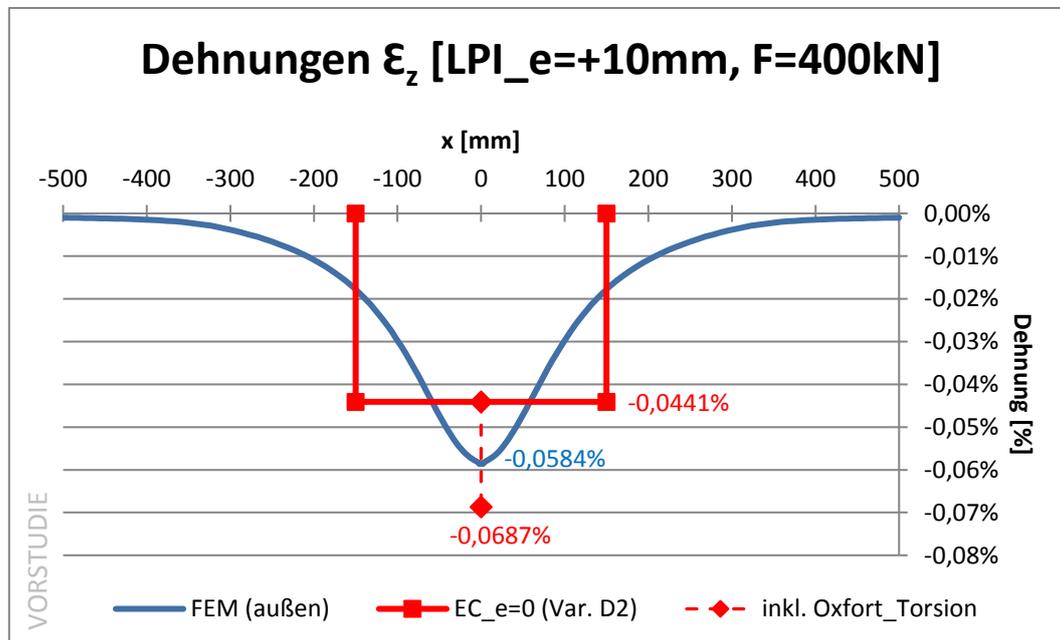


Abbildung 3.8: Dehnungsdiagramm LP I, Exzentrizität +10 mm, Vorstudie

### 3.2.3 LP I, Exzentrizität: +20 mm

Nachfolgend werden die Spannungen und die Dehnungen jeweils grafisch dargestellt und auch die Werte tabellarisch erfasst.

Tabelle 3.5: Übersicht der Ergebnisse und Spannungsdifferenzen

|                          | Maximales $\sigma_z$           | Delta =  FEM (außen)  -  WERT |
|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| <b>FEM (außenseitig)</b> | <b>-147,6 N/mm<sup>2</sup></b> | <b>0,0 N/mm<sup>2</sup></b>   |
| FEM (Stegmitte)          | -113,5 N/mm <sup>2</sup>       | 34,1 N/mm <sup>2</sup>        |
| FEM (innenseitig)        | -86,8 N/mm <sup>2</sup>        | 60,8 N/mm <sup>2</sup>        |
| EC_gesamt                | -201,6 N/mm <sup>2</sup>       | - 54,0 N/mm <sup>2</sup>      |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die Spannungen der drei gemessenen Pfade und in roter Farbe den maximalen Normwert. Alle Werte sind in N/mm<sup>2</sup> angegeben.

Anmerkung: Die besagten 20 mm für die Exzentrizität entsprechen circa  $k/4$ , also der nominellen Exzentrizität, die laut Norm bei den Ermüdungsnachweisen zu berücksichtigen ist.

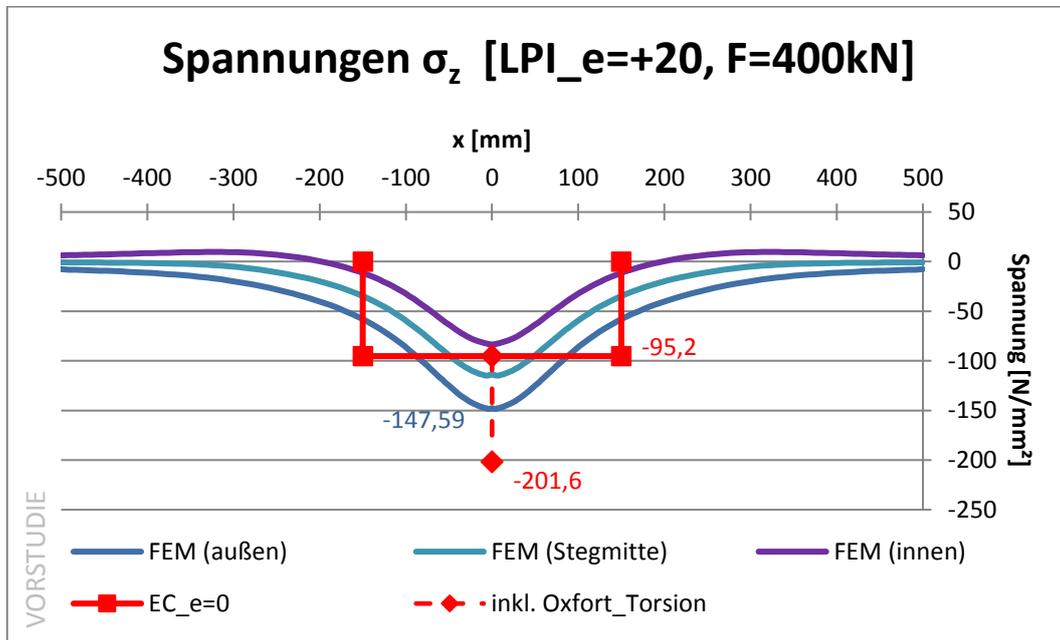


Abbildung 3.9: Spannungsdiagramm LP I, Exzentrizität +20 mm, Vorstudie

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Biegeanteil laut Oxfort größere Werte liefert als die Ergebnisse aus der FEM-Berechnung.

Die nachstehende Tabelle zeigt den maximalen Wert für  $\epsilon_z$  der FEM-Berechnung und die Norm-Werte, die mit den zwei verschiedenen Varianten berechnet wurden. In der dritten Spalte ist der Absolutwert der Abweichung zwischen FEM-Ergebnis und Normberechnung gegeben.

Tabelle 3.6: Übersicht der Ergebnisse und Dehnungsdifferenzen

|                   | Maximales $\epsilon_z$ | Delta =  FEM (außen)  -  WERT |
|-------------------|------------------------|-------------------------------|
| FEM (außenseitig) | <b>-0,0658 %</b>       | 0,0000 %                      |
| FEM (Stegmitte)   | -0,0518 %              | 0,0140 %                      |
| FEM (innenseitig) | -0,0425 %              | 0,0233 %                      |
| EC_e=0 (Var. D1)  | -0,0453 %              |                               |
| EC_e=0 (Var. D2)  | -0,0441 %              |                               |
| EC_gesamt         | -0,0934 %              | - 0,0276 %                    |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die grafische Darstellung der Ergebnisse für  $\epsilon_z$ . In diesem Fall wurde die Kurve für die Ergebnisse außenseitig am Steg dargestellt. Die beiden anderen Kurven liegen auf der konservativen Seite und verlaufen analog zur dargestellten Kurve.

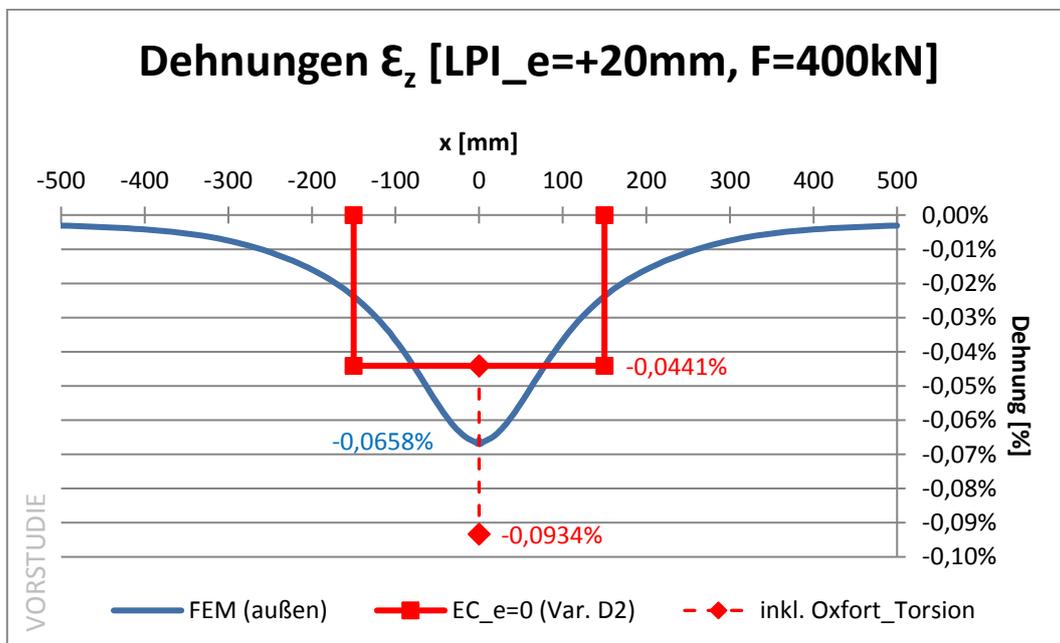


Abbildung 3.10: Dehnungsdiagramm LP I, Exzentrizität +20 mm, Vorstudie

### 3.2.4 LP I, Exzentrizität: -10 mm

Nachfolgend werden die Spannungen und die Dehnungen jeweils grafisch dargestellt und auch die Werte tabellarisch erfasst.

Tabelle 3.7: Übersicht der Ergebnisse und Spannungsdifferenzen

|                          | <b>Maximales <math>\sigma_z</math></b> | <b>Delta =  FEM (innen)  -  WERT </b> |
|--------------------------|--|---------------------------------------|
| FEM (außenseitig)        | -97,4 N/mm <sup>2</sup>                | 41,9 N/mm <sup>2</sup>                |
| FEM (Stegmitte)          | -113,1 N/mm <sup>2</sup>               | 26,2 N/mm <sup>2</sup>                |
| <b>FEM (innenseitig)</b> | <b>-139,3 N/mm<sup>2</sup></b>         | <b>0,0 N/mm<sup>2</sup></b>           |
| EC_gesamt                | -148,4 N/mm <sup>2</sup>               | - 9,1 N/mm <sup>2</sup>               |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die Spannungen der drei gemessenen Pfade und in roter Farbe den maximalen Normwert. Alle Werte sind in N/mm<sup>2</sup> angegeben.

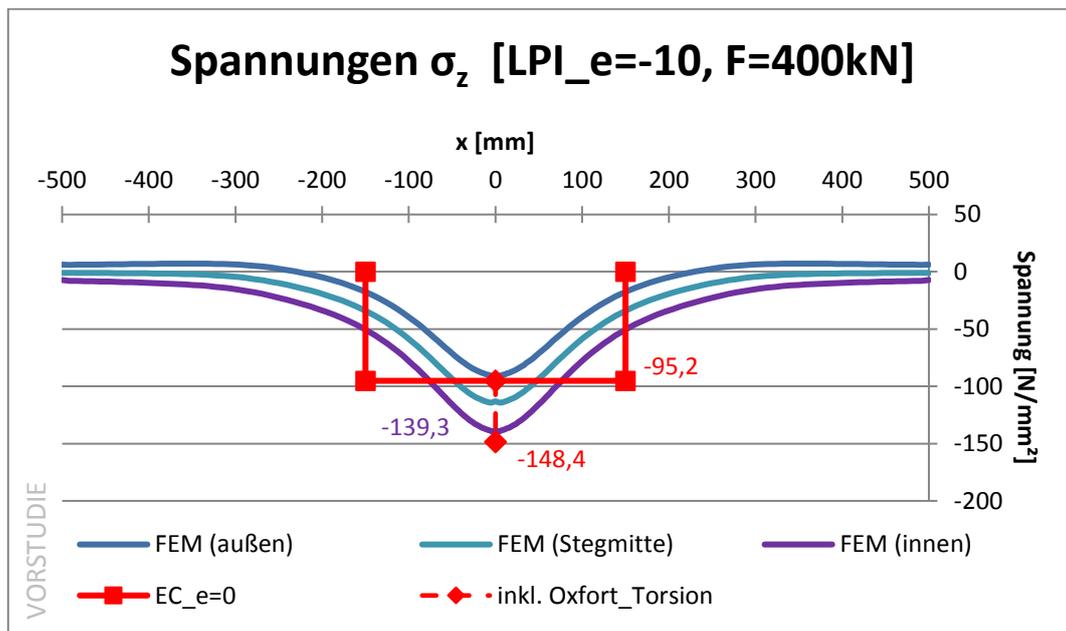


Abbildung 3.11: Spannungsdiagramm LP I, Exzentrizität -10 mm, Vorstudie

Die nachstehende Tabelle zeigt den maximalen Wert für  $\epsilon_z$  der FEM-Berechnung und die Norm-Werte, die mit den zwei verschiedenen Varianten berechnet wurden. In der dritten Spalte ist der Absolutwert der Abweichung zwischen FEM-Ergebnis und Normberechnung gegeben.

Tabelle 3.8: Übersicht der Ergebnisse und Dehnungsdifferenzen

|                          | Maximales $\epsilon_z$ | Delta =  FEM (innen)  -  WERT |
|--------------------------|------------------------|-------------------------------|
| FEM (außenseitig)        | -0,0452 %              | 0,0172 %                      |
| FEM (Stegmitte)          | -0,0520 %              | 0,0104 %                      |
| <b>FEM (innenseitig)</b> | <b>-0,0624 %</b>       | <b>0,0000 %</b>               |
| EC_e=0 (Var. D1)         | -0,0453 %              |                               |
| EC_e=0 (Var. D2)         | -0,0441 %              |                               |
| EC_gesamt                | -0,0687 %              | - 0,0063 %                    |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die grafische Darstellung der Ergebnisse für  $\epsilon_z$ . In diesem Fall wurde die Kurve für die Ergebnisse außenseitig am Steg dargestellt. Die beiden anderen Kurven liegen auf der konservativen Seite und verlaufen analog zur dargestellten Kurve.

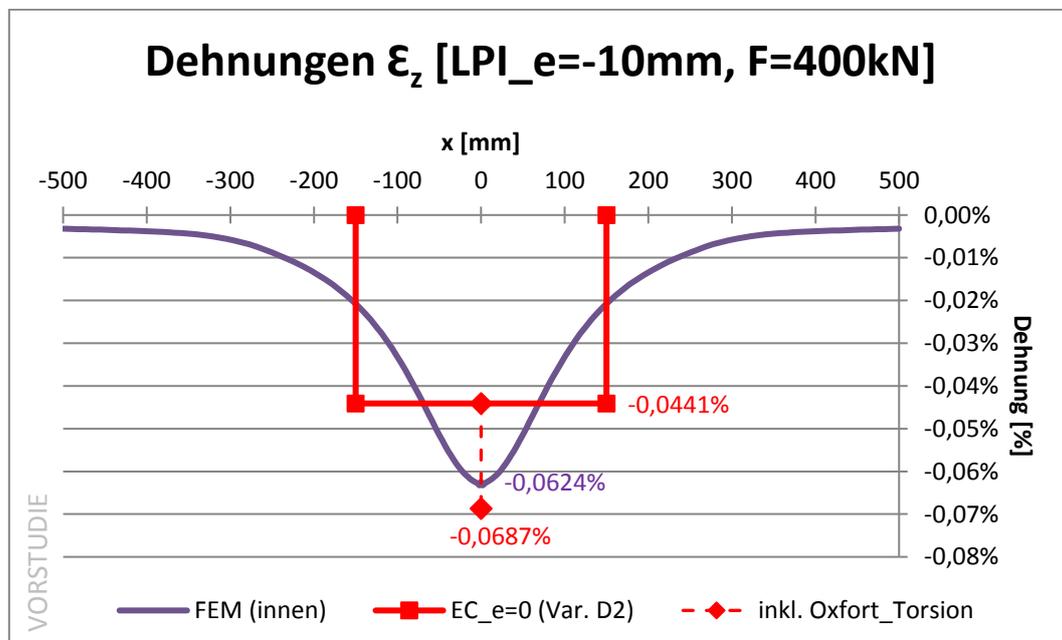


Abbildung 3.12: Dehnungsdiagramm LP I, Exzentrizität -10 mm, Vorstudie

3.2.5 LP I, Exzentrizität: -20 mm

Nachfolgend werden die Spannungen und die Dehnungen jeweils grafisch dargestellt und auch die Werte tabellarisch erfasst.

Tabelle 3.9: Übersicht der Ergebnisse und Spannungsdifferenzen

|                          | <b>Maximales <math>\sigma_z</math></b> | <b>Delta =  FEM (innen)  -  WERT </b> |
|--------------------------|--|---------------------------------------|
| FEM (außenseitig)        | -81,7 N/mm <sup>2</sup>                | 73,1 N/mm <sup>2</sup>                |
| FEM (Stegmitte)          | -113,1 N/mm <sup>2</sup>               | 41,7 N/mm <sup>2</sup>                |
| <b>FEM (innenseitig)</b> | <b>-154,7 N/mm<sup>2</sup></b>         | <b>0,0 N/mm<sup>2</sup></b>           |
| EC_gesamt                | -201,6 N/mm <sup>2</sup>               | - 46,9 N/mm <sup>2</sup>              |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die Spannungen der drei gemessenen Pfade und in roter Farbe den maximalen Normwert. Alle Werte sind in N/mm<sup>2</sup> angegeben.

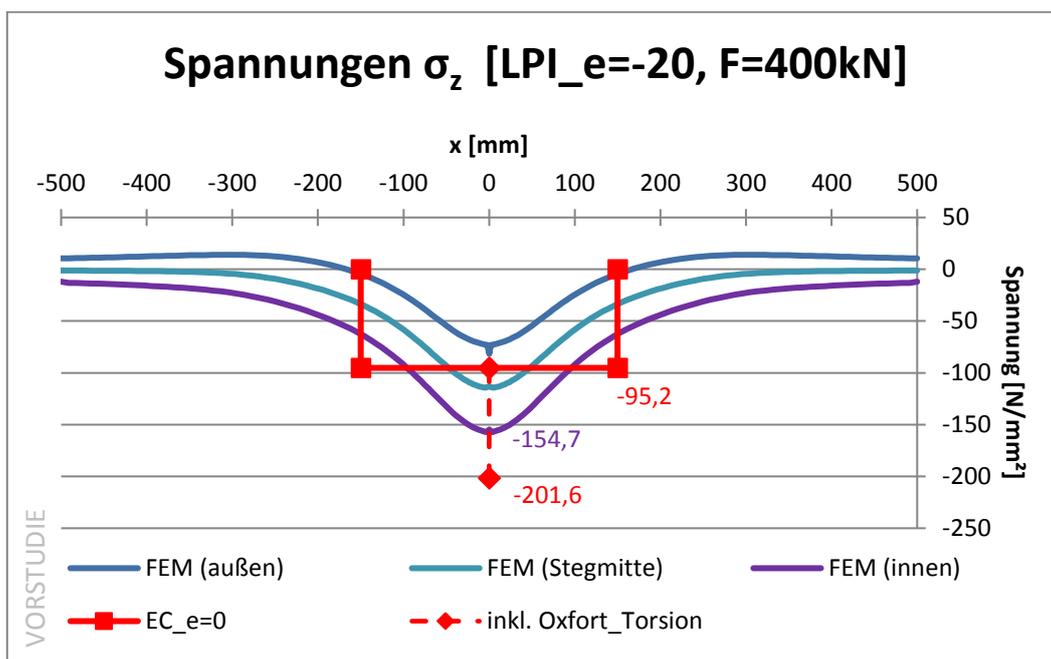


Abbildung 3.13: Spannungsdiagramm LP I, Exzentrizität -20 mm, Vorstudie

Die nachstehende Tabelle zeigt den maximalen Wert für  $\epsilon_z$  der FEM-Berechnung und die Norm-Werte, die mit den zwei verschiedenen Varianten berechnet wurden. In der dritten Spalte ist der Absolutwert der Abweichung zwischen FEM-Ergebnis und Normberechnung gegeben.

Tabelle 3.10: Übersicht der Ergebnisse und Dehnungsdifferenzen

|                          | Maximales $\epsilon_z$ | Delta =  FEM (innen)  -  WERT |
|--------------------------|------------------------|-------------------------------|
| FEM (außenseitig)        | -0,0389 %              | 0,0300 %                      |
| FEM (Stegmitte)          | -0,0521 %              | 0,0168 %                      |
| <b>FEM (innenseitig)</b> | <b>-0,0689 %</b>       | <b>0,0000 %</b>               |
| EC_e=0 (Var. D1)         | -0,0453 %              |                               |
| EC_e=0 (Var. D2)         | -0,0441 %              |                               |
| EC_gesamt                | -0,0934 %              | - 0,0245 %                    |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die grafische Darstellung der Ergebnisse für  $\epsilon_z$ . In diesem Fall wurde die Kurve für die Ergebnisse außenseitig am Steg dargestellt. Die beiden anderen Kurven liegen auf der konservativen Seite und verlaufen analog zur dargestellten Kurve.

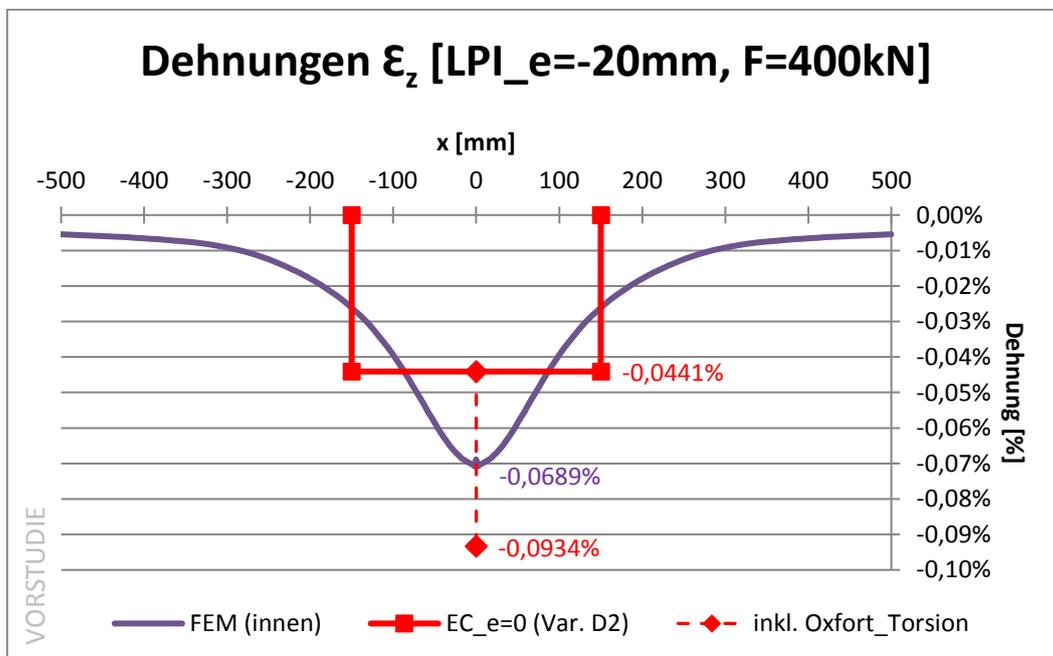


Abbildung 3.14: Dehnungsdiagramm LP I, Exzentrizität -20 mm, Vorstudie

### 3.2.6 LP II, ohne Exzentrizität

Nachfolgend werden die Spannungen und die Dehnungen jeweils grafisch dargestellt und auch die Werte tabellarisch erfasst.

Die Lastposition LP II verfügt über ein Querschott im Bereich der Lasteinleitung und dadurch kommt es zu lokalen Effekten ( $l_{\text{eff}}$  usw.).

Tabelle 3.11: Übersicht der Ergebnisse und Spannungsdifferenzen

|                          | Maximales $\sigma_z$           | Delta =  FEM (innen)  -  WERT |
|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| FEM (außenseitig)        | -80,6 N/mm <sup>2</sup>        | 53,7 N/mm <sup>2</sup>        |
| FEM (Stegmitte)          | -104,5 N/mm <sup>2</sup>       | 29,8 N/mm <sup>2</sup>        |
| <b>FEM (innenseitig)</b> | <b>-134,3 N/mm<sup>2</sup></b> | <b>0,0 N/mm<sup>2</sup></b>   |
| EC_e=0 mm                | -95,2 N/mm <sup>2</sup>        | 39,1 N/mm <sup>2</sup>        |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die Spannungen der drei gemessenen Pfade und in roter Farbe den maximalen Normwert. Alle Werte sind in N/mm<sup>2</sup> angegeben.

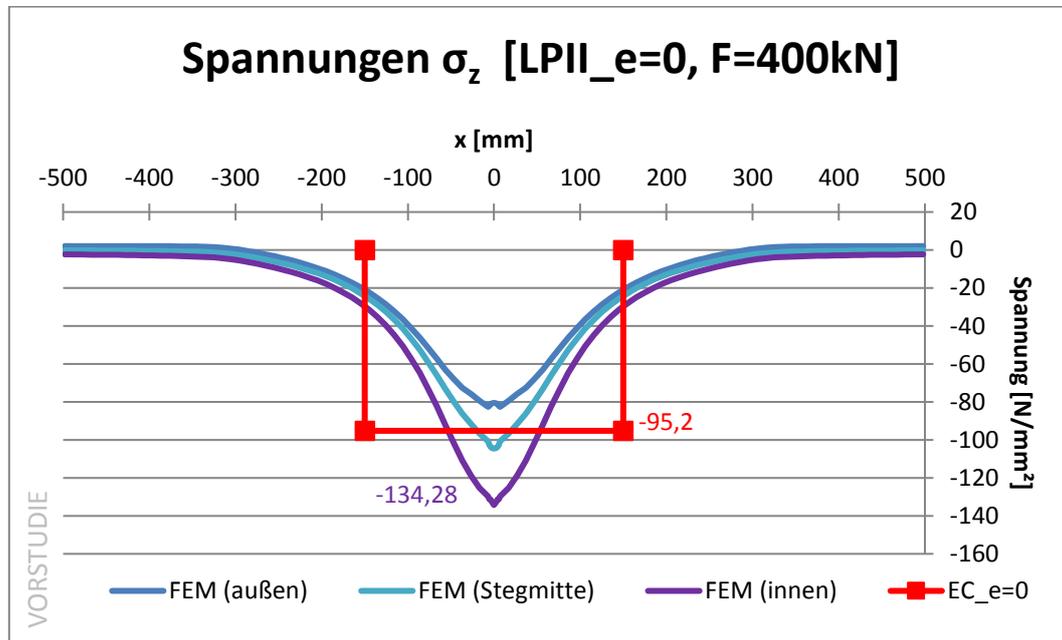


Abbildung 3.15: Spannungsdiagramm LP II, ohne Exzentrizität, Vorstudie

Die Spannung, die in der Stegmitte abgegriffen wurde, passt sehr gut zur Spannung, die mit dem Eurocode 1993-6 berechnet wurde.

Die Tabelle 3.12 zeigt den maximalen Wert für  $\varepsilon_z$  der FEM-Berechnung und die Normwerte, die mit den zwei verschiedenen Varianten berechnet wurden. In der dritten Spalte ist der Absolutwert der Abweichung zwischen FEM-Ergebnis und Normberechnung gegeben.

Tabelle 3.12: Übersicht der Ergebnisse und Dehnungsdifferenzen

|                   | Maximales $\varepsilon_z$ | Delta =  FEM (Stegmitte)  -  WERT |
|-------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| FEM (außenseitig) | -0,0343 %                 | 0,0107 %                          |
| FEM (Stegmitte)   | <b>-0,0450 %</b>          | 0,0000 %                          |
| FEM (innenseitig) | -0,0595 %                 | - 0,0145 %                        |
| EC_e=0 (Var. D2)  | -0,0453 %                 | - 0,0003 %                        |
| EC_gesamt         | -0,0441 %                 | - 0,0009 %                        |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die grafische Darstellung der Ergebnisse für  $\varepsilon_z$ . Bei diesem Diagramm wurde die Kurve in der Stegmitte dargestellt. Die beiden anderen Kurven verlaufen analog.

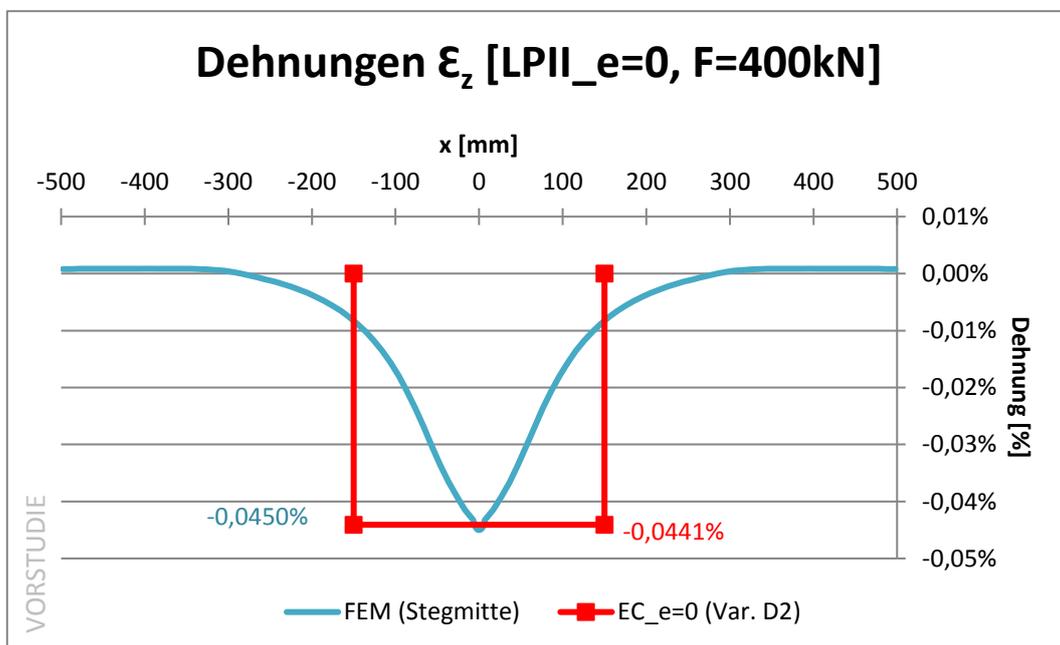


Abbildung 3.16: Dehnungsdiagramm LP II, ohne Exzentrizität, Vorstudie

3.2.7 LP II, Exzentrizität: +10 mm

Nachfolgend werden die Spannungen und die Dehnungen jeweils grafisch dargestellt und auch die Werte tabellarisch erfasst.

Tabelle 3.13: Übersicht der Ergebnisse und Spannungsdifferenzen

|                          | <b>Maximales <math>\sigma_z</math></b> | <b>Delta =  FEM (innen)  -  WERT </b> |
|--------------------------|--|---------------------------------------|
| FEM (außenseitig)        | -89,8 N/mm <sup>2</sup>                | 33,9 N/mm <sup>2</sup>                |
| FEM (Stegmitte)          | -105,9 N/mm <sup>2</sup>               | 17,8 N/mm <sup>2</sup>                |
| <b>FEM (innenseitig)</b> | <b>-123,7 N/mm<sup>2</sup></b>         | <b>0,0 N/mm<sup>2</sup></b>           |
| EC_gesamt                | -148,4 N/mm <sup>2</sup>               | - 24,7 N/mm <sup>2</sup>              |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die Spannungen der drei gemessenen Pfade und in roter Farbe den maximalen Normwert. Die Werte sind in N/mm<sup>2</sup> angegeben.

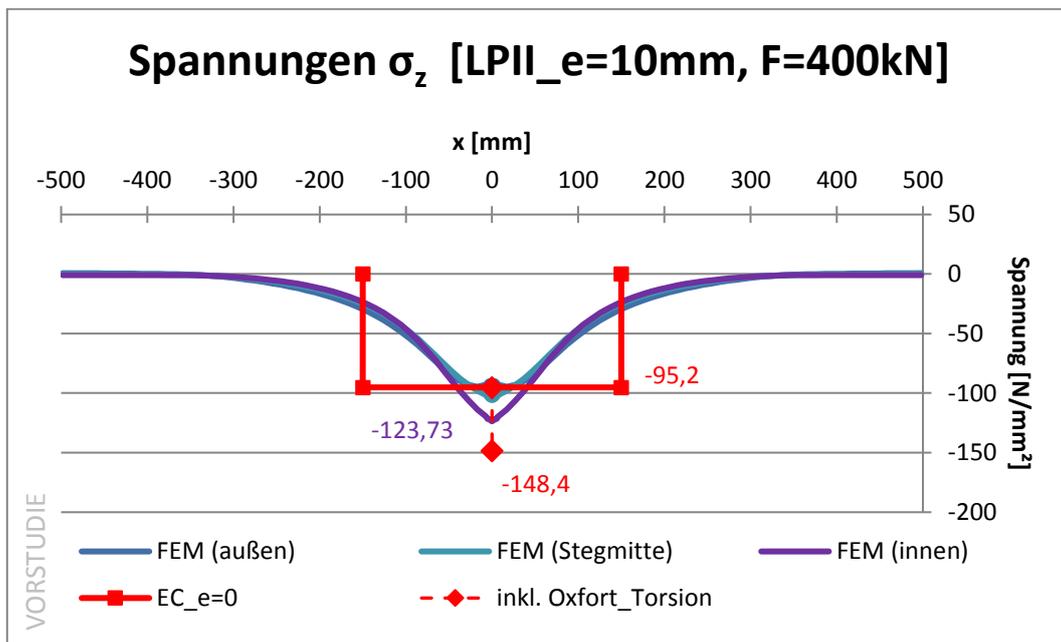


Abbildung 3.17: Spannungsdiagramm LP II, Exzentrizität +10 mm, Vorstudie

Anmerkung: Der Biegeanteil laut Oxfort berücksichtigt das zusätzliche Querschott nicht.

Die Tabelle 3.14 zeigt den maximalen Wert für  $\varepsilon_z$  der FEM-Berechnung und die Normwerte, die mit den zwei verschiedenen Varianten berechnet wurden. In der dritten Spalte ist der Absolutwert der Abweichung zwischen FEM-Ergebnis und Normberechnung gegeben.

Tabelle 3.14: Übersicht der Ergebnisse und Dehnungsdifferenzen

|                   | Maximales $\varepsilon_z$ | Delta =  FEM (innen)  -  WERT |
|-------------------|---------------------------|-------------------------------|
| FEM (außenseitig) | -0,0401 %                 | 0,0147 %                      |
| FEM (Stegmitte)   | -0,0469 %                 | 0,0079 %                      |
| FEM (innenseitig) | <b>-0,0548 %</b>          | 0,0000 %                      |
| EC_e=0 (Var. D1)  | -0,0453 %                 |                               |
| EC_e=0 (Var. D2)  | -0,0441 %                 |                               |
| EC_gesamt         | -0,0690 %                 | - 0,0142 %                    |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die grafische Darstellung der Ergebnisse für  $\varepsilon_z$ . Bei diesem Diagramm wurden die Ergebnisse innenseitig am Steg dargestellt. Auch hier verlaufen die anderen beiden Kurven analog.

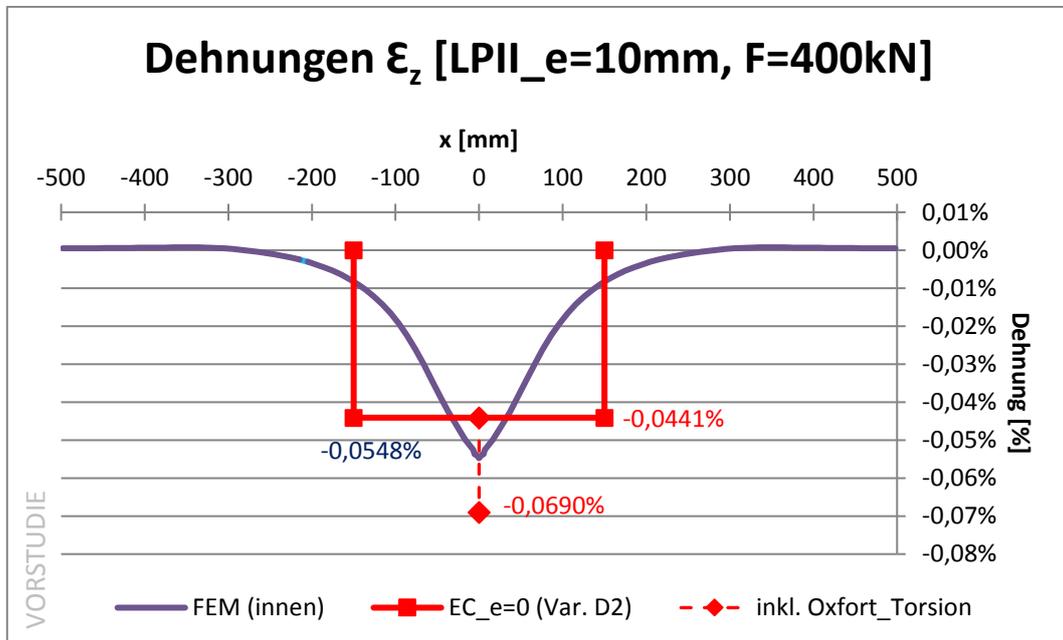


Abbildung 3.18: Dehnungsdiagramm LP II, Exzentrizität +10 mm, Vorstudie

### 3.2.8 LP II, Exzentrizität: +20 mm

Nachfolgend werden die Spannungen und die Dehnungen jeweils grafisch dargestellt und auch die Werte tabellarisch erfasst.

Tabelle 3.15: Übersicht der Ergebnisse und Spannungsdifferenzen

|                          | Maximales $\sigma_z$           | Delta =  FEM (innen)  -  WERT |
|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| FEM (außenseitig)        | -85,3 N/mm <sup>2</sup>        | 78,8 N/mm <sup>2</sup>        |
| FEM (Stegmitte)          | -99,1 N/mm <sup>2</sup>        | 65,1 N/mm <sup>2</sup>        |
| <b>FEM (innenseitig)</b> | <b>-164,1 N/mm<sup>2</sup></b> | <b>0,0 N/mm<sup>2</sup></b>   |
| EC_gesamt                | -201,6 N/mm <sup>2</sup>       | - 37,5 N/mm <sup>2</sup>      |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die Spannungen der drei gemessenen Pfade und in roter Farbe den maximalen Normwert. Die Werte sind in N/mm<sup>2</sup> angegeben.

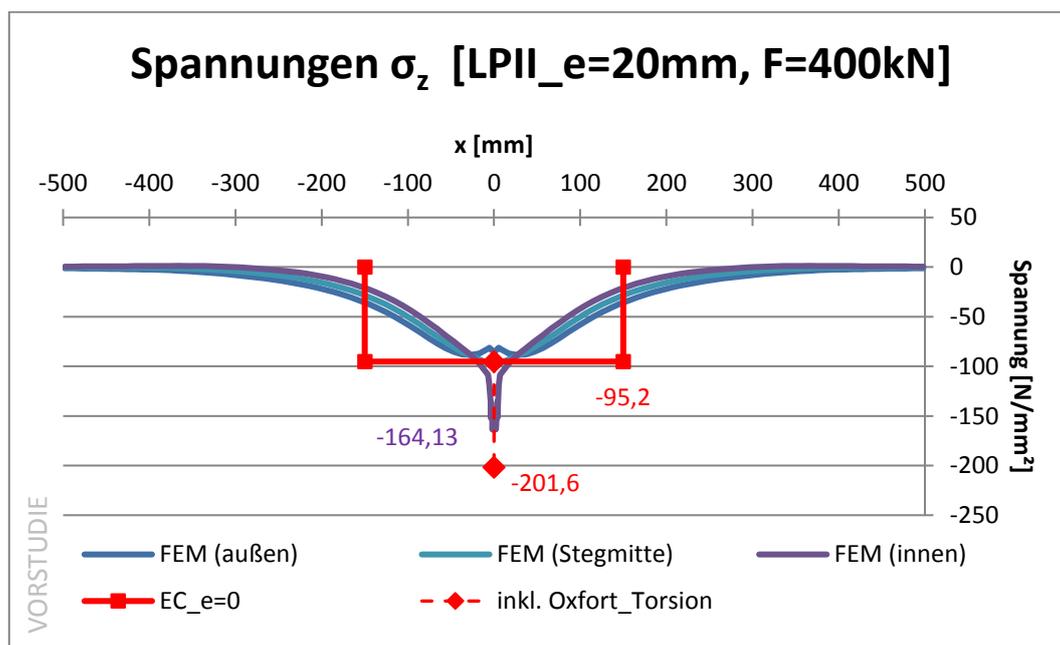


Abbildung 3.19: Spannungsdiagramm LP II, Exzentrizität +20 mm, Vorstudie

Man erkennt, dass bei der Position  $x = 0$  mm (direkt unter der Lasteinleitung) eine lokale Spitzenspannung auftritt. Dies hängt mit den lokalen Effekten durch das Querschott zusammen.

Die Tabelle 3.16 zeigt den maximalen Wert für  $\varepsilon_z$  der FEM-Berechnung und die Normwerte, die mit den zwei verschiedenen Varianten berechnet wurden. In der dritten Spalte ist der Absolutwert der Abweichung zwischen FEM-Ergebnis und Normberechnung gegeben.

Tabelle 3.16: Übersicht der Ergebnisse und Dehnungsdifferenzen

|                   | Maximales $\varepsilon_z$ | Delta =  FEM (innen)  -  WERT |
|-------------------|---------------------------|-------------------------------|
| FEM (außenseitig) | -0,0395 %                 | 0,0284 %                      |
| FEM (Stegmitte)   | -0,0439 %                 | 0,0024 %                      |
| FEM (innenseitig) | <b>-0,0679 %</b>          | 0,0000 %                      |
| EC_e=0 (Var. D1)  | -0,0453 %                 |                               |
| EC_e=0 (Var. D2)  | -0,0441 %                 |                               |
| EC_gesamt         | -0,0934 %                 | - 0,0255 %                    |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die grafische Darstellung der Ergebnisse für  $\varepsilon_z$ . Im nachstehenden Diagramm wurden zwei Kurven dargestellt, nämlich außenseitig und innenseitig am Steg. Wie man erkennen kann, hat die Kurve innenseitig am Steg ein stark ausgeprägtes Maximum in der Mitte des Trägers.

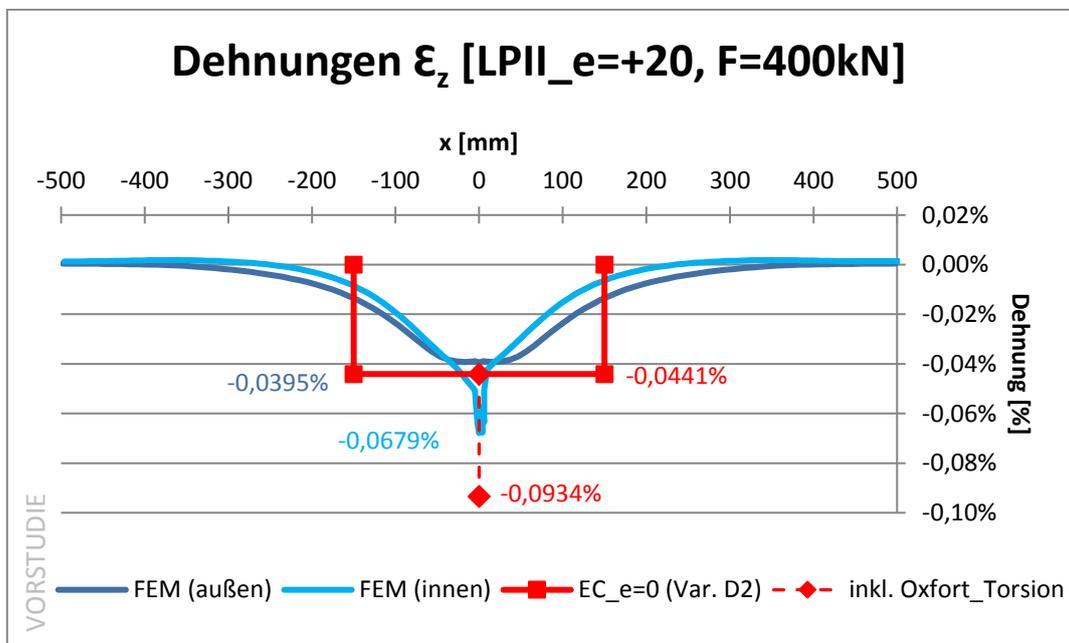


Abbildung 3.20: Dehnungsdiagramm LP II, Exzentrizität +20 mm, Vorstudie

### 3.2.9 LP II, Exzentrizität: -10 mm

Nachfolgend werden die Spannungen und die Dehnungen jeweils grafisch dargestellt und auch die Werte tabellarisch erfasst.

Tabelle 3.17: Übersicht der Ergebnisse und Spannungsdifferenzen

|                          | <b>Maximales <math>\sigma_z</math></b> | <b>Delta =  FEM (innen)  -  WERT </b> |
|--------------------------|--|---------------------------------------|
| FEM (außenseitig)        | -72,1 N/mm <sup>2</sup>                | 72,9 N/mm <sup>2</sup>                |
| FEM (Stegmitte)          | -103,8 N/mm <sup>2</sup>               | 41,3 N/mm <sup>2</sup>                |
| <b>FEM (innenseitig)</b> | <b>-145,0 N/mm<sup>2</sup></b>         | <b>0,0 N/mm<sup>2</sup></b>           |
| EC_gesamt                | -148,4 N/mm <sup>2</sup>               | - 3,4 N/mm <sup>2</sup>               |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die Spannungen der drei gemessenen Pfade und in roter Farbe den maximalen Normwert. Die Werte sind in N/mm<sup>2</sup> angegeben.

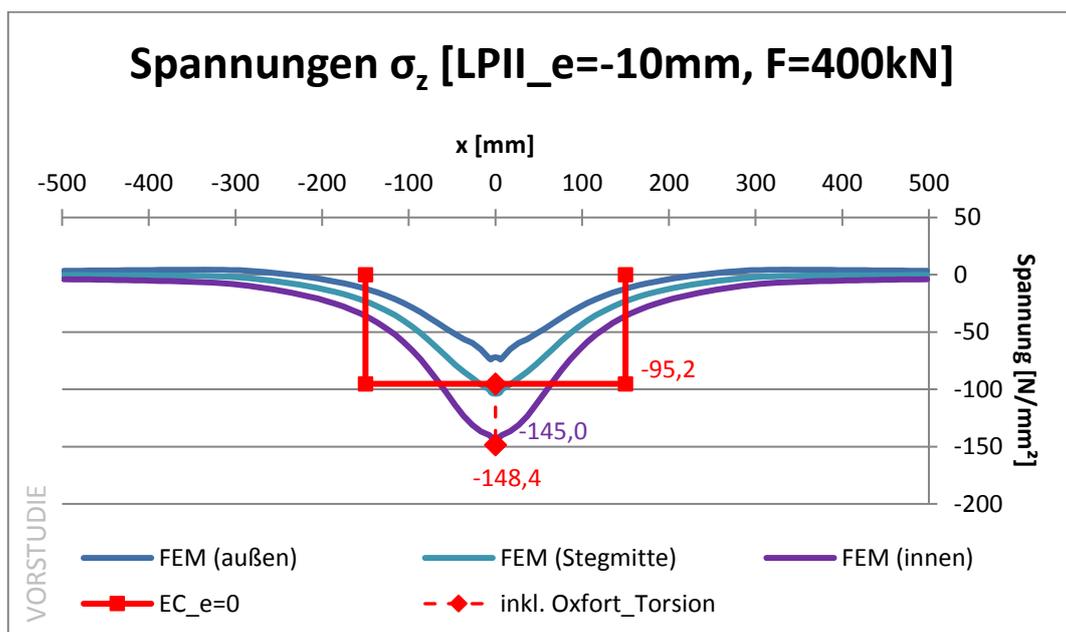


Abbildung 3.21: Spannungsdiagramm LP II, Exzentrizität -10 mm, Vorstudie

In diesem Diagramm erkennt man, dass die Spannung, die innenseitig am Steg abgegriffen wurde mit der Torsionsspannung von Oxfort sehr gut zusammenpasst, wobei der Wert aus der Norm-Berechnung auf der sicheren Seite liegt. Auch die Spannung mittig im Steg aus der FEM-Berechnung passt gut mit dem Membrananteil aus dem EC 1993-6 zusammen.

Die nachstehende Tabelle zeigt den maximalen Wert für  $\epsilon_z$  der FEM-Berechnung und die Norm-Werte, die mit den zwei verschiedenen Varianten berechnet wurden. In der dritten Spalte ist der Absolutwert der Abweichung zwischen FEM-Ergebnis und Normberechnung gegeben.

Tabelle 3.18: Übersicht der Ergebnisse und Dehnungsdifferenzen

|                   | Maximales $\epsilon_z$ | Delta =  FEM (innen)  -  WERT |
|-------------------|------------------------|-------------------------------|
| FEM (außenseitig) | -0,0289 %              | 0,0348 %                      |
| FEM (Stegmitte)   | -0,0435 %              | 0,0202 %                      |
| FEM (innenseitig) | <b>-0,0637 %</b>       | 0,0000 %                      |
| EC_e=0 (Var. D1)  | -0,0453 %              |                               |
| EC_e=0 (Var. D2)  | -0,0441 %              |                               |
| EC_gesamt         | -0,0690 %              | - 0,0053 %                    |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die grafische Darstellung der Ergebnisse für  $\epsilon_z$ . Im nachstehenden Diagramm wurde die Kurve der Dehnungen innenseitig am Steg dargestellt. Die anderen Kurven verlaufen wieder analog und liegen auf der sicheren Seite.

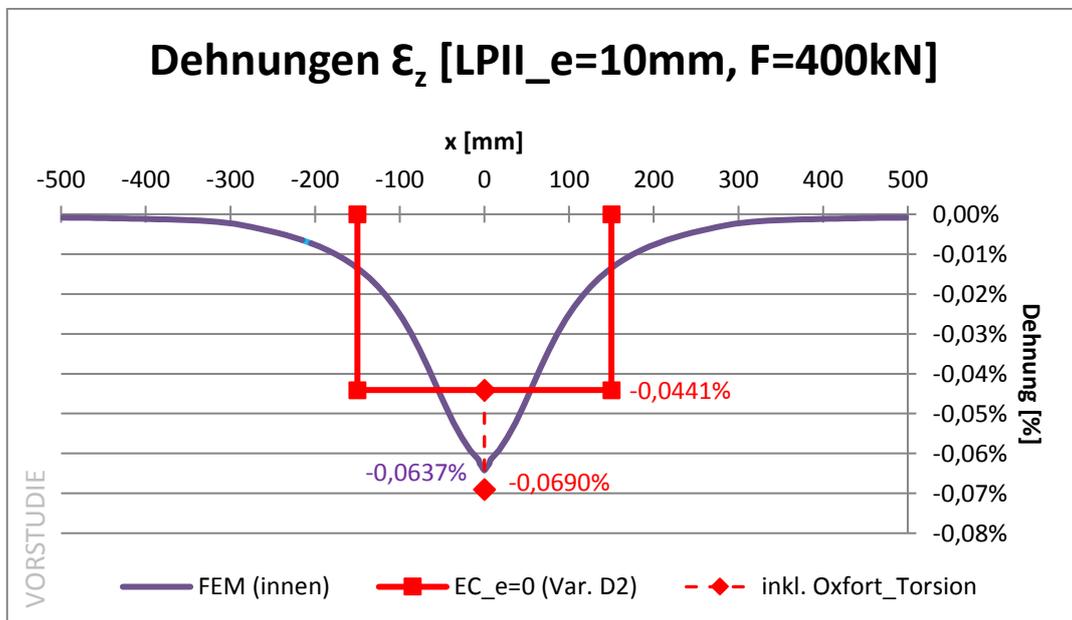


Abbildung 3.22: Dehnungsdiagramm LP II, Exzentrizität -10 mm, Vorstudie

3.2.10 LP II, Exzentrizität: -20 mm

Nachfolgend werden die Spannungen und die Dehnungen jeweils grafisch dargestellt und auch die Werte tabellarisch erfasst.

Tabelle 3.19: Übersicht der Ergebnisse und Spannungsdifferenzen

|                          | Maximales $\sigma_z$           | Delta =  FEM (innen)  -  WERT |
|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| FEM (außenseitig)        | -128,2 N/mm <sup>2</sup>       | 184,3 N/mm <sup>2</sup>       |
| FEM (Stegmitte)          | -206,9 N/mm <sup>2</sup>       | 105,6 N/mm <sup>2</sup>       |
| <b>FEM (innenseitig)</b> | <b>-312,5 N/mm<sup>2</sup></b> | <b>0,0 N/mm<sup>2</sup></b>   |
| EC_gesamt                | -201,6 N/mm <sup>2</sup>       | 110,9 N/mm <sup>2</sup>       |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die Spannungen der drei gemessenen Pfade und in roter Farbe den maximalen Normwert. Die Werte sind in N/mm<sup>2</sup> ausgewiesen.

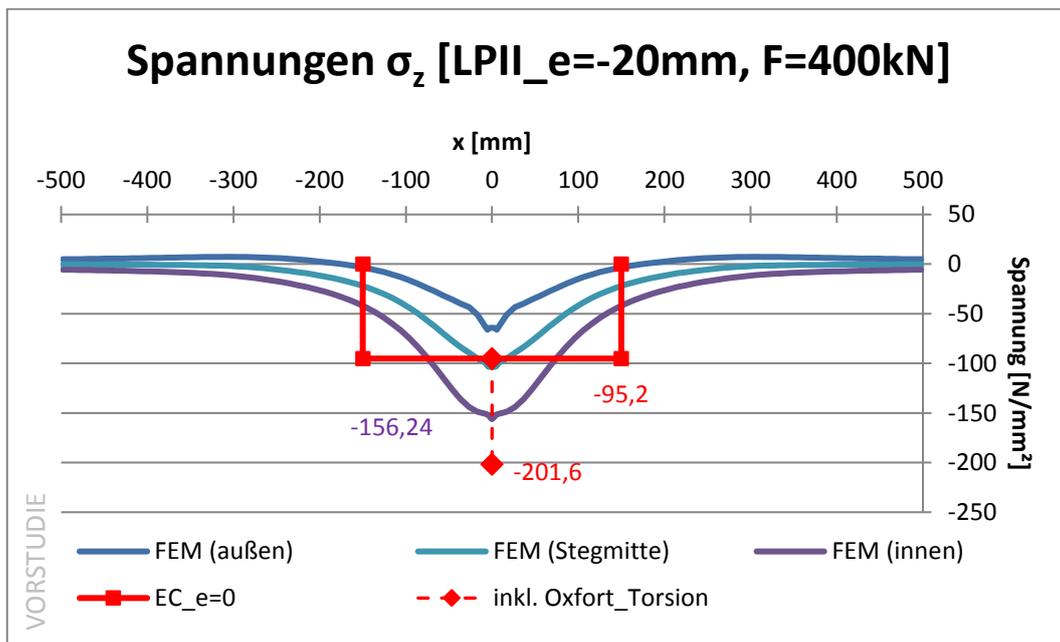


Abbildung 3.23: Spannungsdiagramm LP II, Exzentrizität -20 mm, Vorstudie

Man erkennt, dass die Oxfort-Spannung die Torsionswirkung deutlich überschätzt.

Die Tabelle 3.20 zeigt den maximalen Wert für  $\varepsilon_z$  der FEM-Berechnung und die Normwerte, die mit den zwei verschiedenen Varianten berechnet wurden. In der dritten Spalte ist der Absolutwert der Abweichung zwischen FEM-Ergebnis und Normberechnung gegeben.

Tabelle 3.20: Übersicht der Ergebnisse und Dehnungsdifferenzen

|                   | Maximales $\varepsilon_z$ | Delta =  FEM (innen)  -  WERT |
|-------------------|---------------------------|-------------------------------|
| FEM (außenseitig) | -0,0236 %                 | 0,0457 %                      |
| FEM (Stegmitte)   | -0,0422 %                 | 0,0271 %                      |
| FEM (innenseitig) | <b>-0,0693 %</b>          | 0,0000 %                      |
| EC_e=0 (Var. D1)  | -0,0453 %                 |                               |
| EC_e=0 (Var. D2)  | -0,0441 %                 |                               |
| EC_gesamt         | -0,0934 %                 | - 0,0241 %                    |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die grafische Darstellung der Ergebnisse für  $\varepsilon_z$ . Im nachstehenden Diagramm wurde die Kurve der Dehnungen innenseitig am Steg dargestellt. Die anderen Kurven verlaufen wieder analog und liegen auf der sicheren Seite.

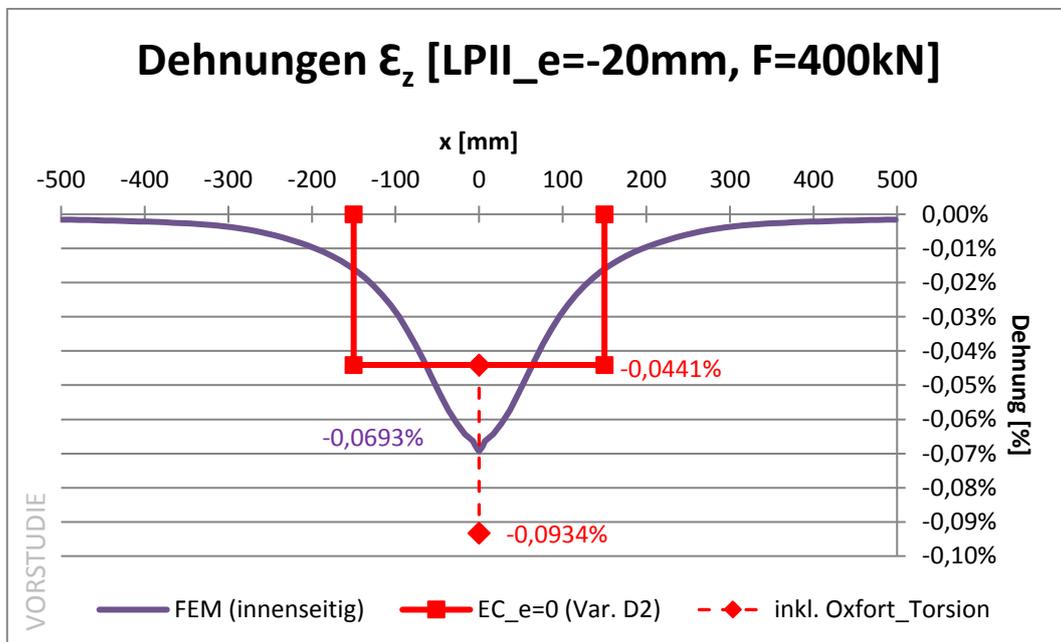


Abbildung 3.24: Dehnungsdiagramm LP II, Exzentrizität -20 mm, Vorstudie

### 3.2.11 LP III, ohne Exzentrizität

Nachfolgend werden die Spannungen und die Dehnungen jeweils grafisch dargestellt und auch die Werte tabellarisch erfasst.

Tabelle 3.21: Übersicht der Ergebnisse und Spannungsdifferenzen

|                          | <b>Maximales <math>\sigma_z</math></b> | <b>Delta =  FEM (innen)  -  WERT </b> |
|--------------------------|--|---------------------------------------|
| FEM (außenseitig)        | -115,6 N/mm <sup>2</sup>               | 7,7 N/mm <sup>2</sup>                 |
| FEM (Stegmitte)          | -113,6 N/mm <sup>2</sup>               | 9,7 N/mm <sup>2</sup>                 |
| <b>FEM (innenseitig)</b> | <b>-123,3 N/mm<sup>2</sup></b>         | <b>0,0 N/mm<sup>2</sup></b>           |
| EC_e=0 mm                | -95,2 N/mm <sup>2</sup>                | 28,1 N/mm <sup>2</sup>                |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die Spannungen der drei gemessenen Pfade und in roter Farbe den maximalen Normwert. Alle Werte sind in N/mm<sup>2</sup> angegeben.

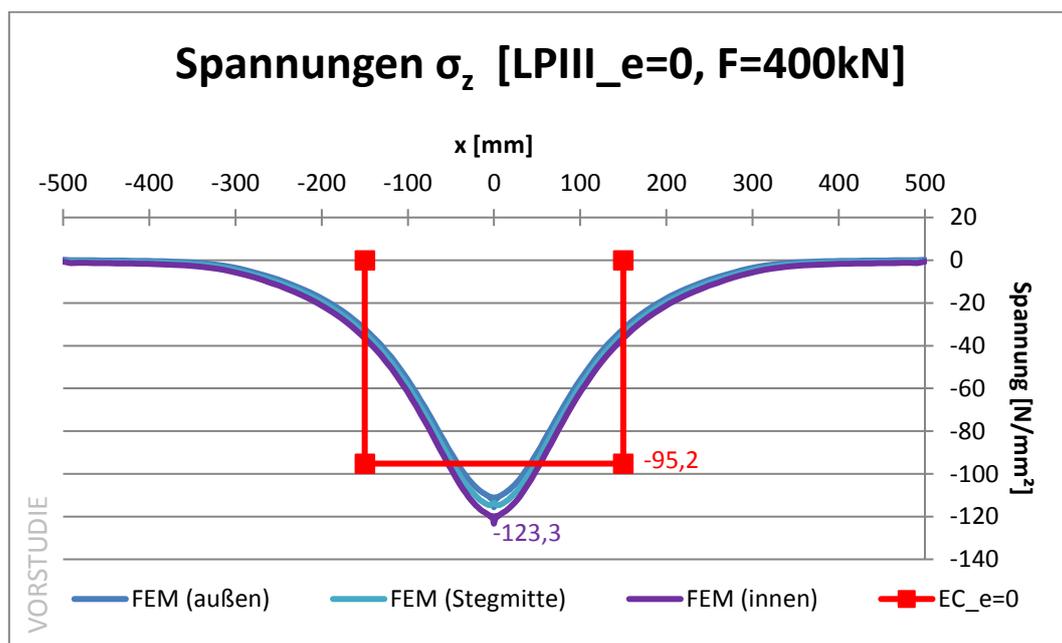


Abbildung 3.25: Spannungsdiagramm LP III, ohne Exzentrizität, Vorstudie

Man erkennt, dass die FEM-Berechnung höhere Werte ergibt, als die Berechnung nach der Norm.

Die nachstehende Tabelle zeigt den maximalen Wert für  $\epsilon_z$  der FEM-Berechnung und die Norm-Werte, die mit den zwei verschiedenen Varianten berechnet wurden. In der dritten Spalte ist der Absolutwert der Abweichung zwischen FEM-Ergebnis und Normberechnung gegeben.

Tabelle 3.22: Übersicht der Ergebnisse und Dehnungsdifferenzen

|                          | Maximales $\epsilon_z$ | Delta =  FEM (innen)  -  WERT |
|--------------------------|------------------------|-------------------------------|
| FEM (außenseitig)        | -0,0525 %              | 0,0030 %                      |
| FEM (Stegmitte)          | -0,0522 %              | 0,0033 %                      |
| <b>FEM (innenseitig)</b> | <b>-0,0555 %</b>       | <b>0,0000 %</b>               |
| EC_e=0 (Var. D1)         | -0,0453 %              |                               |
| EC_e=0 (Var. D2)         | -0,0441 %              | 0,0114 %                      |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die grafische Darstellung der Ergebnisse für  $\epsilon_z$ . In diesem Fall wurde die Kurve für die Ergebnisse außenseitig am Steg dargestellt. Die beiden anderen Kurven liegen auf der konservativen Seite und verlaufen analog zur dargestellten Kurve.

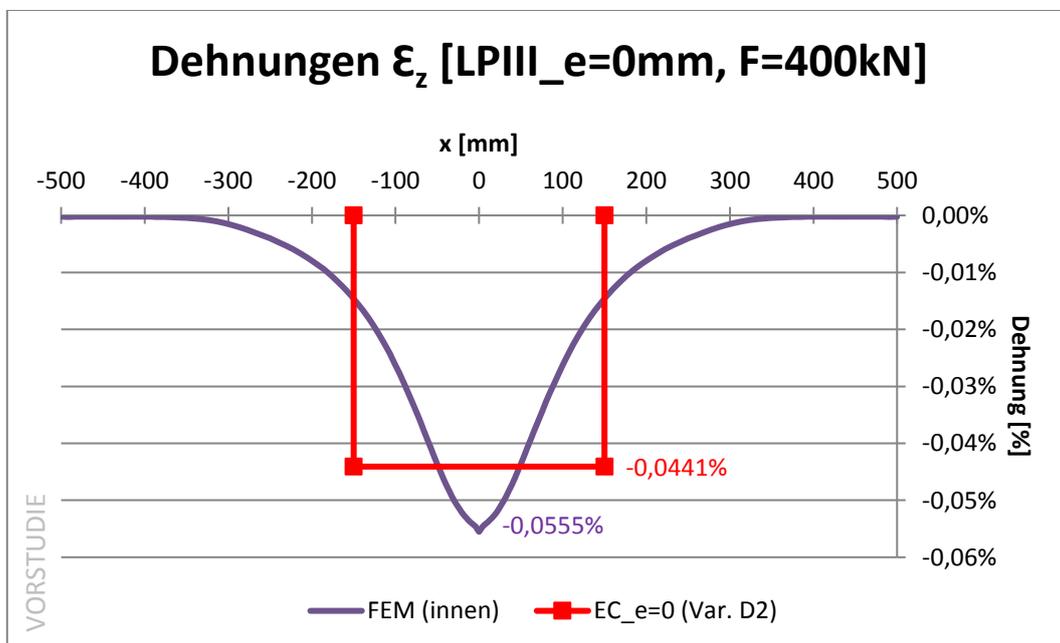


Abbildung 3.26: Dehnungsdiagramm LP III, ohne Exzentrizität, Vorstudie

3.2.12 LP III, Exzentrizität: +10 mm

Nachfolgend werden die Spannungen und die Dehnungen jeweils grafisch dargestellt und auch die Werte tabellarisch erfasst.

Tabelle 3.23: Übersicht der Ergebnisse und Spannungsdifferenzen

|                          | Maximales $\sigma_z$           | Delta =  FEM (außen)  -  WERT |
|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| <b>FEM (außenseitig)</b> | <b>-124,3 N/mm<sup>2</sup></b> | <b>0,0 N/mm<sup>2</sup></b>   |
| FEM (Stegmitte)          | -113,8 N/mm <sup>2</sup>       | 10,5 N/mm <sup>2</sup>        |
| FEM (innenseitig)        | -115,4 N/mm <sup>2</sup>       | 8,8 N/mm <sup>2</sup>         |
| EC_gesamt                | -117,0 N/mm <sup>2</sup>       | 7,3 N/mm <sup>2</sup>         |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die Spannungen der drei gemessenen Pfade und in roter Farbe den maximalen Normwert. Alle Werte sind in N/mm<sup>2</sup> angegeben.

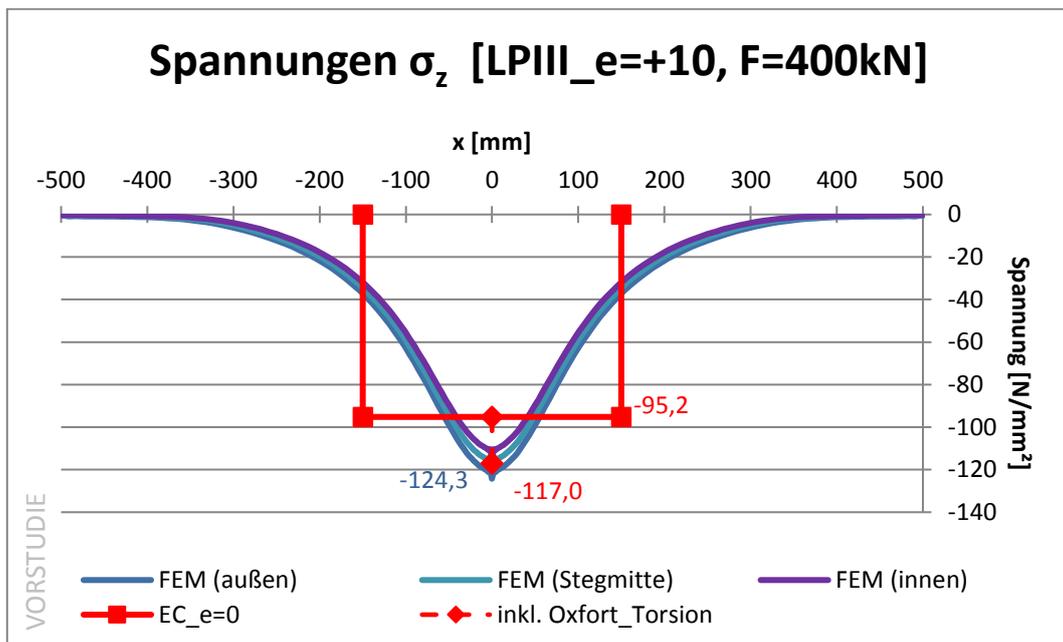


Abbildung 3.27: Spannungsdiagramm LP III, Exzentrizität +10 mm, Vorstudie

Man erkennt, dass die Werte aus dem FEM und dem Eurocode 1993-6 bei moderater Exzentrizität in Summe gut zusammenpassen.

Die nachstehende Tabelle zeigt den maximalen Wert für  $\epsilon_z$  der FEM-Berechnung und die Norm-Werte, die mit den zwei verschiedenen Varianten berechnet wurden. In der dritten Spalte ist der Absolutwert der Abweichung zwischen FEM-Ergebnis und Normberechnung gegeben.

Tabelle 3.24: Übersicht der Ergebnisse und Dehnungsdifferenzen

|                   | Maximales $\epsilon_z$ | Delta =  FEM (außen)  -  WERT |
|-------------------|------------------------|-------------------------------|
| FEM (außenseitig) | <b>-0,0558 %</b>       | 0,0000 %                      |
| FEM (Stegmitte)   | -0,0522 %              | 0,0036 %                      |
| FEM (innenseitig) | -0,0523 %              | 0,0035 %                      |
| EC_e=0 (Var. D1)  | -0,0453 %              |                               |
| EC_e=0 (Var. D2)  | -0,0441 %              |                               |
| EC_gesamt         | -0,0542 %              | 0,0016 %                      |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die grafische Darstellung der Ergebnisse für  $\epsilon_z$ . In diesem Fall wurde die Kurve für die Ergebnisse außenseitig am Steg dargestellt. Die beiden anderen Kurven liegen auf der konservativen Seite und verlaufen analog zur dargestellten Kurve.

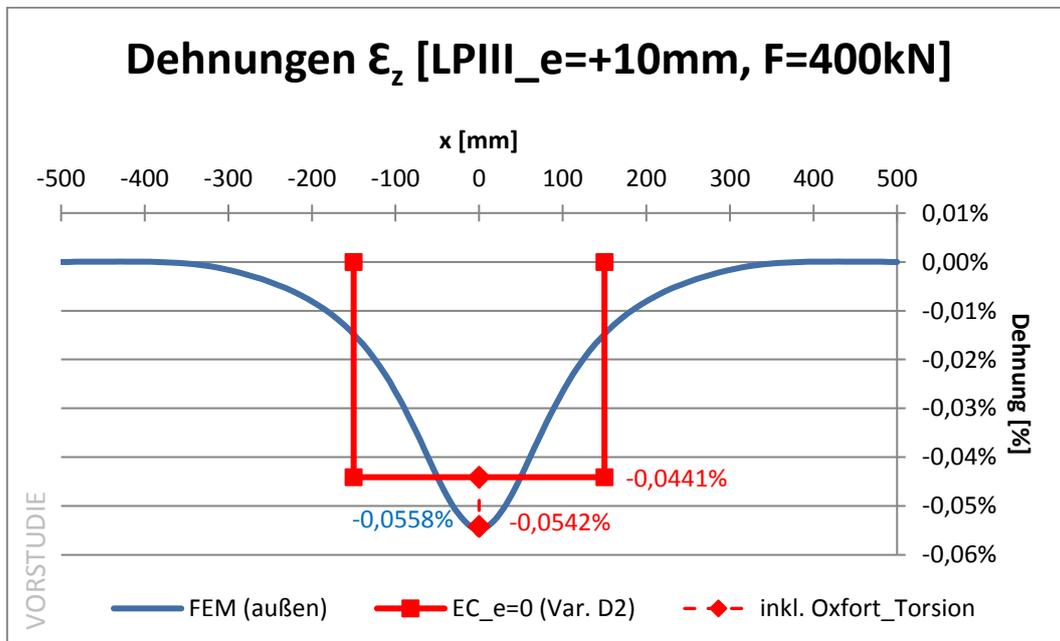


Abbildung 3.28: Dehnungsdiagramm LP III, Exzentrizität +10 mm, Vorstudie

### 3.2.13 LP III, Exzentrizität: +20 mm

Nachfolgend werden die Spannungen und die Dehnungen jeweils grafisch dargestellt und auch die Werte tabellarisch erfasst.

Tabelle 3.25: Übersicht der Ergebnisse und Spannungsdifferenzen

|                          | Maximales $\sigma_z$           | Delta =  FEM (außen)  -  WERT |
|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| <b>FEM (außenseitig)</b> | <b>-133,8 N/mm<sup>2</sup></b> | <b>0,0 N/mm<sup>2</sup></b>   |
| FEM (Stegmitte)          | -113,9 N/mm <sup>2</sup>       | 19,9 N/mm <sup>2</sup>        |
| FEM (innenseitig)        | -106,6 N/mm <sup>2</sup>       | 27,1 N/mm <sup>2</sup>        |
| EC_gesamt                | -138,8 N/mm <sup>2</sup>       | - 5,0 N/mm <sup>2</sup>       |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die Spannungen der drei gemessenen Pfade und in roter Farbe den maximalen Normwert. Alle Werte sind in N/mm<sup>2</sup> angegeben.

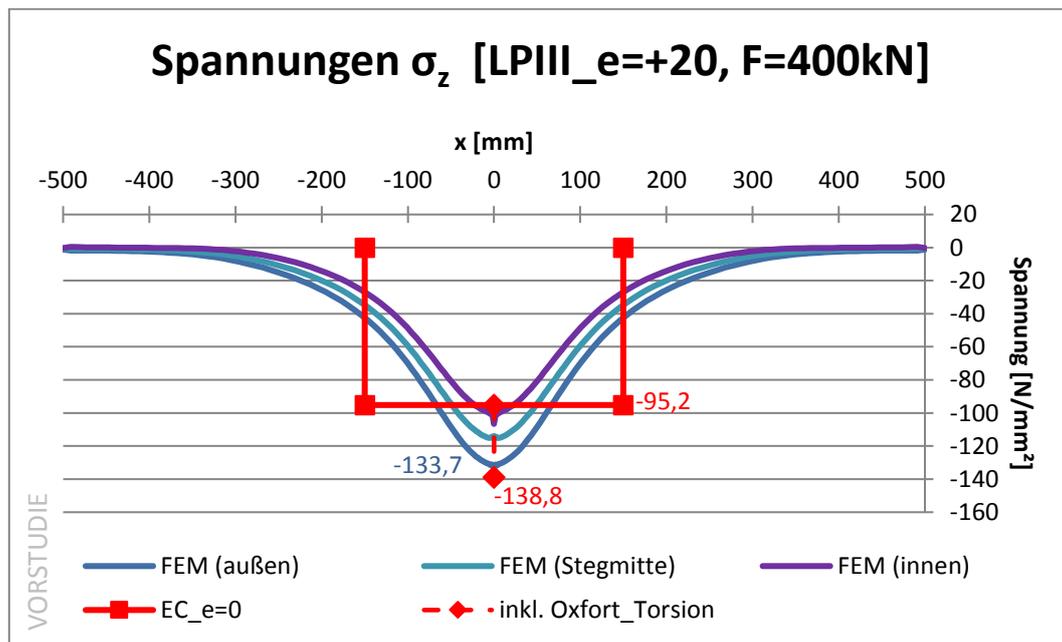


Abbildung 3.29: Spannungsdiagramm LP III, Exzentrizität +20 mm, Vorstudie

Auch hier bei einer Exzentrizität von  $e = 20$  mm passen die Oxford-Werte gut zu den Ergebnissen aus der FEM-Berechnung. Man kann also erkennen, dass die Werte für LP III gut zusammenpassen, für LP I (also dem System mit Längssteifen) sind die Werte der Norm zu hoch (vgl. Abb. 3.19).

Die nachstehende Tabelle zeigt den maximalen Wert für  $\epsilon_z$  der FEM-Berechnung und die Norm-Werte, die mit den zwei verschiedenen Varianten berechnet wurden. In der dritten Spalte ist der Absolutwert der Abweichung zwischen FEM-Ergebnis und Normberechnung gegeben.

Tabelle 3.26: Übersicht der Ergebnisse und Dehnungsdifferenzen

|                   | Maximales $\epsilon_z$ | Delta =  FEM (außen)  -  WERT |
|-------------------|------------------------|-------------------------------|
| FEM (außenseitig) | <b>-0,0594%</b>        | 0,0000 %                      |
| FEM (Stegmitte)   | -0,0521 %              | 0,0073 %                      |
| FEM (innenseitig) | -0,0487 %              | 0,0107 %                      |
| EC_e=0 (Var. D1)  | -0,0453 %              |                               |
| EC_e=0 (Var. D2)  | -0,0441 %              |                               |
| EC_gesamt         | -0,0643 %              | - 0,0049 %                    |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die grafische Darstellung der Ergebnisse für  $\epsilon_z$ . In diesem Fall wurde die Kurve für die Ergebnisse außenseitig am Steg dargestellt. Die beiden anderen Kurven liegen auf der konservativen Seite und analog zur dargestellten Kurve.

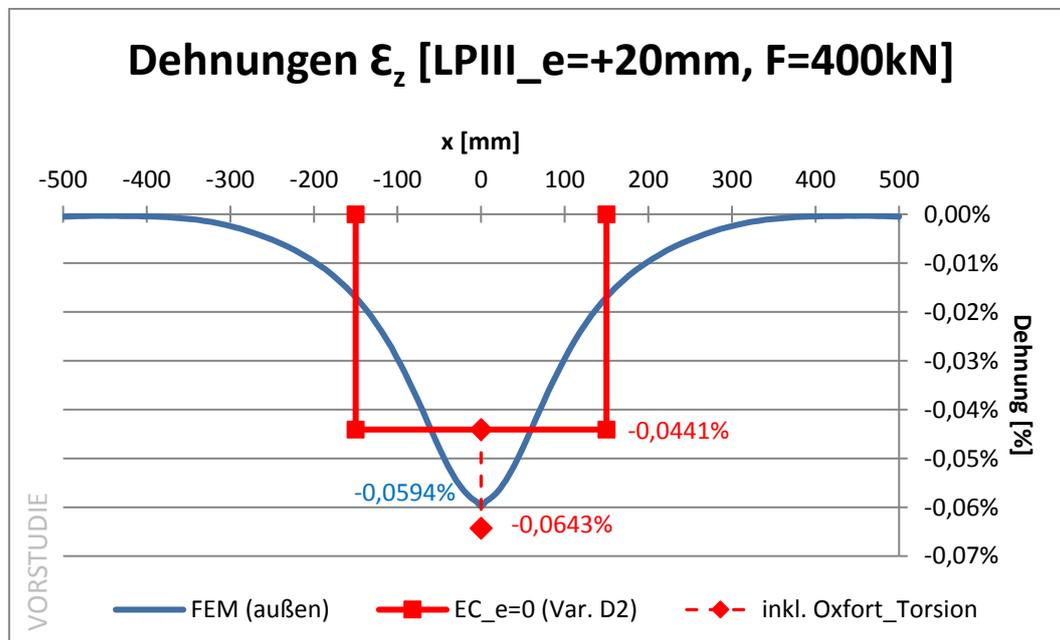


Abbildung 3.30: Dehnungsdiagramm LP III, Exzentrizität +20 mm, Vorstudie

3.2.14 LP III, Exzentrizität: -10 mm

Nachfolgend werden die Spannungen und die Dehnungen jeweils grafisch dargestellt und auch die Werte tabellarisch erfasst.

Tabelle 3.27: Übersicht der Ergebnisse und Spannungsdifferenzen

|                          | <b>Maximales <math>\sigma_z</math></b> | <b>Delta =  FEM (innen)  -  WERT </b> |
|--------------------------|--|---------------------------------------|
| FEM (außenseitig)        | -106,9 N/mm <sup>2</sup>               | 24,5 N/mm <sup>2</sup>                |
| FEM (Stegmitte)          | -113,5 N/mm <sup>2</sup>               | 18,0 N/mm <sup>2</sup>                |
| <b>FEM (innenseitig)</b> | <b>-131,4 N/mm<sup>2</sup></b>         | <b>0,0 N/mm<sup>2</sup></b>           |
| EC_gesamt                | -117,0 N/mm <sup>2</sup>               | 14,4 N/mm <sup>2</sup>                |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die Spannungen der drei gemessenen Pfade und in roter Farbe den maximalen Normwert. Alle Werte sind in N/mm<sup>2</sup> angegeben.

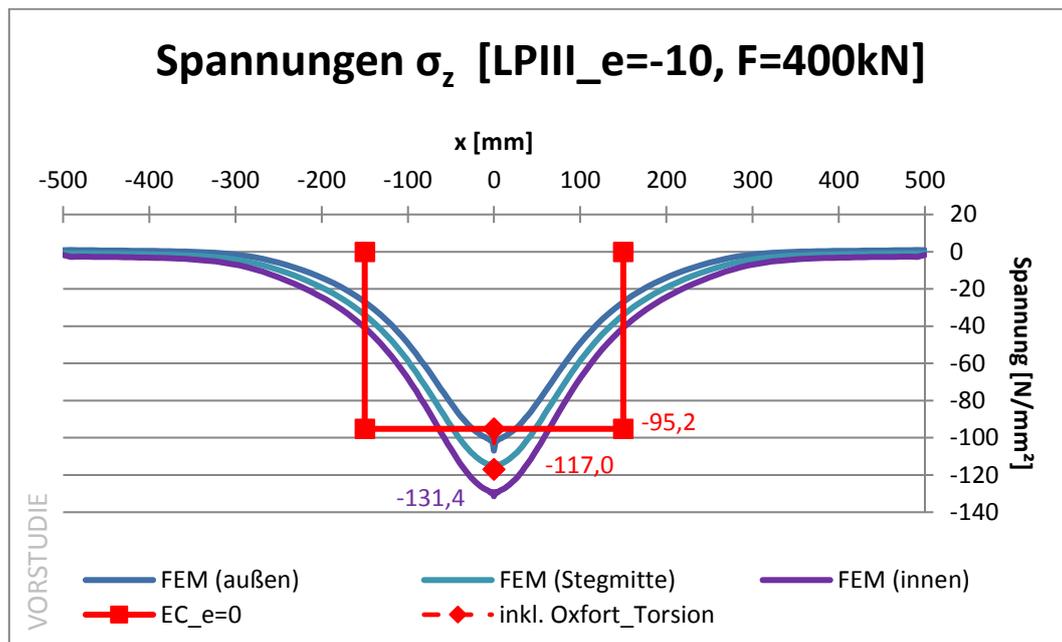


Abbildung 3.31: Spannungsdiagramm LP III, Exzentrizität -10 mm, Vorstudie

Die Tabelle 3.28 zeigt den maximalen Wert für  $\varepsilon_z$  der FEM-Berechnung und die Normwerte, die mit den zwei verschiedenen Varianten berechnet wurden. In der dritten Spalte ist der Absolutwert der Abweichung zwischen FEM-Ergebnis und Normberechnung gegeben.

Tabelle 3.28: Übersicht der Ergebnisse und Dehnungsdifferenzen

|                          | Maximales $\varepsilon_z$ | Delta =  FEM (außen)  -  WERT |
|--------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| FEM (außenseitig)        | -0,0491 %                 | 0,0098 %                      |
| FEM (Stegmitte)          | -0,0522 %                 | 0,0067 %                      |
| <b>FEM (innenseitig)</b> | <b>-0,0589 %</b>          | <b>0,0000 %</b>               |
| EC_e=0 (Var. D1)         | -0,0453 %                 |                               |
| EC_e=0 (Var. D2)         | -0,0441 %                 |                               |
| EC_gesamt                | -0,0542 %                 | 0,0047 %                      |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die grafische Darstellung der Ergebnisse für  $\varepsilon_z$ . In diesem Fall wurde die Kurve für die Ergebnisse außenseitig am Steg dargestellt. Die beiden anderen Kurven liegen auf der konservativen Seite und verlaufen analog zur dargestellten Kurve.

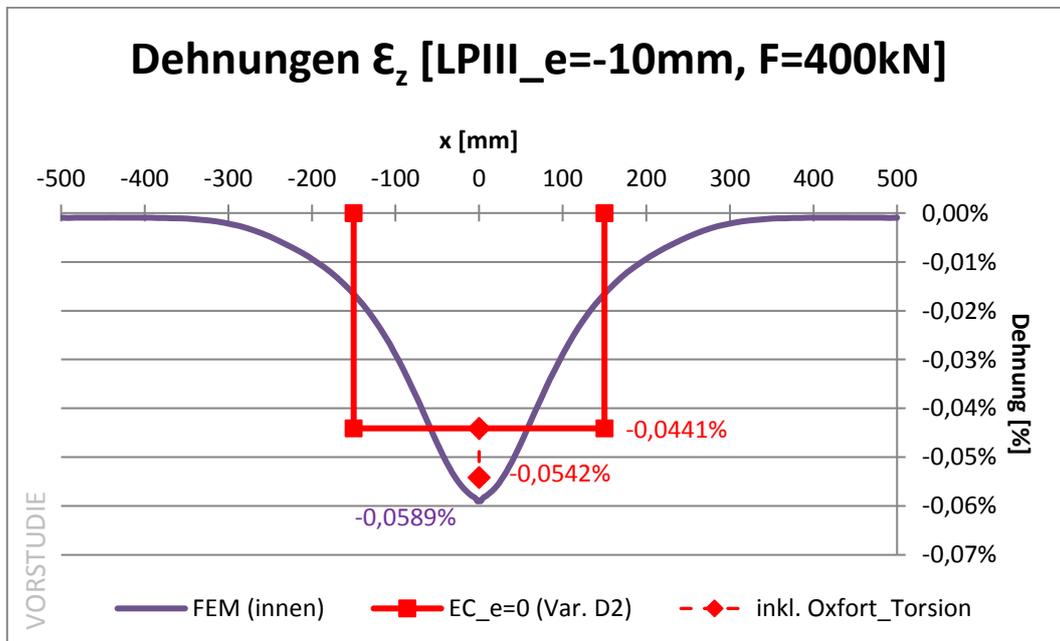


Abbildung 3.32: Dehnungsdiagramm LP III, Exzentrizität -10 mm, Vorstudie

3.2.15 LP III, Exzentrizität: -20 mm

Nachfolgend werden die Spannungen und die Dehnungen jeweils grafisch dargestellt und auch die Werte tabellarisch erfasst.

Tabelle 3.29: Übersicht der Ergebnisse und Spannungsdifferenzen

|                          | Maximales $\sigma_z$           | Delta =  FEM (außen)  -  WERT |
|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| FEM (außenseitig)        | -98,3 N/mm <sup>2</sup>        | 41,4 N/mm <sup>2</sup>        |
| FEM (Stegmitte)          | -113,4 N/mm <sup>2</sup>       | 26,3 N/mm <sup>2</sup>        |
| <b>FEM (innenseitig)</b> | <b>-139,7 N/mm<sup>2</sup></b> | <b>0,0 N/mm<sup>2</sup></b>   |
| EC_gesamt                | -138,8 N/mm <sup>2</sup>       | 0,9 N/mm <sup>2</sup>         |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die Spannungen der drei gemessenen Pfade und in roter Farbe den maximalen Normwert. Alle Werte sind in N/mm<sup>2</sup> angegeben.

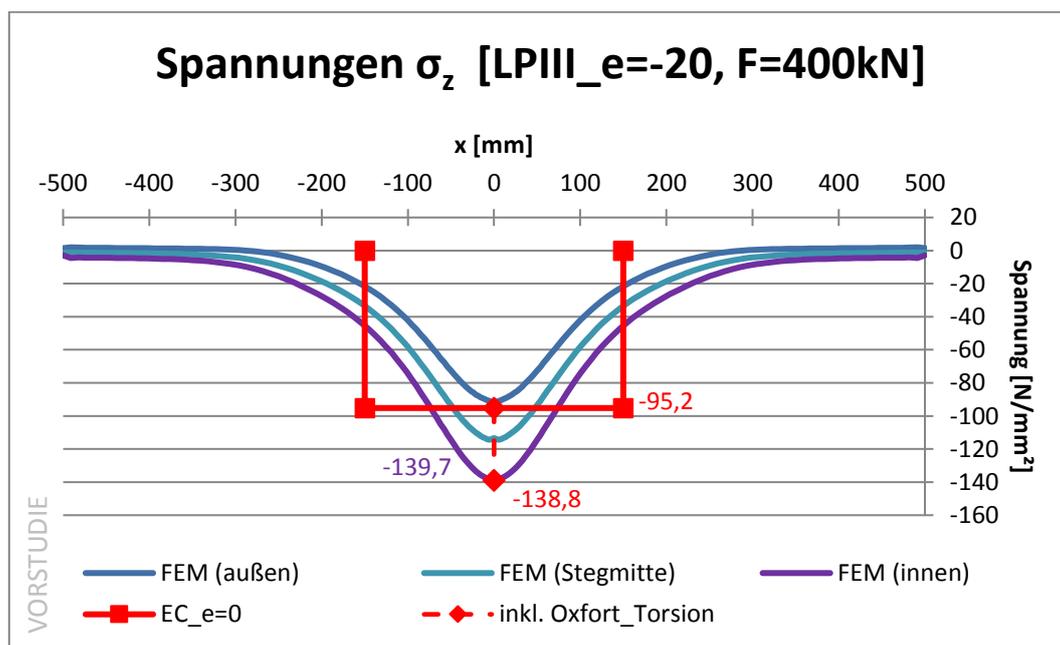


Abbildung 3.33: Spannungsdiagramm LP III, Exzentrizität -20 mm, Vorstudie

Man erkennt, dass die Spannung zentrisch laut Norm etwas kleiner ist als das FEM-Ergebnis in Stegmitte. Die Biegung laut Oxford ist etwas größer, wodurch sich in Summe wieder eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse ergibt.

Die nachstehende Tabelle zeigt den maximalen Wert für  $\epsilon_z$  der FEM-Berechnung und die Norm-Werte, die mit den zwei verschiedenen Varianten berechnet wurden. In der dritten Spalte ist der Absolutwert der Abweichung zwischen FEM-Ergebnis und Normberechnung gegeben.

Tabelle 3.30: Übersicht der Ergebnisse und Dehnungsdiagramme

|                          | Maximales $\epsilon_z$ | Delta =  FEM (innen)  -  WERT |
|--------------------------|------------------------|-------------------------------|
| FEM (außenseitig)        | -0,0458 %              | 0,0165 %                      |
| FEM (Stegmitte)          | -0,0523 %              | 0,0100 %                      |
| <b>FEM (innenseitig)</b> | <b>-0,0623 %</b>       | <b>0,0000 %</b>               |
| EC_e=0 (Var. D1)         | -0,0453 %              |                               |
| EC_e=0 (Var. D2)         | -0,0441 %              |                               |
| EC_gesamt                | -0,0643 %              | - 0,0020 %                    |

Das nachfolgende Diagramm zeigt die grafische Darstellung der Ergebnisse für  $\epsilon_z$ . In diesem Fall wurde die Kurve für die Ergebnisse außenseitig am Steg dargestellt. Die beiden anderen Kurven liegen auf der konservativen Seite und verlaufen analog zur dargestellten Kurve.

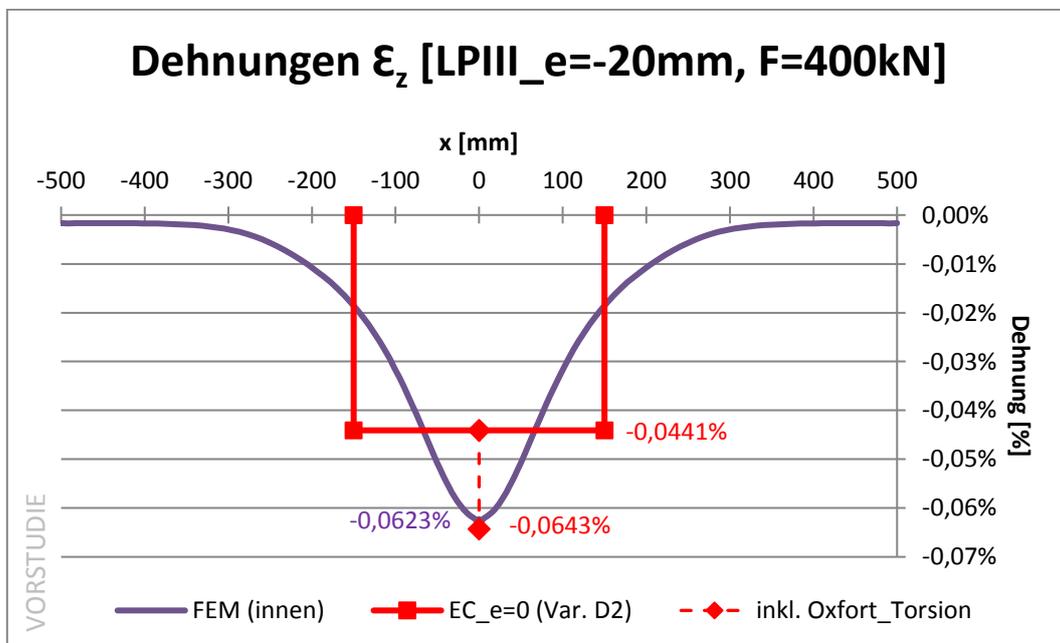


Abbildung 3.34: Dehnungsdiagramm LP III, Exzentrizität -20 mm, Vorstudie

## 4 Laborversuche

Dieses Kapitel gibt einen Einblick in die Laborversuche, die an einem Hohlkasten-Kranbahnträger durchgeführt wurden. Zuerst wird das theoretische Prüfkonzept erläutert, danach werden die Anpassungen an die Baupraxis angeführt und zum Schluss ein Vergleich zwischen den unterschiedlichen Lastaufbringungsformen gezogen.

### 4.1 Prüfkonzept

Die Laborversuche wurden, wie in Abschnitt 1.2 schon erläutert, an einem Hohlkasten-Kranbahnträger durchgeführt und während der Planungsphase wurde ein Prüfkonzept festgelegt. Die vertikale Radlast wurde unabhängig an drei Positionen (LP I bis LP III) auf die Schiene des Kranbahnträgers aufgebracht (siehe Abbildung 4.1) bei unterschiedlicher Lagerung des Trägers. Daher wird in dieser Arbeit auch von System LP I, LP II und LP III gesprochen.

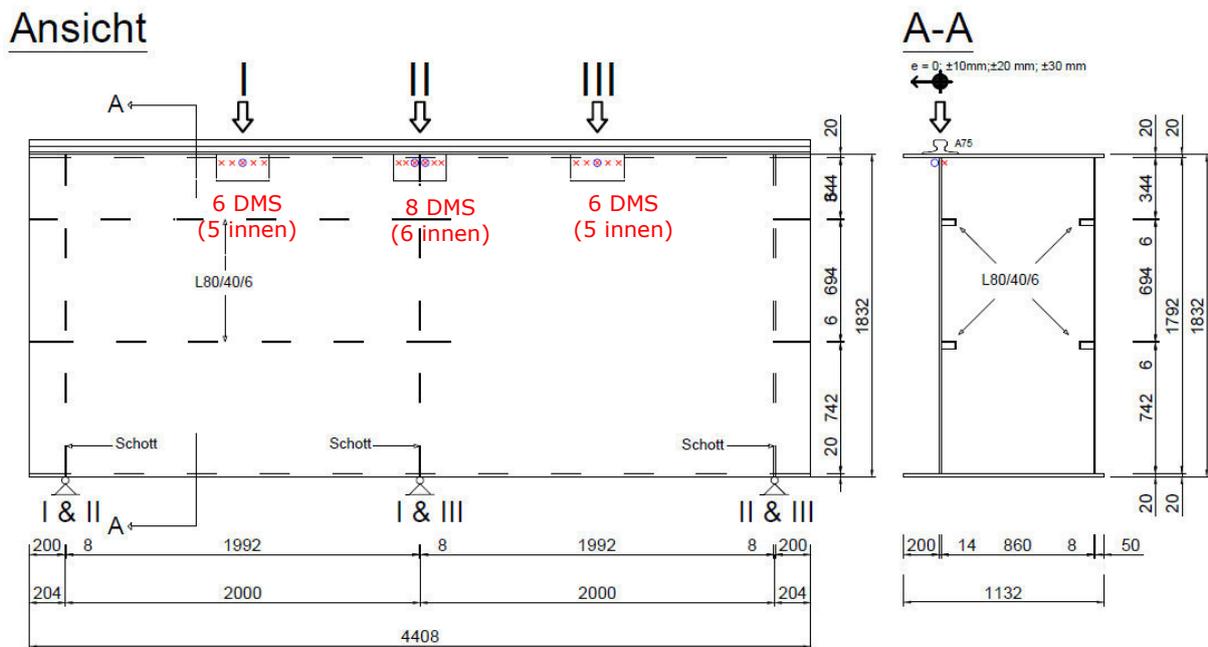


Abbildung 4.1: Bildliche Darstellung des Prüfbereichs (3 Einzelversuche mit unterschiedlicher Lagerung) und Skizze des Trägers

Dabei handelt es sich bei System LP I um das linke Trägerstück mit einer Länge zwischen den Auflagern von  $l=2000$  mm und es besitzt an beiden Auflagern jeweils ein Schott. Des Weiteren gibt es Längssteifen in den Stegen mit einem L80/40/6-Profil. An der Messstelle unter der Radlast wurden sechs Dehnmessstreifen (DMS) angebracht, wovon sich fünf (DMS 1 bis DMS 5) an der Innenseite des Trägers und einer (DMS 6) an der Außenseite des Trägers befinden. Zusätzlich wurde eine bildgebende Dehnungsermittlung, das sogenannte Mercury-System, installiert und verwendet.

Bei der Belastung des Systems LP II wurde das mittlere Auflager entfernt, sodass der Träger nun eine Stützweite von 4000 mm aufweist. Wie bereits erwähnt, befindet sich direkt unter der Lasteinleitungsstelle ein Schott, sowie auch an den beiden Auflagerpunkten. Zusätzlich befinden sich in der linken Hälfte des Trägers zwei Längssteifen (L80/40/6)

in jedem Steg. Diese Stelle direkt unter der Radlast wurde mit acht DMS bestückt, wobei sich sechs (DMS 7 bis DMS 12) an der Innenseite des Trägers befanden und zwei (DMS 13 und DMS 14) an der Außenseite. Zusätzlich wurde wieder das Mercury-System an der Außenseite eingesetzt.

Der Versuchsaufbau für das System LP III ist sehr ähnlich zu System LP I, allerdings befinden sich in diesem rechten Trägerabschnitt keine Längssteifen im Steg unter der Kran-schiene. Diese wurden zuvor mechanisch entfernt. Die Länge zwischen den Auflagern beträgt auch hier 2000 mm und an den Auflagern befindet sich jeweils ein Schott. Auch an dieser Stelle wurden unter der Radlast sechs DMS eingesetzt, wiederum fünf (DMS 1 bis DMS 5) an der Innenseite des Trägers und einer (DMS 6) an der Außenseite. Es wurde abermals das Mercury-System zur bildgebenden Auswertung an der Außenseite verwendet.

Jede dieser Messstellen wurde mehrmals mit unterschiedlichen Lasteinleitungspunkten (mit und ohne Exzentrizität) belastet. Wie schon in der Vorstudie beschrieben, sollte die Lastaufbringung jeweils zentrisch (Stegmitte ist der Bezugspunkt für die Exzentrizität  $e=0$ ), und exzentrisch in einem Abstand von  $e=\pm 10$  mm und von  $e=\pm 20$  mm (entspricht ungefähr  $k/4$ ) geprüft werden.

Bei dem verwendeten Prüfkörper handelt es sich um einen ausrangierten Hohlkasten-Träger, der jahrelang im Einsatz war.

## 4.2 Anpassungen an die Baupraxis

### 4.2.1 Schienenabnutzung

Wie bereits erwähnt, wurde für die Versuche ein Hohlkasten-Kranbahnträger verwendet, der zuvor auch schon in der Industrie im Einsatz war. Die Schiene, welche am Kranbahn-träger montiert ist, hat ein A 75-Profil. Die nominellen Abmessungen einer Schiene ohne Abnutzung sind in nachstehendem Bild zu erkennen.

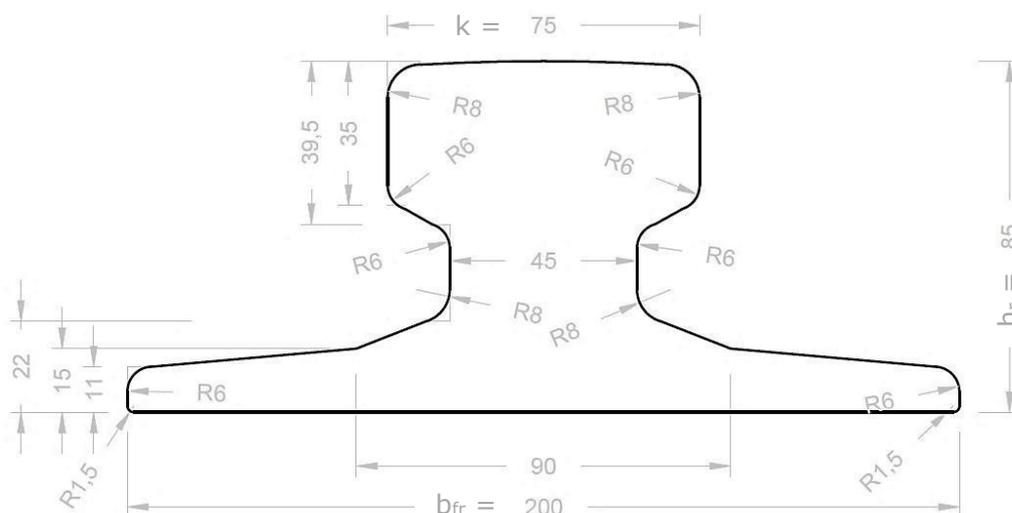


Abbildung 4.2: Schiene A75 ohne jegliche Abnutzung, bemaßt in Millimeter

Da die Schiene aber jahrelang im Einsatz war, hat sich das Profil A 75 mit der Zeit abgeschliffen. Die Schiene, so wie sie sich während der Versuche am Kranbahnträger befunden hat, ist in nachstehendem Foto (Abbildung 4.3) ersichtlich.



Abbildung 4.3: Fotografie der abgenutzten Schiene [Quelle: Markus Kettler, Februar 2018]

Die Schiene wurde anschließend mit AutoCAD gezeichnet und bemaßt (siehe Abbildung 4.4). Als Vereinfachung wurde die Unterkante im Modell eben ausgebildet. In der Realität ist die Schiene hier eingekerbt, da auf dem Kranbahnträger ein Blech und erst darauf die Schiene montiert war. Durch den Kranbetrieb hat sich das Unterlagsblech offenbar in den Schienenfuß eingedrückt (dies ist auch in Abbildung 4.3 erkennbar).

Abbildung 4.4 zeigt die beiden Begrenzungslinien im Vergleich. Dabei ist die Begrenzungslinie der nominellen Schiene vom Typ A 75 in schwarz und die abgenutzte Schiene in rot dargestellt. Man erkennt deutlich, dass die ursprüngliche Schiene an der Oberkante etwa vier Millimeter an Stahl durch Abschleiß verloren hat. Des Weiteren ist die Abrundung an der rechten Seite abgeflachter als an der linken Seite. An der Unterkante des Profils sind die Radien wesentlich kleiner geworden und die ehemals schräge Fläche an der Schienenkopfunterseite ist jetzt beinahe horizontal. Außerdem ist die Schiene an der Unterkante um zwei Millimeter breiter geworden und hat eine stärkere Rundung auf der rechten Seite bekommen.

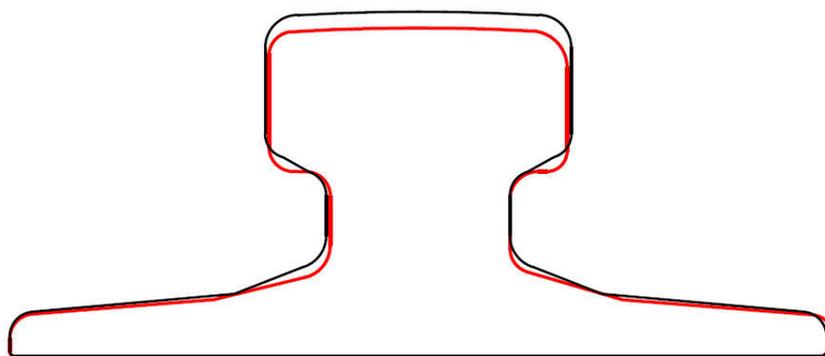


Abbildung 4.4: Schienenvergleich (schwarz: A 75; rot: abgenutzte Schiene im Versuch)

Abbildung 4.5 zeigt die abgeschliffene und in Millimeter bemaßte Schiene. Diese Skizze ist vor allem für die FEM-Berechnungen zum Ergebnisvergleich mit den Versuchsdaten relevant, da die Schiene im Modell genau mit diesen Abmessungen eingefügt wurde.

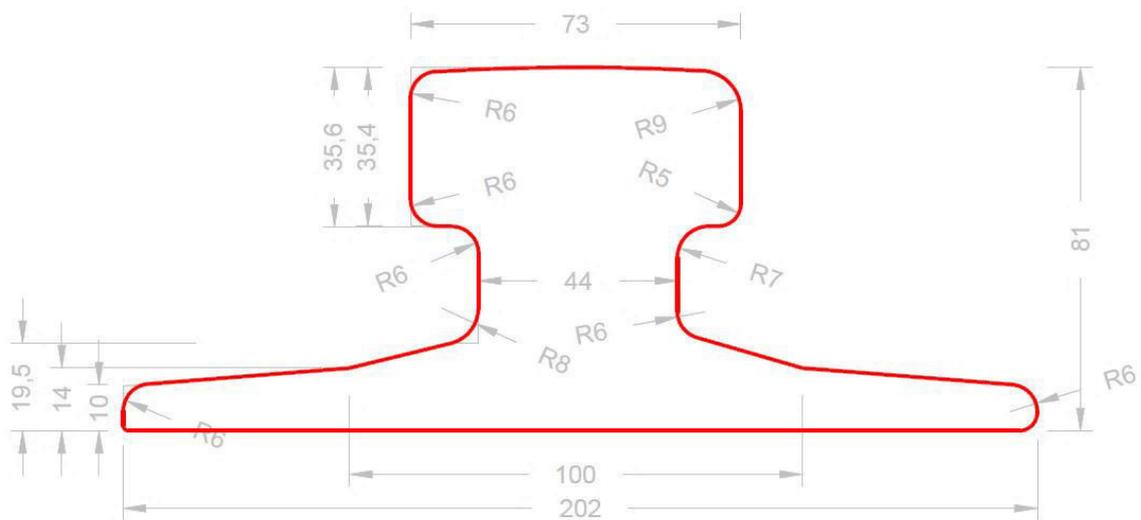


Abbildung 4.5: Abgeschliffene Schiene im Versuch, bemaßt in Millimeter

Um eine einfachere Formgebung der abgeschliffenen Schiene zu finden und um die Schiene in die Abaqus-Modelle leichter einzugliedern, wurde eine weitere Skizze zum Schienenvergleich angefertigt. Diese zeigt nun die Schienen ohne Rundungen, wobei die verschobenen Punkte bzw. Linien in Millimeter bemaßt sind (siehe Abbildung 4.6). Auch hier ist die Schiene vom Typ A 75 in schwarz dargestellt und die Schiene mit der Abnutzung in rot. Dieser rote Querschnitt wurde in weiterer Folge für die FEM-Berechnung verwendet.

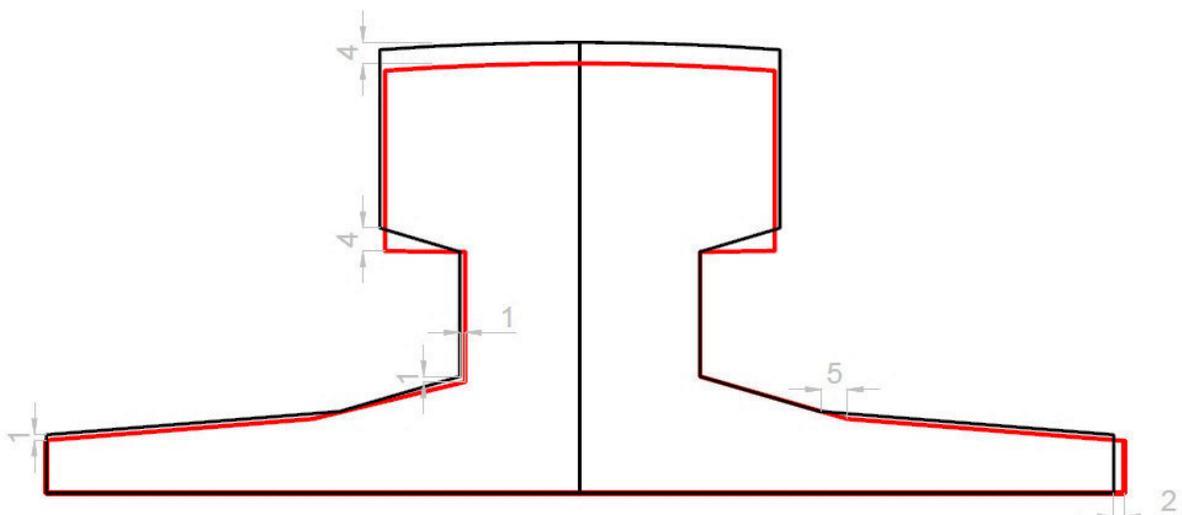


Abbildung 4.6: Idealisierter Schienenquerschnitt ohne Rundungen, bemaßt in Millimeter

#### 4.2.2 Anpassung des Versuchsausmaßes an die Schienenexzentrizität

Da die Schiene des Kranbahnträgers nicht in der Soll-Lage direkt über dem Steg ausgerichtet war, wurde das Prüfkonzept an die neuen Randbedingungen angepasst. Daher wurden die Exzentrizitäts-Werte auf die Ist-Lage am Versuchskörper, mit Bezug auf den Trägersteg, abgestimmt.

Das abgeänderte Versuchsausmaß umfasst nun 18 Versuche: An den Systemen LP I, II und III (siehe Kapitel 4.1) wurde der Laststempel in der Mitte des Stegs (Exzentrizität  $e=0$  mm), in der Lage  $e=+10$  mm,  $e=+20$  mm,  $e=+30$  mm und außerdem in der Lage  $e=-10$  mm aufgebracht (positive Exzentrizität nach außen). Für die Lasteinleitung wurde ein Laststempel mit sphärischer Oberflächenform verwendet, den man auch in Abbildung 4.9 erkennen kann. Damit konnte die gewünschte Exzentrizität sichergestellt werden. Darüber hinaus wurde in der Lage  $e=0$  mm (direkte Lasteinbringung über der Stegmitte) die Last auch mit einem Kranrad (siehe Abbildung 4.10) eingeleitet, wie in der Baupraxis vorliegend. Alle Versuche wurden sowohl mit den Dehnmessstreifen, als auch mit dem Mercury-System überwacht. Hierbei hat sich die Anordnung zu dem geplanten Prüfkonzept nicht geändert.

In Abbildung 4.7 erkennt man den Kranbahnträger während des Versuchsaufbaus mit den Einrichtungen für die Lastaufbringung. Abbildung 4.8 zeigt die Schiene von oben mit den Abdrücken, die der Stempel nach den Versuchen hinterlassen hat. In Abbildung 4.9 sieht man den Laststempel und im Gegensatz dazu erkennt man in Abbildung 4.10 das Kranrad. Weiters sieht man in Abbildung 4.10 auch noch die Mercury-Kameras. Die Abbildung 4.11 zeigt die Dehnmessstreifen an der Innenseite des Trägers und in der Abbildung 4.12 kann man den Innenraum des Kastenträgers erkennen.

In Abbildung 4.13 sind detailliert die Punkte der Lasteinleitung auf der Kranschiene erkennbar.



Abbildung 4.7: Versuchsaufbau  
[Quelle: Markus Kettler, Februar 2018]

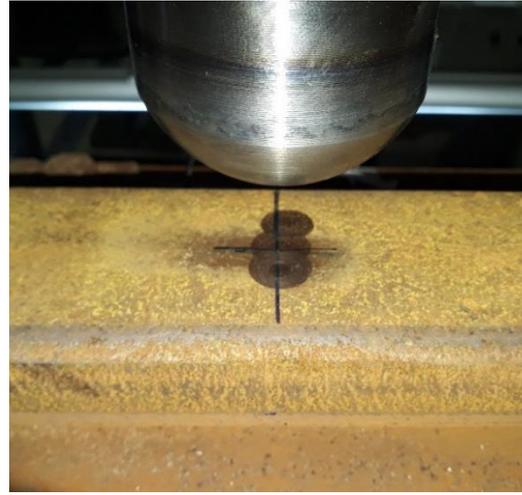


Abbildung 4.8: Laststempel auf der Schiene  
[Quelle: Markus Kettler, Februar 2018]



Abbildung 4.9: Laststempel  
[Quelle: Markus Kettler, Februar 2018]

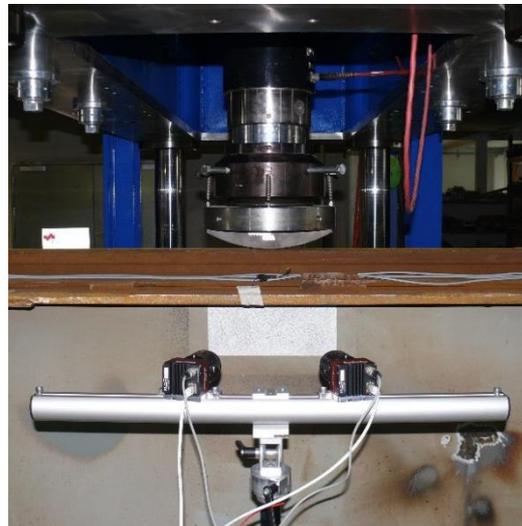


Abbildung 4.10: Kranrad  
[Quelle: Markus Kettler, Februar 2018]



Abbildung 4.11: DMS am Träger (innen)  
[Quelle: Markus Kettler, Februar 2018]

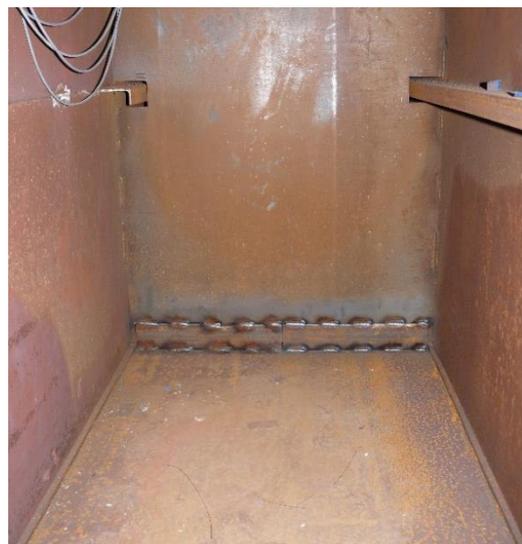


Abbildung 4.12: Innenraum des Trägers  
[Quelle: Markus Kettler, Februar 2018]

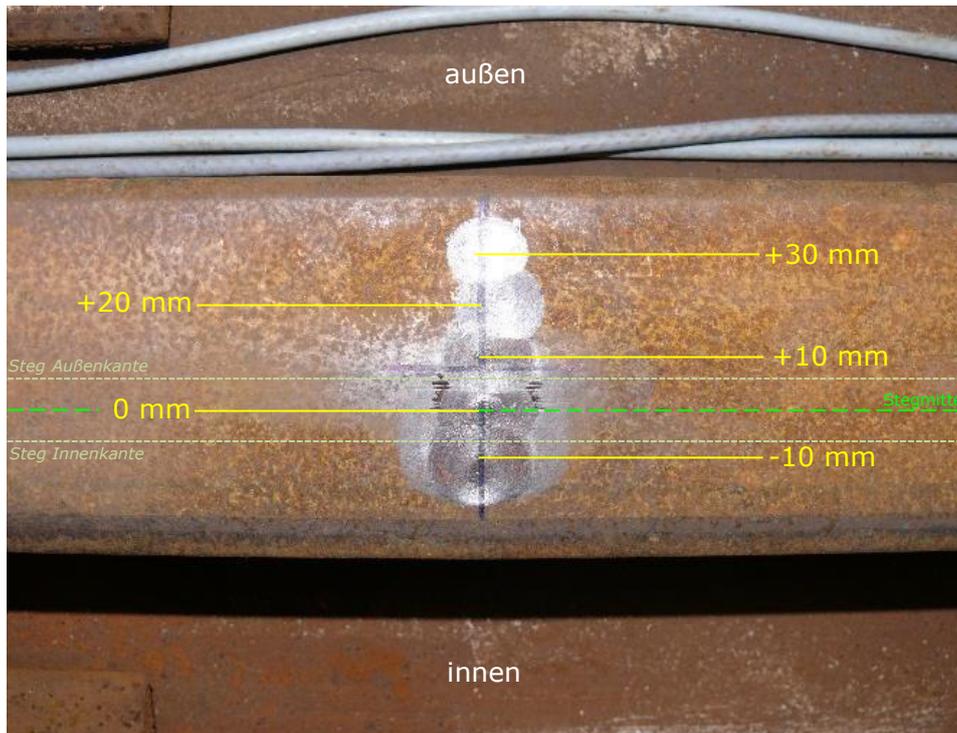


Abbildung 4.13: Positionen der Lasteinleitung [Quelle: Markus Kettler, Februar 2018]

In nachstehender Tabelle sind die Radlasten der 18 durchgeführten Versuche zusammengefasst:

Tabelle 4.1: Durchgeführte Versuche

|        | Exzentrizität      | Maximale Last F |
|--------|--------------------|-----------------|
| LP I   | e = +10 mm         | 501,77 kN       |
|        | e = +20 mm         | 443,64 kN       |
|        | e = +30 mm         | 332,71 kN       |
|        | e = 0 mm (Stempel) | 578,98 kN       |
|        | e = 0 mm (Rad)     | 734,99 kN       |
|        | e = -10 mm         | 590,01 kN       |
| LP II  | e = +10 mm         | 772,14 kN       |
|        | e = +20 mm         | 773,43 kN       |
|        | e = +30 mm         | 728,35 kN       |
|        | e = 0 mm (Stempel) | 780,66 kN       |
|        | e = 0 mm (Rad)     | 787,65 kN       |
|        | e = -10 mm         | 828,02 kN       |
| LP III | e = +10 mm         | 546,16 kN       |
|        | e = +20 mm         | 461,02 kN       |
|        | e = +30 mm         | 408,64 kN       |
|        | e = 0 mm (Stempel) | 538,11 kN       |
|        | e = 0 mm (Rad)     | 705,10 kN       |
|        | e = -10 mm         | 788,42 kN       |

### 4.3 Vergleich Lastaufbringung: Laststempel vs. Kranrad

Wie bereits in Kapitel 4.2.2 erwähnt, wurden verschiedene Lastaufbringungsvarianten getestet: zum einen war das ein sphärischer Laststempel, zum anderen ein Kranrad (auch zu erkennen in Abbildung 4.15 und Abbildung 4.17). Der Druckstempel verfügt über einen Radius von 40 Millimeter, das Kranrad über einen Radius von 300 Millimeter (siehe nachstehende Abbildungen für die detaillierte Form).

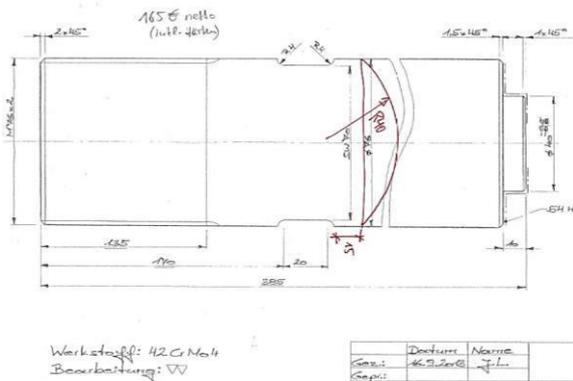


Abbildung 4.14: Laststempel (Plandarstellung)  
 [Quelle: Markus Kettler, Februar 2018]



Abbildung 4.16: Laststempel (Foto)  
 [Quelle: Markus Kettler, Februar 2018]

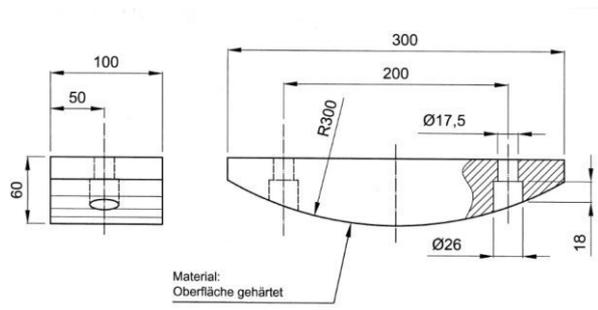


Abbildung 4.15: Kranrad (Plandarstellung)  
 [Quelle: Markus Kettler, Februar 2018]



Abbildung 4.17: Kranrad (Foto)  
 [Quelle: Markus Kettler, Februar 2018]

In diesem Kapitel wird nun ein Ergebnisvergleich der beiden Lastaufbringungsformen an- gestellt. Dies erfolgt deshalb, da normalerweise auf dem Kranbahnträger ein Kran fährt und die Lasteinleitung deshalb über ein Kranrad erfolgt. Bei Laborversuchen können aber exzentrische Lasten nur in definierter Weise mit einem Stempel aufgebracht werden, da man die Last gezielt einleiten kann. Dieses Kapitel dient nun der Aufklärung, ob diese beiden Varianten der Radlasteinleitung ähnliche Ergebnisse liefern. Es wird das System LP I ohne Exzentrizität näher betrachtet und darauf geschlossen, dass sich die Versuche an den beiden anderen Systemen analog verhalten.

Zuerst einmal wird die Kraft-Dehnungs-Beziehung der beiden Varianten verglichen. Das erste Diagramm in Abbildung 4.18 zeigt die F- $\epsilon$ -Beziehung von dem Versuch mit dem Last- stempel (LPI\_e=0mm\_Stempel), das zweite Diagramm (in Abbildung 4.19) jene mit dem Kranrad (LPI\_e=0mm\_Rad). Dabei muss erwähnt werden, dass bei der Lasteinleitung mit

dem Stempel die Last nicht so hoch gesteigert werden konnte wie beim Rad, da es auf der Schienenoberkante zu Verformungen und zu einem leichten Eindringen gekommen ist.

Alle sechs Dehnmessstreifen zeigen die vertikalen Dehnungen in einem Abstand von 30 mm von der Obergurtunterkante (davon befanden sich DMS 1 bis DMS 5 an der Steginnenseite und DMS 6 an der Stegaußenseite).

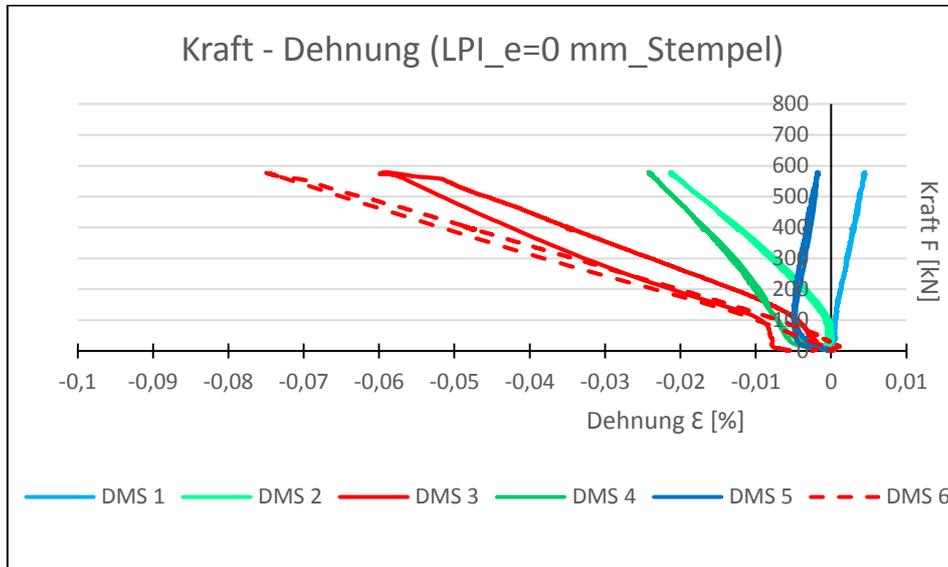


Abbildung 4.18: F-ε-Diagramm für LP I, e=0 mm, Stempel als Lastaufbringung

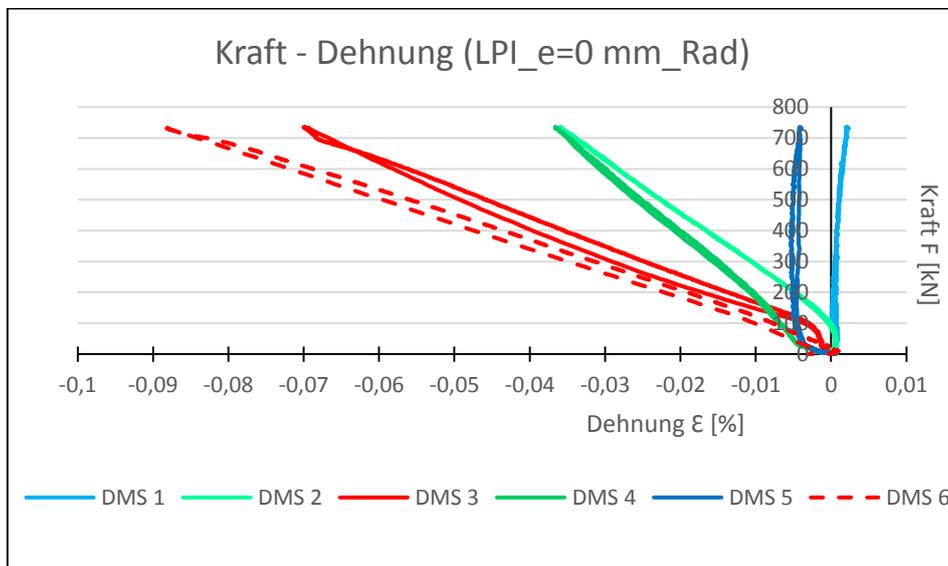


Abbildung 4.19: F-ε-Diagramm für LP I, e=0 mm, Kranrad als Lastaufbringung

Um einen guten visuellen Vergleich zu schaffen, wurden sowohl die Abszisse als auch die Ordinate mit denselben Werten skaliert. Beim Betrachten der beiden Diagramme fällt auf, dass die Verläufe der einzelnen DMS große Ähnlichkeiten aufweisen. Beispielweise weist der Verlauf des Dehnmessstreifen 1 in beiden Fällen positive Dehnungen auf. Alle anderen DMS haben beinahe durchgehend negative Dehnungen.

Bei der Lastaufbringung von 400 kN sind beim DMS 3 die Dehnungen:

| Kraft  | Stempel     | Kranrad     | Abweichung |
|--------|-------------|-------------|------------|
| 400 kN | -0,034883 % | -0,035499 % | 0,000616   |

Die Abweichungen sind also sehr gering, was man auch in nachstehenden Diagrammen der Abbildungen 4.20 bis 4.25 deutlich erkennen kann.

Als nächstes wurden die  $x$ - $\varepsilon$ -Diagramme analysiert, die den Längsverlauf der Dehnungen in Trägerlängsrichtung zeigen. Zur Erklärung der Diagramme: die Abszisse zeigt die exakte Position der DMS in Millimeter (je ein DMS an der Position  $x = \pm 220$  mm,  $x = \pm 100$  mm und  $x = 0$  mm) und die Ordinate die dazugehörigen Dehnungen  $\varepsilon$ . Diese Diagramme wurden für unterschiedliche Lasten  $F$  erstellt und sind in den Abbildungen 4.20 bis 4.25 dargestellt.

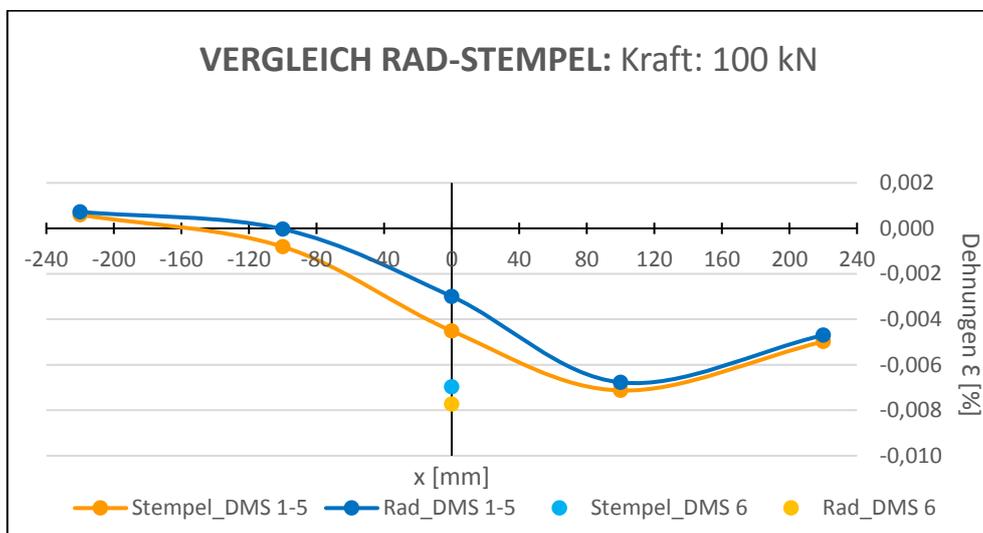


Abbildung 4.20: Vergleich Rad-Stempel,  $x$ - $\varepsilon$ -Diagramm für  $F=100$  kN

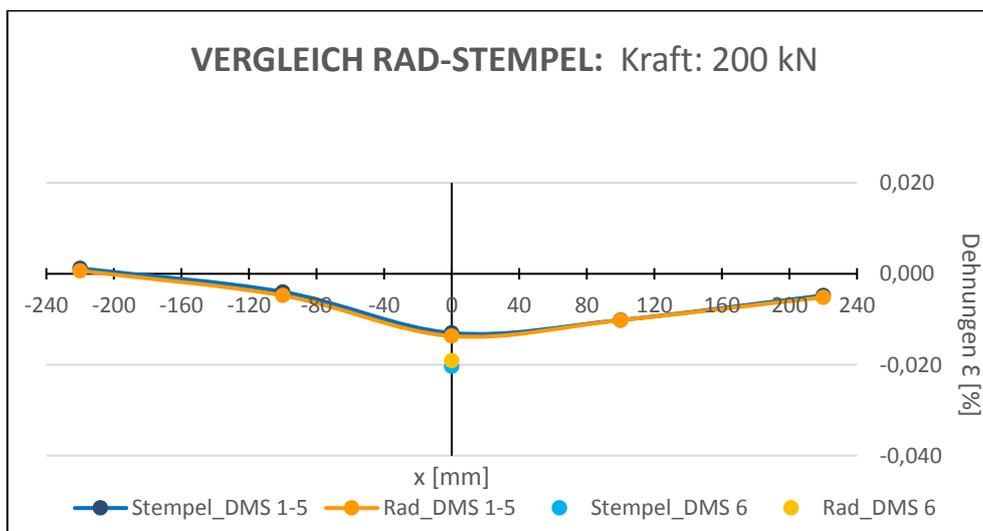


Abbildung 4.21: Vergleich Rad-Stempel,  $x$ - $\varepsilon$ -Diagramm für  $F=200$  kN

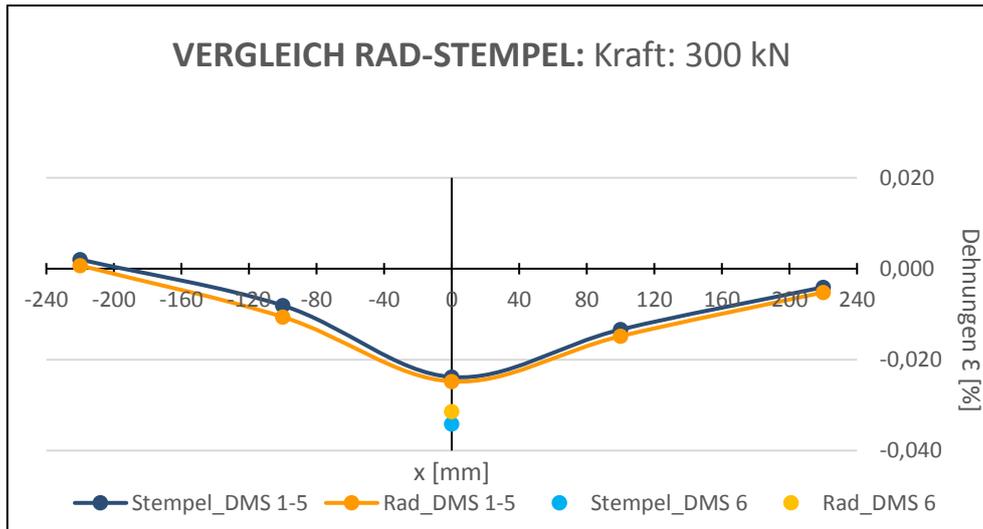


Abbildung 4.22: Vergleich Rad-Stempel, x-ε-Diagramm für F=300 kN

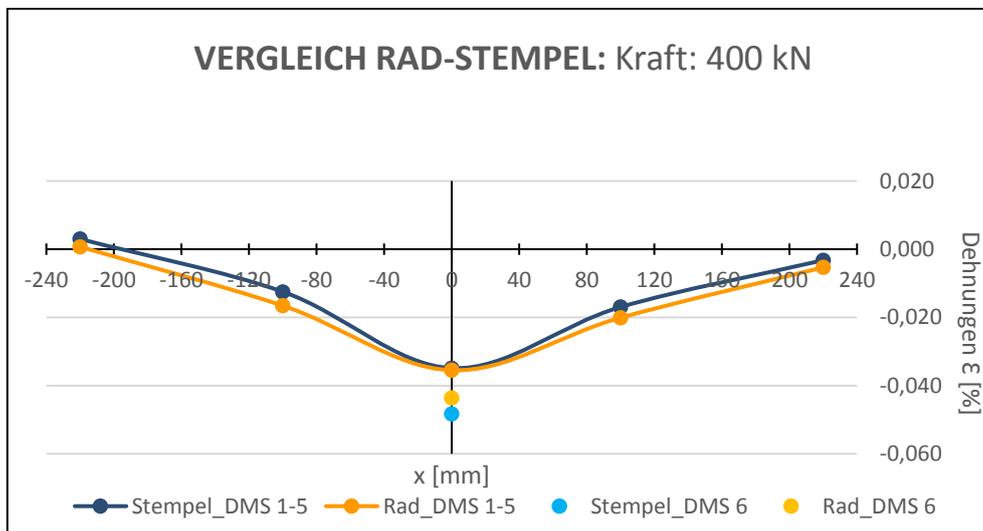


Abbildung 4.23: Vergleich Rad-Stempel, x-ε-Diagramm für F=400 kN

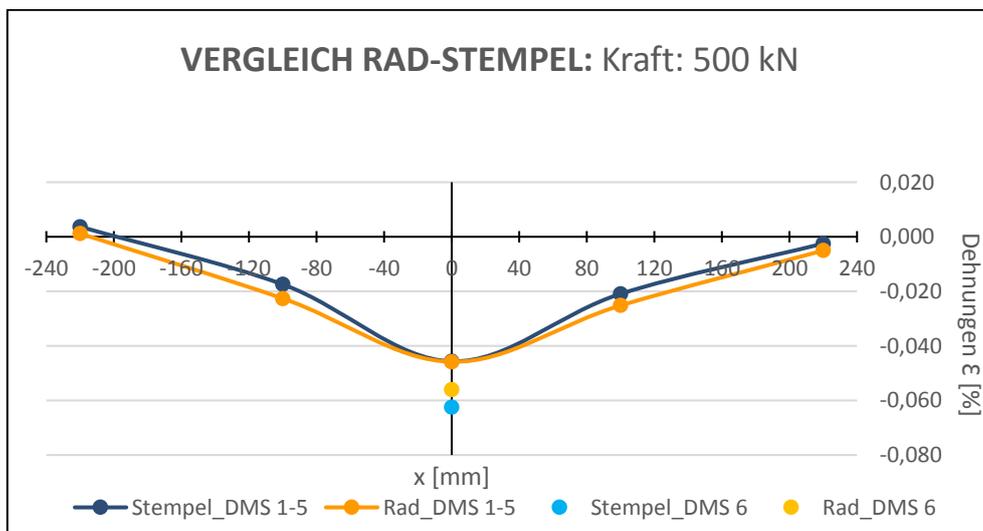


Abbildung 4.24: Vergleich Rad-Stempel, x-ε-Diagramm für F=500 kN

In den Darstellungen kann man sehr genau erkennen, dass die Übereinstimmung der beiden Lastaufbringungsmethoden mit steigender Last  $F$  zunimmt.

Die Last 578,9 kN ist die größte Last, die im Fall  $e=0$  mm mit dem Laststempel erreicht wurde und daher die größte zu vergleichende Last. Bringt man in diesem Diagramm der Abbildung 4.25 auch die Mercury-Daten ein, sieht es wie folgt aus:

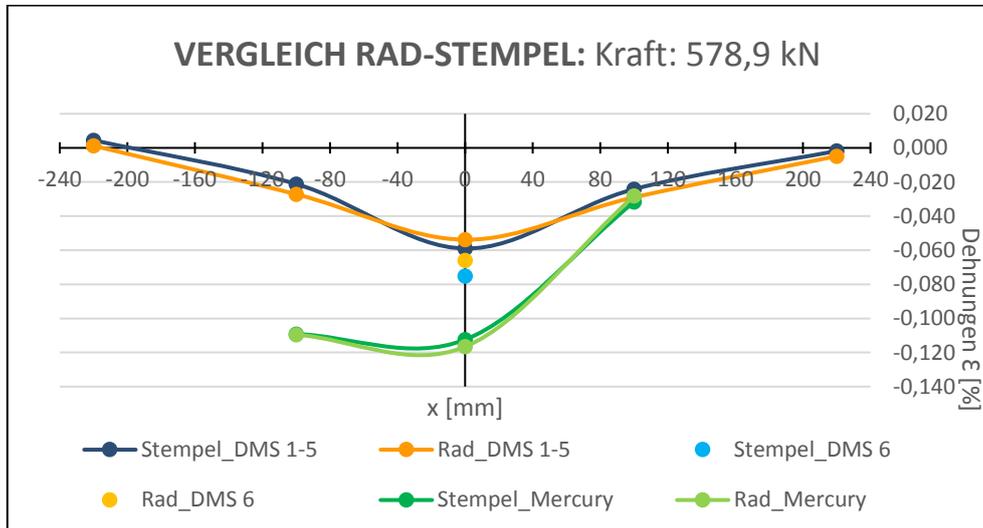


Abbildung 4.25: Vergleich Rad-Stempel,  $x$ - $\epsilon$ -Diagramm für die maximale Last  $F=578,9$  kN

Man erkennt ganz klar, dass auch in diesem Fall die Übereinstimmung sehr gut ist. Daraus kann man schließen, dass die Lastaufbringung mittels Stempel ausreichend genau ist für die Wiedergabe der Beanspruchungen aus einem Kranrad. In weiterer Folge werden nur die Versuche mit der Lastaufbringung in Stempelform verwendet und näher analysiert.

## 5 Auswertung der Laborversuche

In diesem Kapitel sind nun die Diagramme zur Auswertung der Laborversuche dargestellt. Es werden jeweils die Kraft-Dehnungs-Beziehungen (F- $\epsilon$ -Diagramme) für die gemessenen vertikalen Dehnungen, in einem Abstand von 30 mm von der Obergurtunterseite, dargestellt. Für das System LP II werden auch die x- $\epsilon$ -Diagramme, das heißt die Dehnungsverläufe in Trägerlängsrichtung, abgebildet. Die x- $\epsilon$ -Diagramme für die Systeme LP I und LP III werden im Kapitel 7.1 bei der Analyse der Ergebnisse und dem Ergebnisvergleich mit den FEM-Daten und der Normberechnung gemeinsam abgebildet.

### 5.1 System LP I

#### 5.1.1 Ergebnisse für die Exzentrizität $e=+10$ mm

Nachstehendes Diagramm zeigt die Kraft-Dehnungs-Beziehung, die beim Laborversuch erreicht wurde. Farblich dargestellt sind die verschiedenen Dehnmessstreifen. DMS 3 und DMS 6 befinden sich an derselben Stelle, wobei jedoch DMS 3 an der Innenseite und DMS 6 an der Außenseite des Trägers liegt. Alle anderen DMS liegen an der Innenseite.

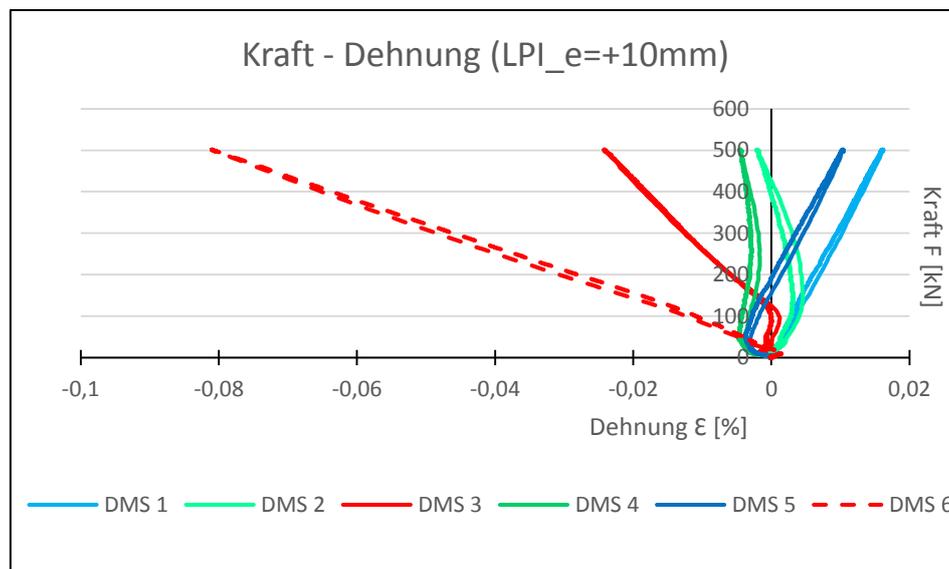


Abbildung 5.1: F- $\epsilon$ -Diagramm für LP I, Exzentrizität: +10 mm

### 5.1.2 Ergebnisse für die Exzentrizität $e=+20$ mm

Nachstehendes Diagramm zeigt die Kraft-Dehnungs-Beziehung, die beim Laborversuch erreicht wurde. Farblich dargestellt sind die verschiedenen Dehnmessstreifen. DMS 3 und DMS 6 befinden sich an derselben Stelle, wobei jedoch DMS 3 an der Innenseite und DMS 6 an der Außenseite des Trägers liegt.

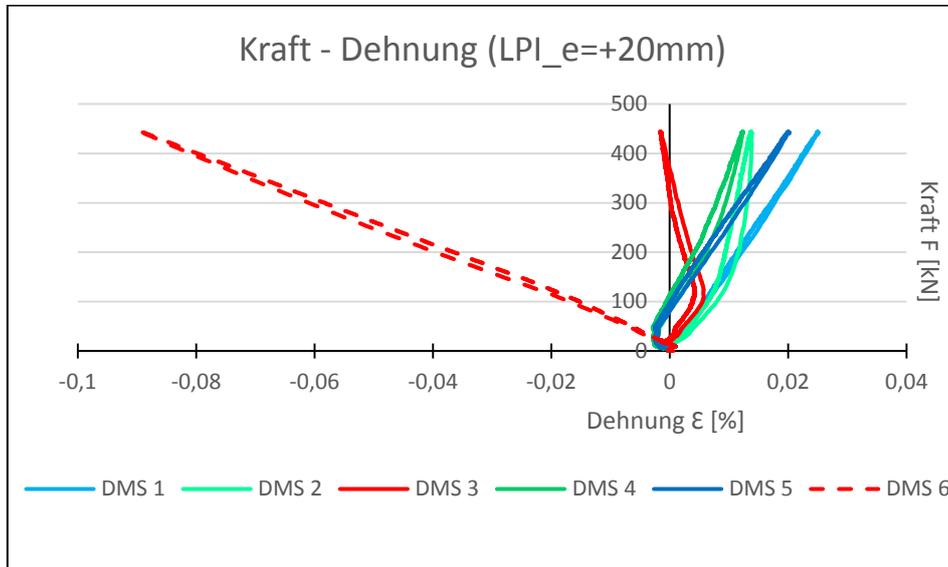


Abbildung 5.2: F- $\epsilon$ -Diagramm für LP I, Exzentrizität: +20 mm

### 5.1.3 Ergebnisse für die Exzentrizität $e=+30$ mm

Nachstehendes Diagramm zeigt die Kraft-Dehnungs-Beziehung, die beim Laborversuch erreicht wurde. Farblich dargestellt sind die verschiedenen Dehnmessstreifen. DMS 3 und DMS 6 befinden sich an derselben Stelle, wobei jedoch DMS 3 an der Innenseite und DMS 6 an der Außenseite des Trägers liegt.

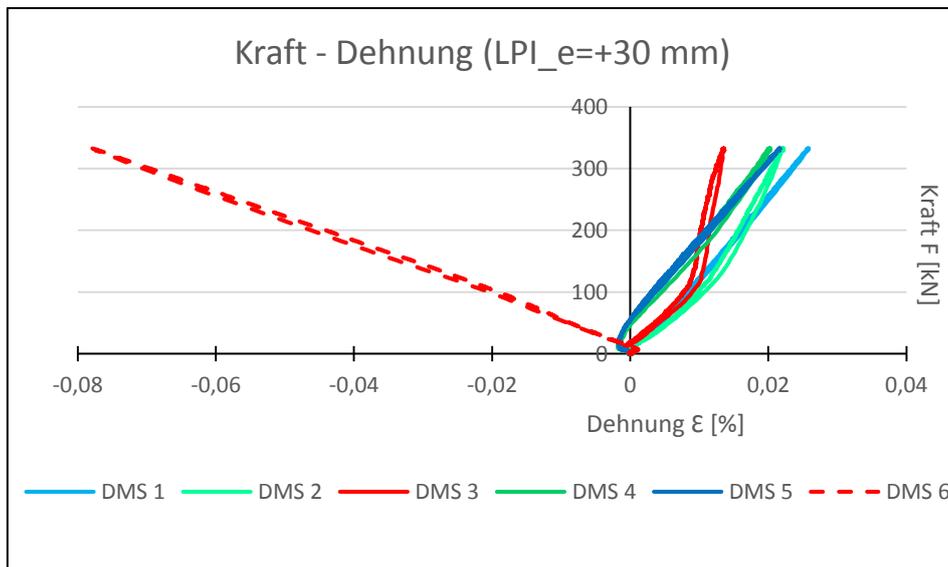


Abbildung 5.3: F- $\epsilon$ -Diagramm für LP I, Exzentrizität: +30 mm

#### 5.1.4 Ergebnisse ohne Exzentrizität $e=0$ mm (Stempel)

Nachstehendes Diagramm zeigt die Kraft-Dehnungs-Beziehung, die beim Laborversuch erreicht wurde. Farblich dargestellt sind die verschiedenen Dehnmessstreifen. DMS 3 und DMS 6 befinden sich an derselben Stelle, wobei jedoch DMS 3 an der Innenseite und DMS 6 an der Außenseite des Trägers liegt.

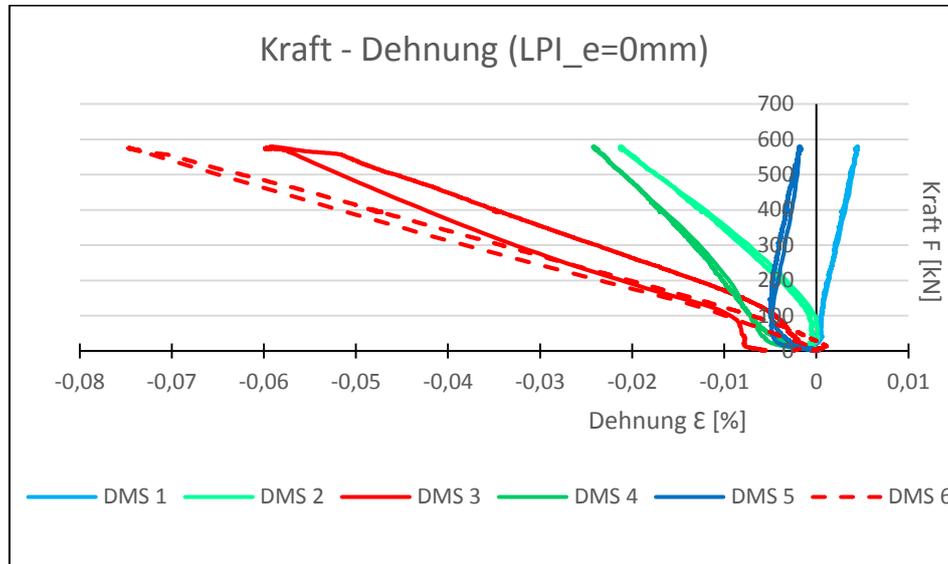


Abbildung 5.4: F- $\epsilon$ -Diagramm für LP I, ohne Exzentrizität:

#### 5.1.5 Ergebnisse für die Exzentrizität $e=-10$ mm

Nachstehendes Diagramm zeigt die Kraft-Dehnungs-Beziehung, die beim Laborversuch erreicht wurde. Farblich dargestellt sind die verschiedenen Dehnmessstreifen. DMS 3 und DMS 6 befinden sich an derselben Stelle, wobei jedoch DMS 3 an der Innenseite und DMS 6 an der Außenseite des Trägers liegt.

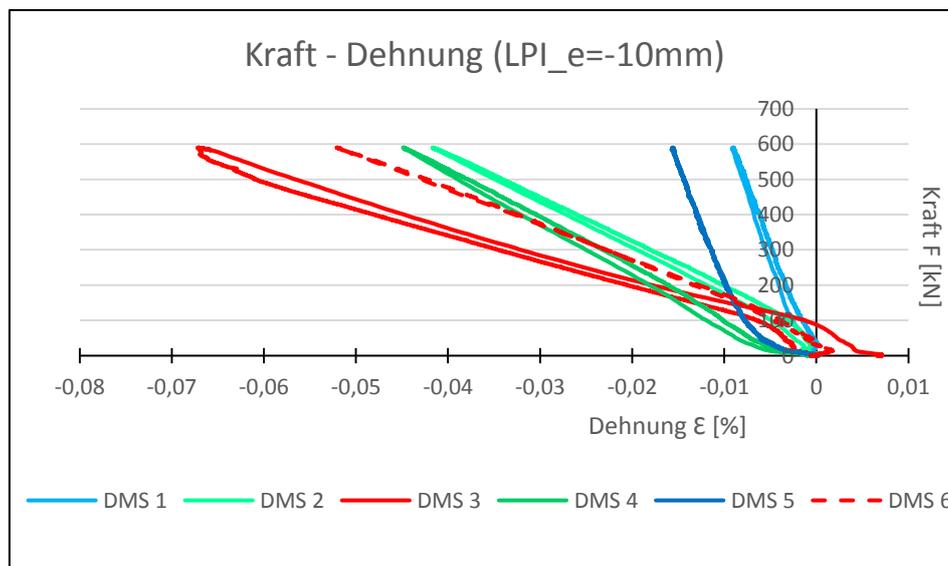


Abbildung 5.5: F- $\epsilon$ -Diagramm für LP I, Exzentrizität: -10 mm

## 5.2 System LP II

### 5.2.1 Ergebnisse für die Exzentrizität $e=+10$ mm

Nachstehendes Diagramm zeigt die Kraft-Dehnungs-Beziehung, die beim Laborversuch erreicht wurde. Farblich dargestellt sind die verschiedenen Dehnmessstreifen. DMS 9 und 13 bzw. DMS 10 und 14 befinden sich jeweils an derselben Stelle, wobei jedoch DMS 9 und DMS 10 an der Innenseite und DMS 13 und DMS 14 an der Außenseite des Trägers liegen. Alle anderen DMS liegen an der Innenseite.

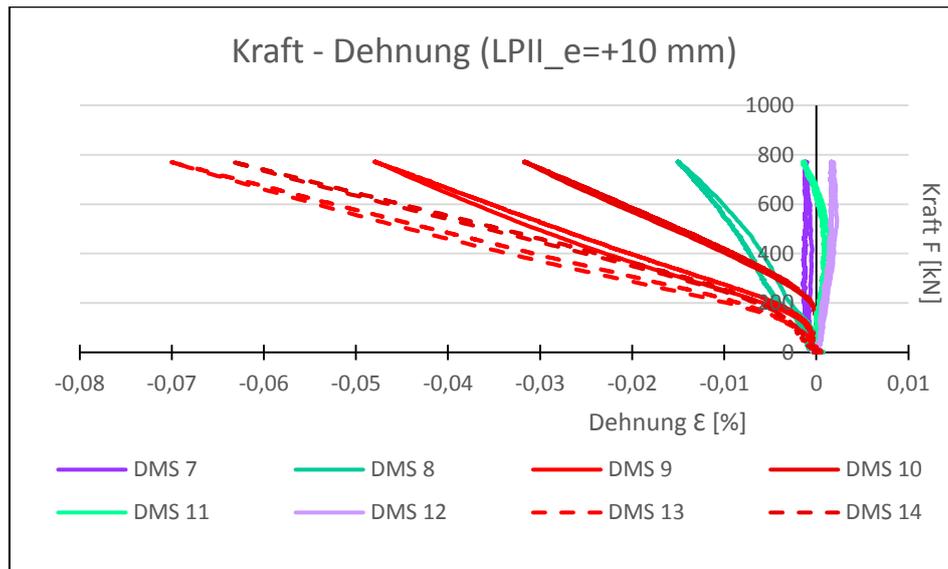


Abbildung 5.6: F- $\epsilon$ -Diagramm für LP II, Exzentrizität: +10 mm

Nachfolgend wird das x- $\epsilon$ -Diagramm für die maximale Last, die in diesem Versuch erreicht wurde, gezeigt. Dabei befinden sich die DMS 7 bis 12 an der Innenseite des Trägers in Abständen  $x=\pm 220$  mm,  $x=\pm 100$  mm und  $x=\pm 20$  mm und die DMS 13 und 14 an den Positionen  $x=\pm 20$  mm außenseitig am Träger.

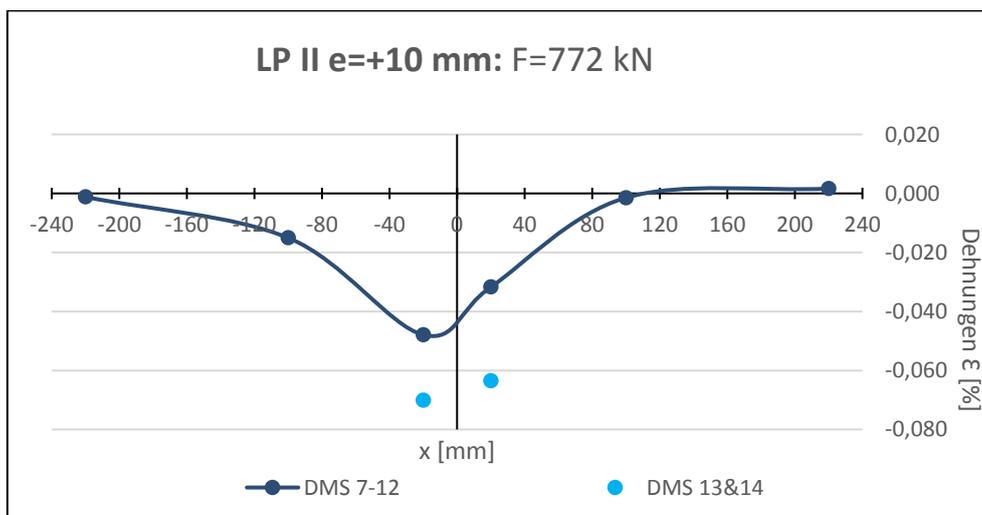


Abbildung 5.7: x- $\epsilon$ -Diagramm für LP II, Exzentrizität: +10 mm

### 5.2.2 Ergebnisse für die Exzentrizität $e=+20$ mm

Nachstehendes Diagramm zeigt die Kraft-Dehnungs-Beziehung, die beim Laborversuch erreicht wurde. Farblich dargestellt sind die verschiedenen Dehnmessstreifen. DMS 9 und 13 bzw. DMS 10 und 14 befinden sich jeweils an derselben Stelle, wobei jedoch DMS 9 und DMS 10 an der Innenseite und DMS 13 und DMS 14 an der Außenseite des Trägers liegen.

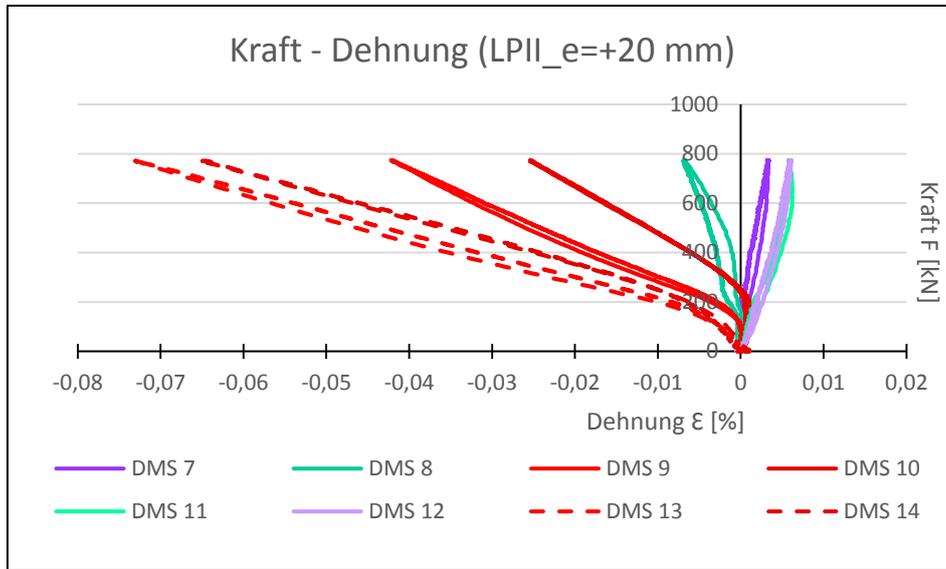


Abbildung 5.8: F-ε-Diagramm für LP II, Exzentrizität: +20 mm

Nachfolgend wird das x-ε-Diagramm für die maximale Last, die in diesem Versuch erreicht wurde, gezeigt. Dabei befinden sich die DMS 7 bis 12 an der Innenseite des Trägers in Abständen  $x=\pm 220$  mm,  $x=\pm 100$  mm und  $x=\pm 20$  mm und die DMS 13 und 14 an den Positionen  $x=\pm 20$  mm außenseitig am Träger.

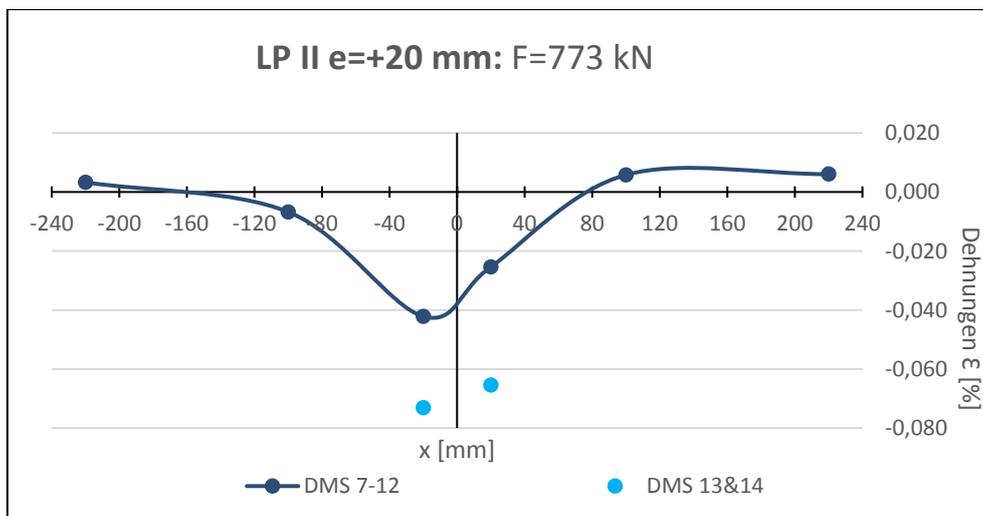


Abbildung 5.9: x-ε-Diagramm für LP II, Exzentrizität: +20 mm

### 5.2.3 Ergebnisse für die Exzentrizität $e=+30$ mm

Nachstehendes Diagramm zeigt die Kraft-Dehnungs-Beziehung, die beim Laborversuch erreicht wurde. Farblich dargestellt sind die verschiedenen Dehnmessstreifen. DMS 9 und 13 bzw. DMS 10 und 14 befinden sich jeweils an derselben Stelle, wobei jedoch DMS 9 und DMS 10 an der Innenseite und DMS 13 und DMS 14 an der Außenseite des Trägers liegen.

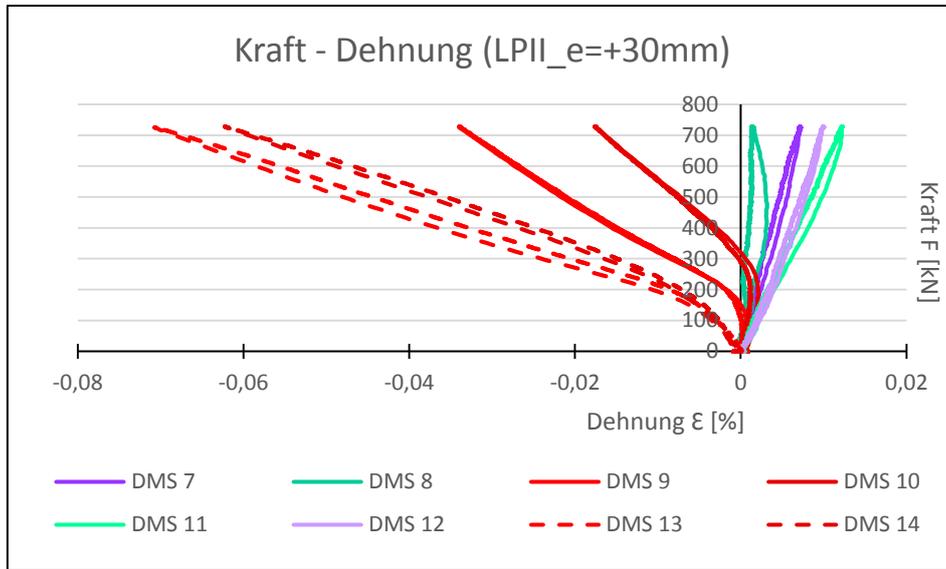


Abbildung 5.10: F-ε-Diagramm für LP II, Exzentrizität: +30 mm

Nachfolgend wird das x-ε-Diagramm für die maximale Last, die in diesem Versuch erreicht wurde, gezeigt. Dabei befinden sich die DMS 7 bis 12 an der Innenseite des Trägers in Abständen  $x=\pm 220$  mm,  $x=\pm 100$  mm und  $x=\pm 20$  mm und die DMS 13 und 14 an den Positionen  $x=\pm 20$  mm außenseitig am Träger.

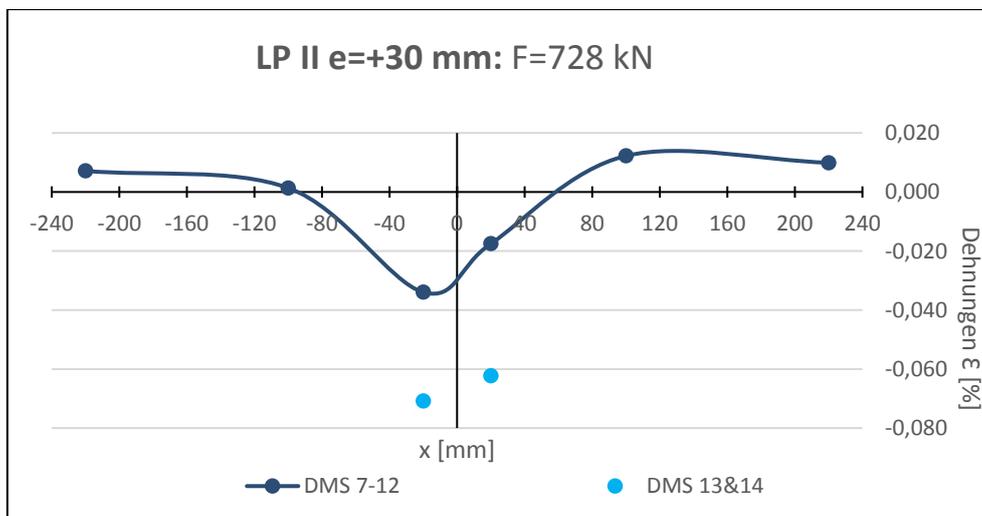


Abbildung 5.11: x-ε-Diagramm für LP II, Exzentrizität: +30 mm

### 5.2.4 Ergebnisse ohne Exzentrizität $e=0$ mm (Stempel)

Nachstehendes Diagramm zeigt die Kraft-Dehnungs-Beziehung, die beim Laborversuch erreicht wurde. Farblich dargestellt sind die verschiedenen Dehnmessstreifen. DMS 9 und 13 bzw. DMS 10 und 14 befinden sich jeweils an derselben Stelle, wobei jedoch DMS 9 und DMS 10 an der Innenseite und DMS 13 und DMS 14 an der Außenseite des Trägers liegen.

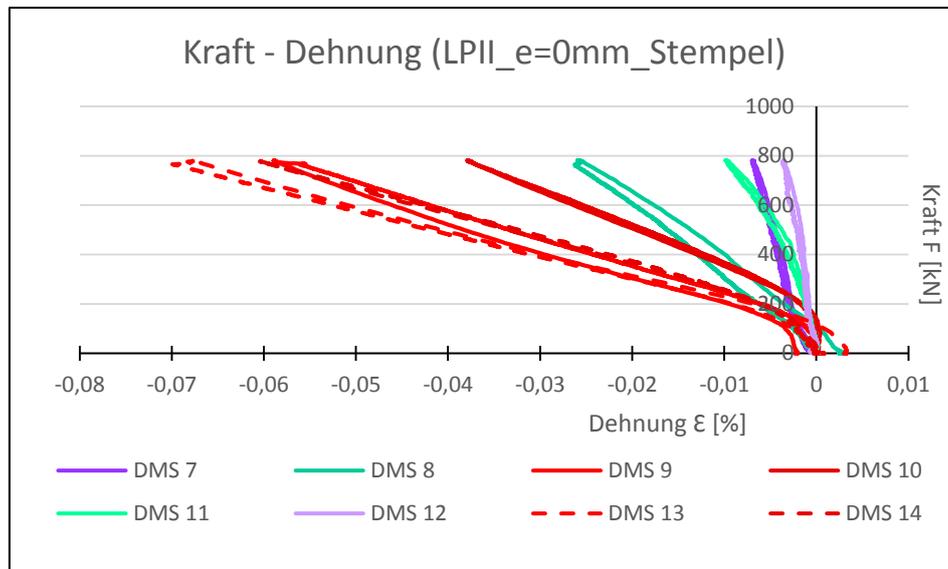


Abbildung 5.12: F- $\epsilon$ -Diagramm für LP II, ohne Exzentrizität

Nachfolgend wird das  $x$ - $\epsilon$ -Diagramm für die maximale Last, die in diesem Versuch erreicht wurde, gezeigt. Dabei befinden sich die DMS 7 bis 12 an der Innenseite des Trägers in Abständen  $x=\pm 220$  mm,  $x=\pm 100$  mm und  $x=\pm 20$  mm und die DMS 13 und 14 an den Positionen  $x=\pm 20$  mm außenseitig am Träger.

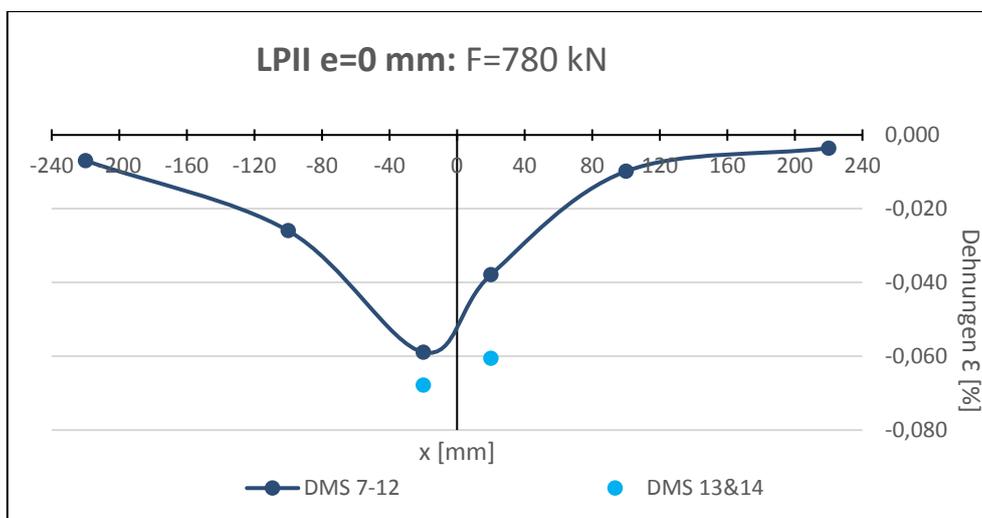


Abbildung 5.13:  $x$ - $\epsilon$ -Diagramm für LP II, ohne Exzentrizität

### 5.2.5 Ergebnisse für die Exzentrizität $e=-10$ mm

Nachstehendes Diagramm zeigt die Kraft-Dehnungs-Beziehung, die beim Laborversuch erreicht wurde. Farblich dargestellt sind die verschiedenen Dehnmessstreifen. DMS 9 und 13 bzw. DMS 10 und 14 befinden sich jeweils an derselben Stelle, wobei jedoch DMS 9 und DMS 10 an der Innenseite und DMS 13 und DMS 14 an der Außenseite des Trägers liegen.

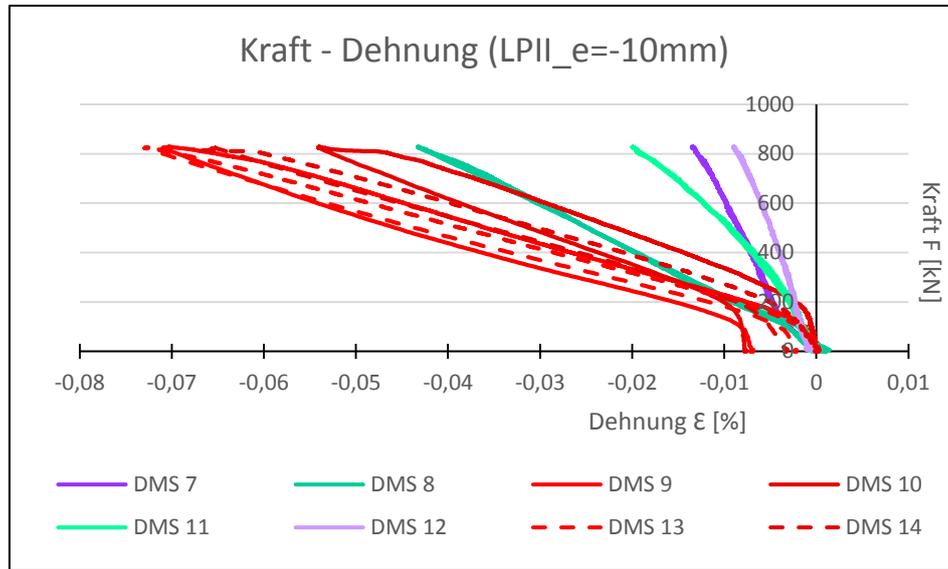


Abbildung 5.14: F- $\epsilon$ -Diagramm für LP II, Exzentrizität: -10 mm

Nachfolgend wird das  $x$ - $\epsilon$ -Diagramm für die maximale Last, die in diesem Versuch erreicht wurde, gezeigt. Dabei befinden sich die DMS 7 bis 12 an der Innenseite des Trägers in Abständen  $x=\pm 220$  mm,  $x=\pm 100$  mm und  $x=\pm 20$  mm und die DMS 13 und 14 an den Positionen  $x=\pm 20$  mm außenseitig am Träger.

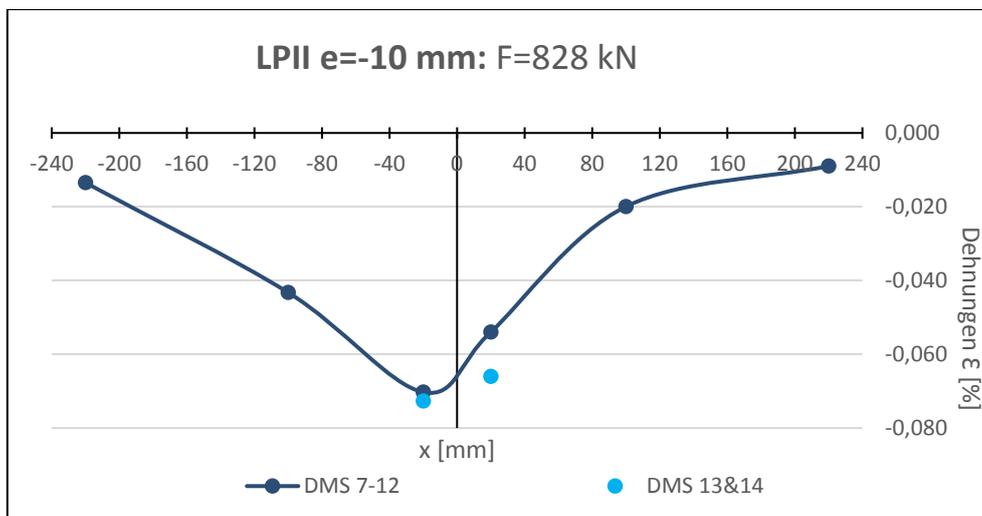


Abbildung 5.15:  $x$ - $\epsilon$ -Diagramm für LP II, Exzentrizität: -10 mm

### 5.3 System LP III

#### 5.3.1 Ergebnisse für die Exzentrizität $e=+10$ mm

Nachstehendes Diagramm zeigt die Kraft-Dehnungs-Beziehung, die beim Laborversuch erreicht wurde. Farblich dargestellt sind die verschiedenen Dehnmessstreifen. DMS 3 und DMS 6 befinden sich an derselben Stelle, wobei jedoch DMS 3 an der Innenseite und DMS 6 an der Außenseite des Trägers liegt.

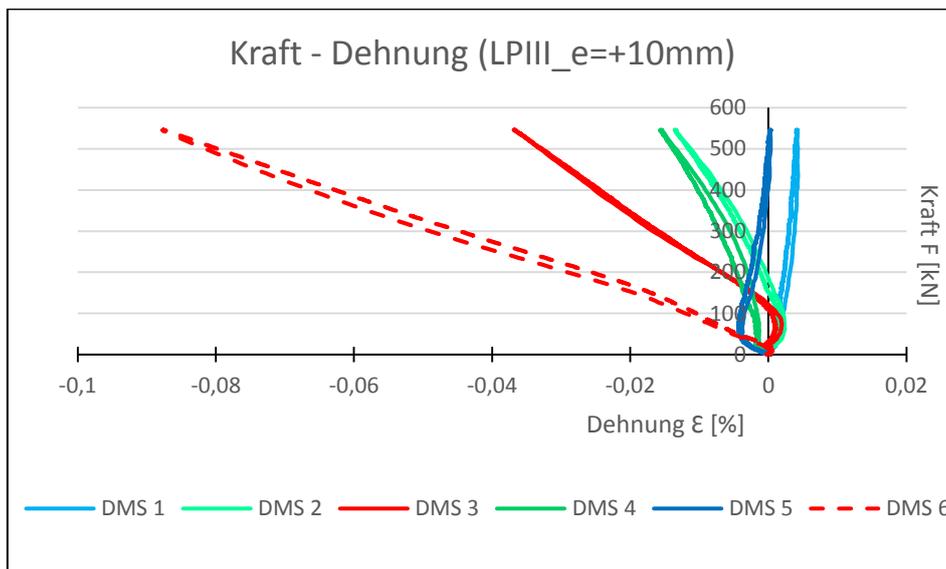


Abbildung 5.16: F- $\epsilon$ -Diagramm für LP III, Exzentrizität: +10 mm

#### 5.3.2 Ergebnisse für die Exzentrizität $e=+20$ mm

Nachstehendes Diagramm zeigt die Kraft-Dehnungs-Beziehung, die beim Laborversuch erreicht wurde. Farblich dargestellt sind die verschiedenen Dehnmessstreifen. DMS 3 und DMS 6 befinden sich an derselben Stelle, wobei jedoch DMS 3 an der Innenseite und DMS 6 an der Außenseite des Trägers liegt.

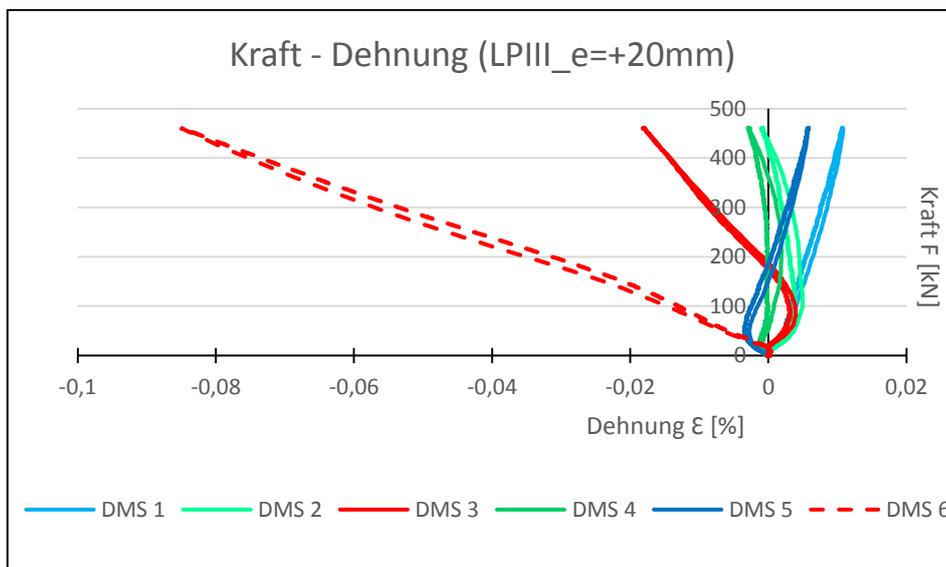


Abbildung 5.17: F- $\epsilon$ -Diagramm für LP III, Exzentrizität: +20 mm

### 5.3.3 Ergebnisse für die Exzentrizität $e=+30$ mm

Nachstehendes Diagramm zeigt die Kraft-Dehnungs-Beziehung, die beim Laborversuch erreicht wurde. Farblich dargestellt sind die verschiedenen Dehnmessstreifen. DMS 3 und DMS 6 befinden sich an derselben Stelle, wobei jedoch DMS 3 an der Innenseite und DMS 6 an der Außenseite des Trägers liegt.

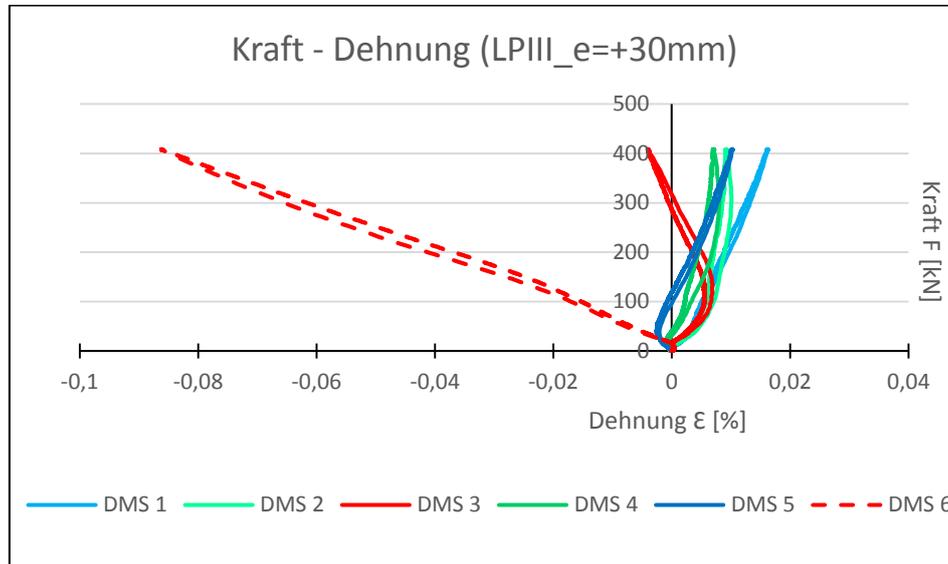


Abbildung 5.18: F- $\epsilon$ -Diagramm für LP III, Exzentrizität: +30 mm

### 5.3.4 Ergebnisse ohne Exzentrizität $e=0$ mm (Stempel)

Nachstehendes Diagramm zeigt die Kraft-Dehnungs-Beziehung, die beim Laborversuch erreicht wurde. Farblich dargestellt sind die verschiedenen Dehnmessstreifen. DMS 3 und DMS 6 befinden sich an derselben Stelle, wobei jedoch DMS 3 an der Innenseite und DMS 6 an der Außenseite des Trägers liegt.

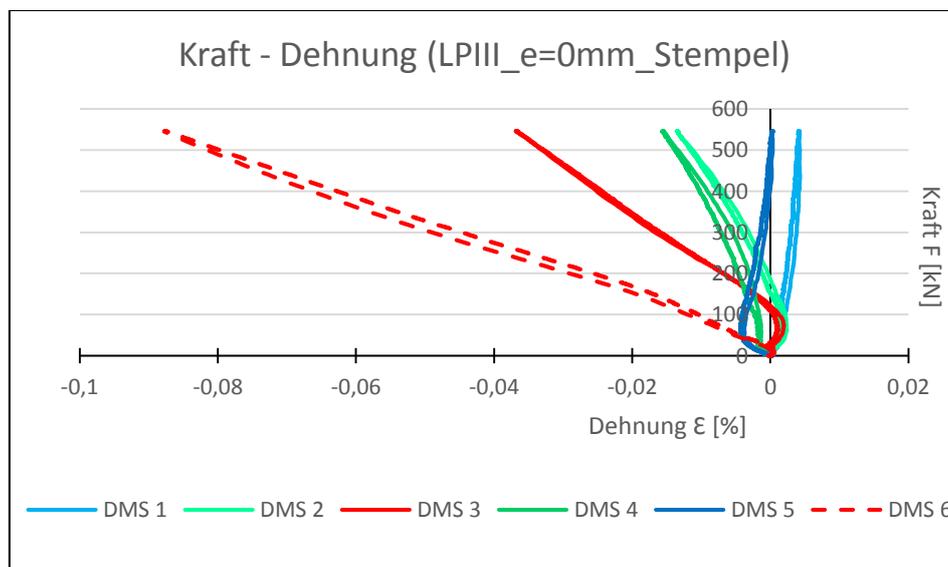


Abbildung 5.19: F- $\epsilon$ -Diagramm für LP III, ohne Exzentrizität

### 5.3.5 Ergebnisse für die Exzentrizität $e=-10$ mm

Nachstehendes Diagramm zeigt die Kraft-Dehnungs-Beziehung, die beim Laborversuch erreicht wurde. Farblich dargestellt sind die verschiedenen Dehnmessstreifen. DMS 3 und DMS 6 befinden sich an derselben Stelle, wobei jedoch DMS 3 an der Innenseite und DMS 6 an der Außenseite des Trägers liegt.

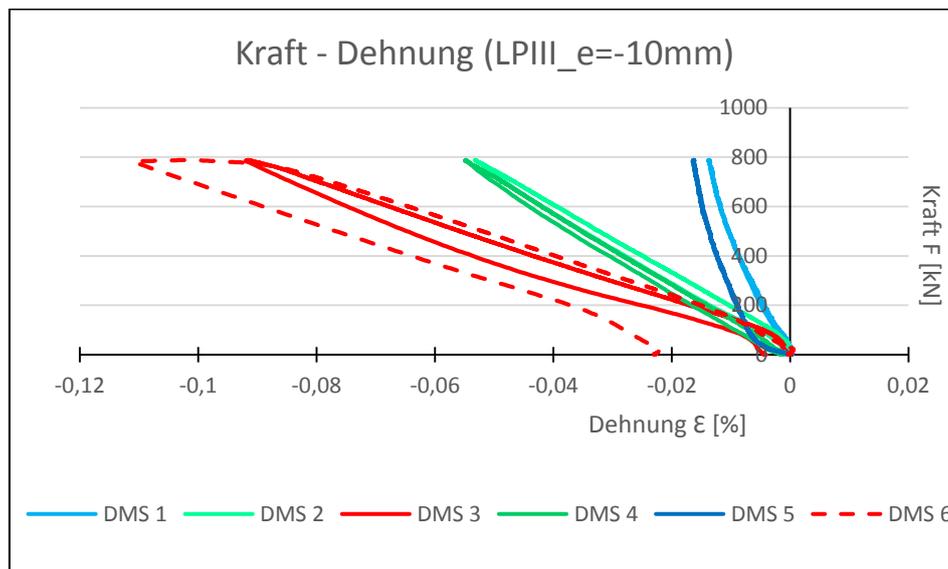


Abbildung 5.20: F- $\epsilon$ -Diagramm für LP III, Exzentrizität: -10 mm

## 6 Numerische Berechnung

Dieses Kapitel befasst sich mit den verschiedenen FE-Modellen, die im Zuge dieser Masterarbeit bearbeitet wurden. Des Weiteren werden der Aufbau des FE-Modells und die Netzfeinheit erläutert. Danach werden die einzelnen Modelle noch einmal detailliert erklärt und die Ergebnisse in Diagrammform abgebildet.

### 6.1 FE-Modelle im Überblick

Im Zuge dieser Masterarbeit wurden verschiedene FE-Modelle erstellt und bearbeitet, um die Versuche realistisch mit der Software ABAQUS [7] abbilden zu können. Mit der Bearbeitung wurde eine schrittweise Annäherung an den tatsächlichen Versuchsaufbau angestrebt (vgl. und Abbildung 6.1).

Das Modell für die Vorstudie wurde bereits in Kapitel 3.1 beschrieben. Es beinhaltet die Schiene vom Typ A 75, also eine Schiene ohne Abnutzung. Der Belastungspunkt ohne Exzentrizität  $e=0$  mm bei diesem Modell ist gleichzeitig der Schienenmittelpunkt und die Mitte des Steges.

Aus diesem Modell wurde das Modell mit der Schienenabnutzung erstellt, welches im weiteren Verlauf der Arbeit als Modell 0 bezeichnet wird. Dieses beinhaltet die reale Schiene mit einer Abnutzung von circa 12,5 %. Auch die Schienenklemmen- und Backenlage wurde in diesem Modellierungsschritt angepasst. Die Schiene liegt zentrisch über dem Steg des Kranbahnträgers. Auch hier ist der definierte Nullpunkt der Exzentrizitäten der Mittelpunkt der Schiene und gleichzeitig die Mitte des Steges.

Im nächsten Schritt, der als Modell 1 bezeichnet wird, wurde die Schienenlage angepasst, da die Schiene am realen Träger nicht zentrisch über dem Steg ausgerichtet ist. Das horizontale Versatzmaß von neun Millimeter in Richtung Gurtaußenrand wurde in diesem Modell eingearbeitet. Die Schiene befindet sich nun weiter außen am Träger. In diesem Modellierungsschritt befindet sich der Nullpunkt der Exzentrizitäten direkt über der Mitte des Stegs, also exzentrisch zur Schiene.

Aus Modell 1 wurde nachfolgend Modell 2 angefertigt, in dem eine zusätzliche Schweißnaht an der Außenseite des Stegs modelliert wurde. Diese Schweißnaht befindet sich auch am realen Träger und wurde an diese Maße angepasst (Nahtdicke siehe Abbildung 6.1). Auch in diesem Schritt befindet sich der Nullpunkt der Exzentrizitäten direkt über der Stegmitte.

Als letzter Schritt wurde Modell 3 angefertigt. In diesem Modellierungsschritt wird zusätzlich zur Schweißnaht aus Modell 2 ein Spalt an der Stegobenseite innenseitig am Träger eingebracht. Dieser Spalt ist sehr schmal (0,1 mm), besitzt allerdings eine Länge von 6 Millimetern. Auch dieser Spalt befindet sich am Versuchsträger. Wiederum wird in diesem Modell der Nullpunkt der Exzentrizitäten als Stegmitte gewählt.

In Abbildung 6.1 befindet sich ein Übersichtsbild über die soeben erläuterten Modellierungsschritte.

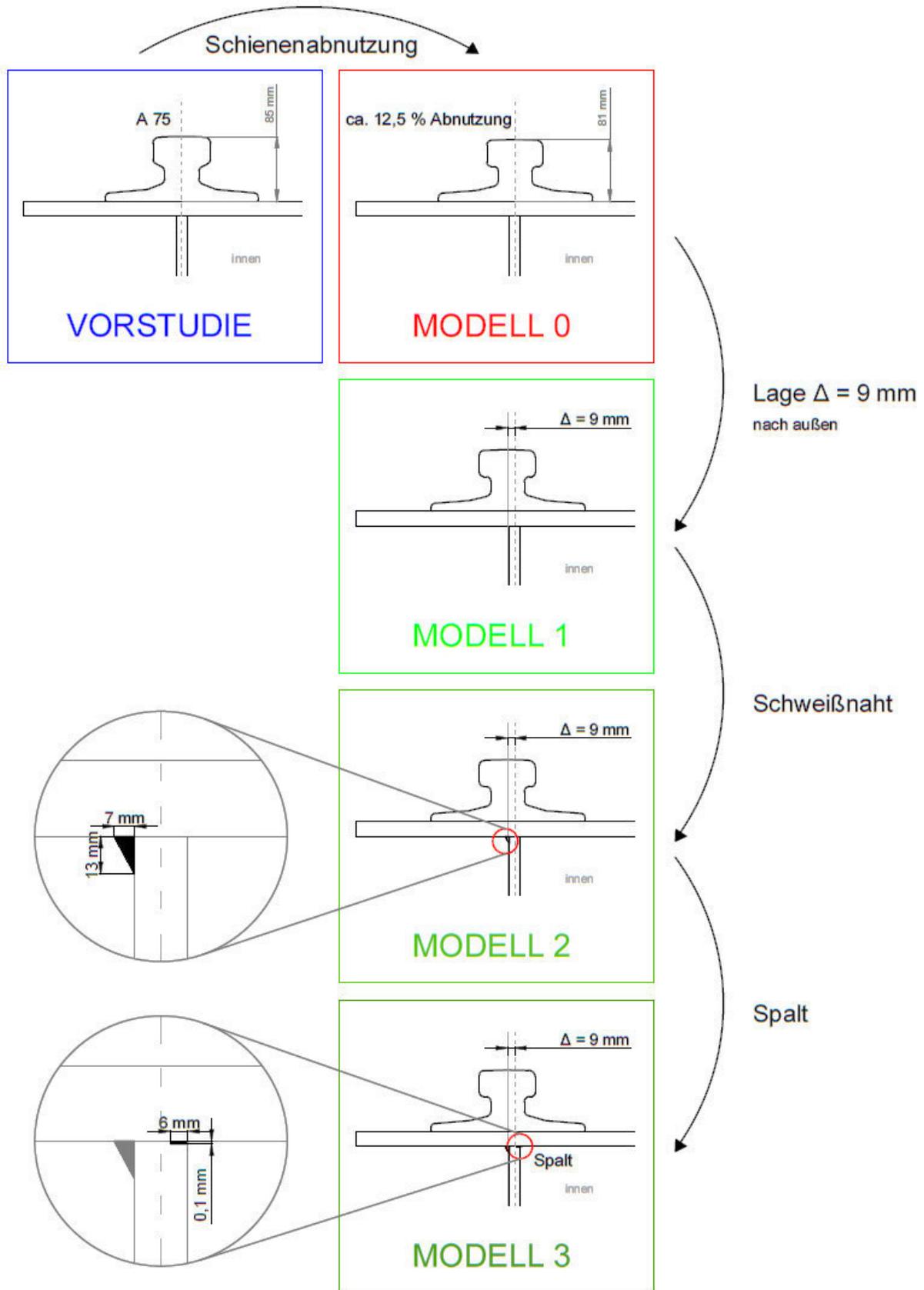


Abbildung 6.1: Übersicht der untersuchten Modelle

## 6.2 Netzfeinheit der einzelnen FE-Modelle

Bei dem Modell der Schienenabnutzung (Modell 0) wurde eine Netzverfeinerung durchgeführt. Im Folgenden soll diese detailliert dokumentiert werden, um so für den Leser nachvollziehbar zu sein. Dabei handelt es sich im Konkreten um den Steg nahe der Unterkante des Flansches, der verfeinert wurde. In diesem Bereich wurden nämlich die Ergebnisse betrachtet (im Abstand von 30 mm von der Obergurtunterkante).

### 6.2.1 Ursprüngliches FE-Modell

Das ursprüngliche Modell für System LP I hatte im gesamten Bereich eine Netzhöhe von 30 Millimeter. Das Netz wies im Bereich der Stegobenseite keine Verdichtungen auf. Das FE-Modell benötigte fünf Minuten für die Berechnung. Die Abbildung 6.2 zeigt eine Gesamtübersicht und die Abbildung 6.3 zeigt einen Detailausschnitt in der x-z-Ebene (Trägerlängsrichtung).

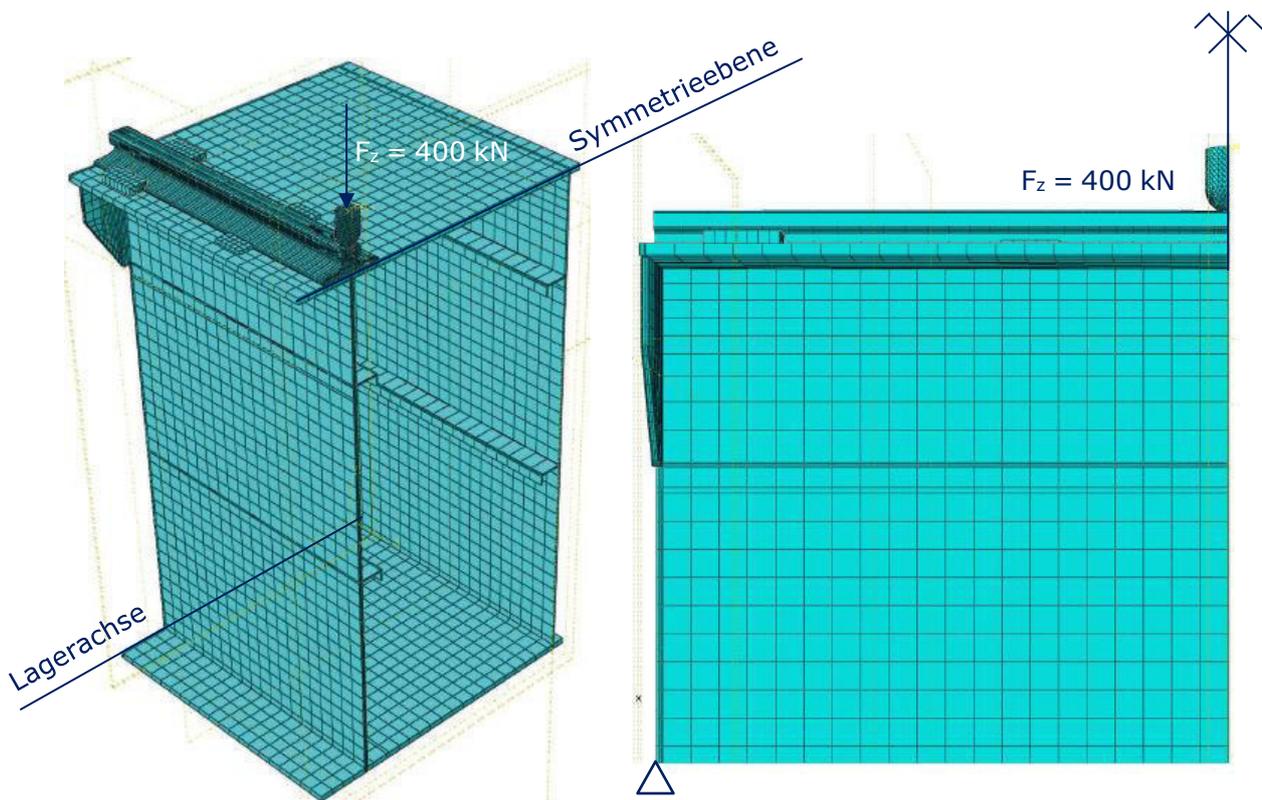


Abbildung 6.2: Gesamtübersicht des FE-Modells für System LP I (Modell ohne Netzverfeinerung)

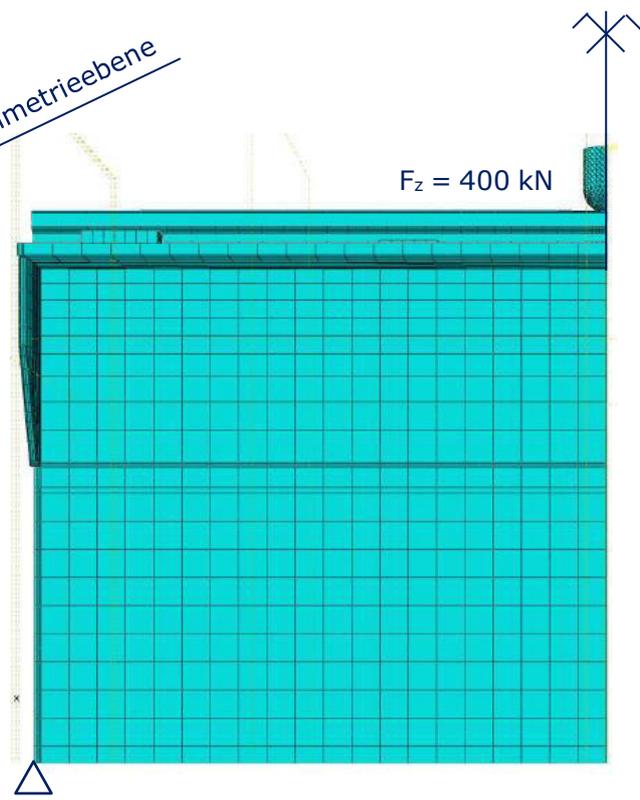


Abbildung 6.3: Detailansicht des FE-Modells

### 6.2.2 Netzverfeinerung - Schritt 1

Im ersten Schritt der Netzverfeinerung wurde die Netzhöhe im relevanten Bereich (im Abstand von 30 mm zur Obergurtunterkante) auf die Hälfte reduziert, das Modell verfügt also bei dem Ergebnispfad über eine Netzhöhe von 15 Millimeter. In diesem Netz wurden Verdichtungen aufgebracht, um so die Rechenzeit nur moderat zu erhöhen und trotzdem eine gute Ergebnisschärfe zu erhalten. Dieses Modell hatte eine Rechenzeit von acht Minuten.

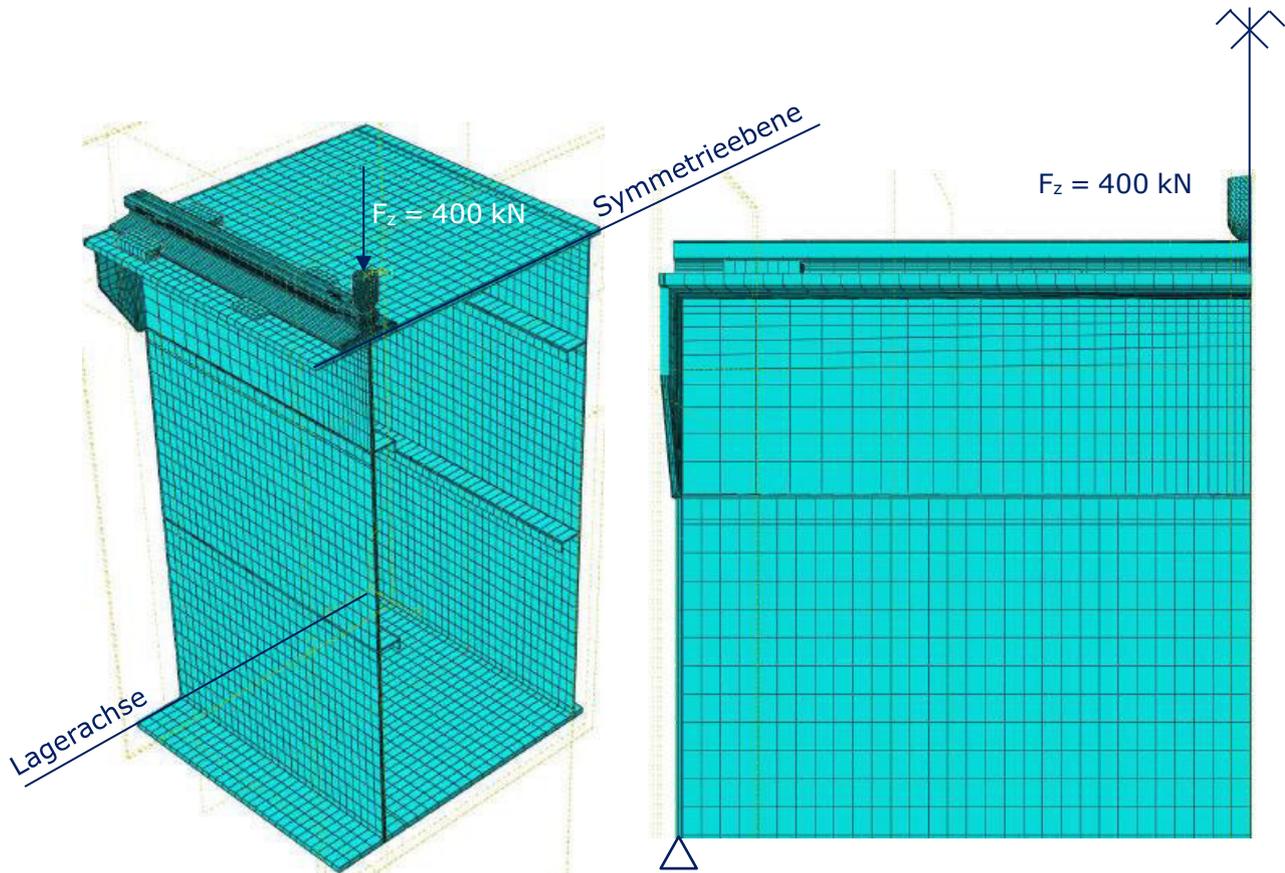


Abbildung 6.4: Gesamtübersicht des FE-Modells für System LP I; Netzverfeinerungsschritt 1

Abbildung 6.5: Detailansicht des FE-Modells

### 6.2.3 Netzverfeinerung - Schritt 2

Im zweiten Schritt der Netzverfeinerung wurde die Netzhöhe im relevanten Bereich (im Abstand von 30 mm zur Obergurtunterkante) wiederum auf circa die Hälfte reduziert, das FE-Modell verfügt also bei dem Ergebnispfad über eine Netzhöhe von 6 Millimeter. In diesem Netz wurden Verdichtungen aufgebracht, um so die Rechenzeit zu moderat zu erhöhen und trotzdem eine gute Ergebnisschärfe zu erhalten. Dieses Modell hatte eine Rechenzeit von 25 Minuten.

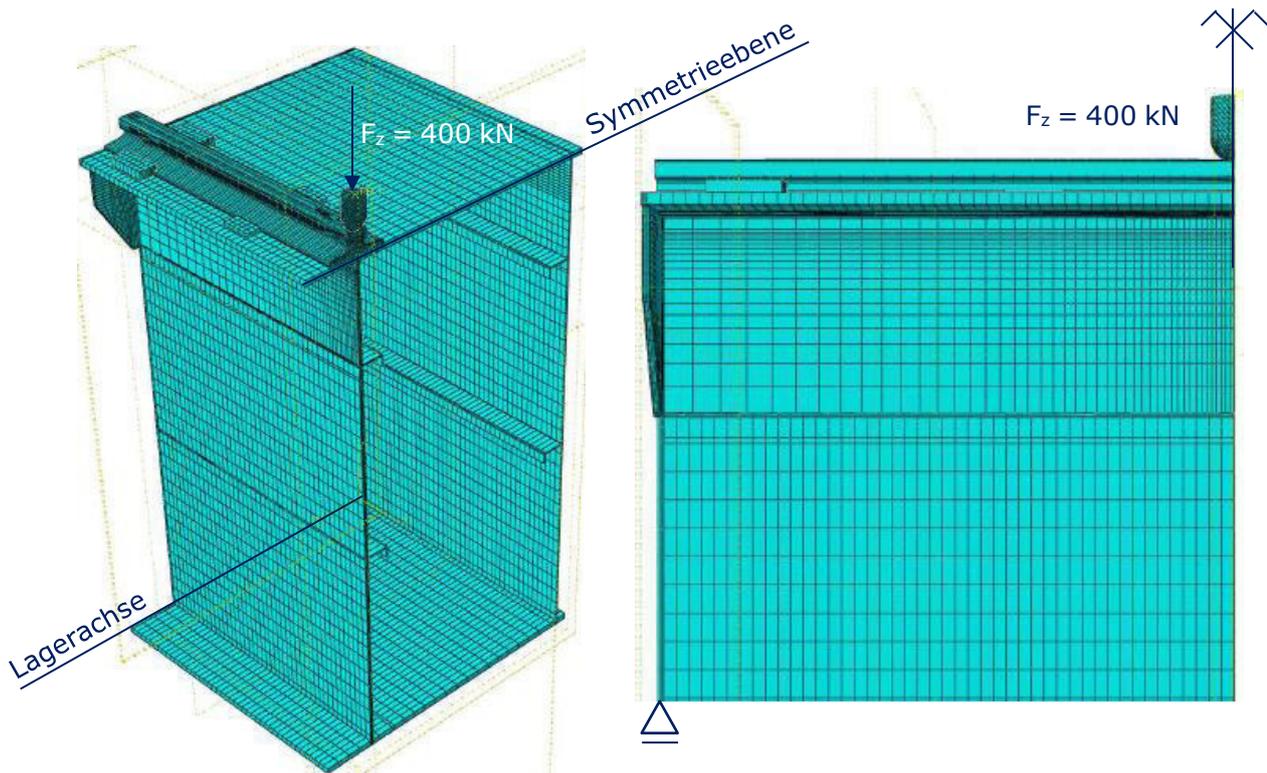


Abbildung 6.6: Gesamtübersicht des FE-Modells für System LP I; im Netzverfeinerungsschritt 2

Abbildung 6.7: Detail des relevanten Bereichs der Netzverfeinerung

### 6.2.4 Netzverfeinerung - Schritt 3

Im dritten Schritt der Netzverfeinerung wurde die Netzhöhe im relevanten Bereich (im Abstand von 30 mm zur Obergurtunterkante) wiederum auf die Hälfte reduziert, das FE-Modell verfügt bei dem Ergebnispfad also über eine Netzhöhe von 3 Millimeter. In diesem Netz wurden Verdichtungen aufgebracht, um so die Rechenzeit weiter zu erhöhen und trotzdem eine gute Ergebnisschärfe zu erhalten. Dieses Modell hatte eine Rechenzeit von 27 Minuten.

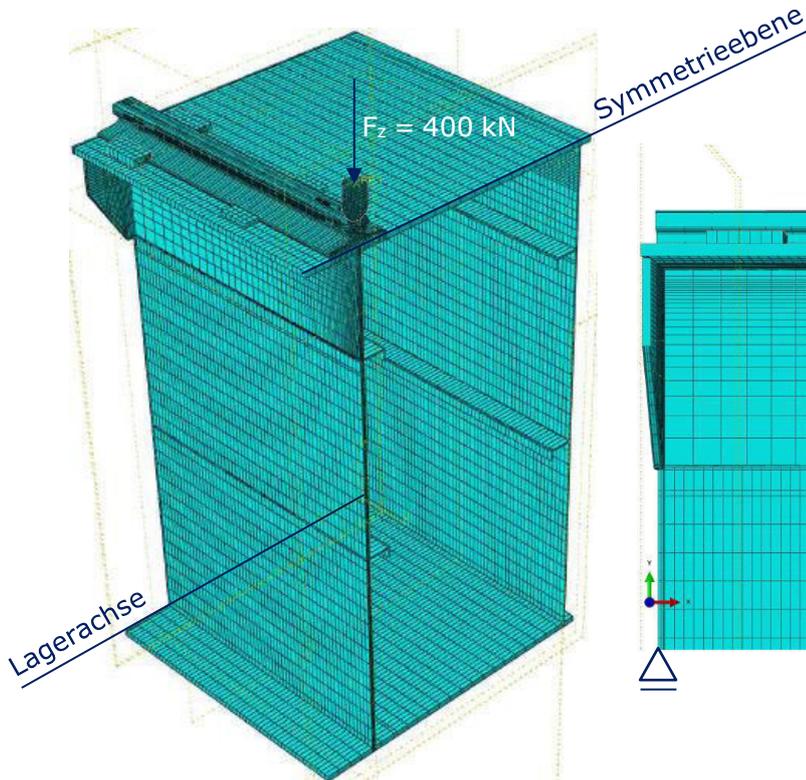


Abbildung 6.8: Gesamtübersicht des FE-Modells für System LP I; Netzverfeinerung Schritt 3

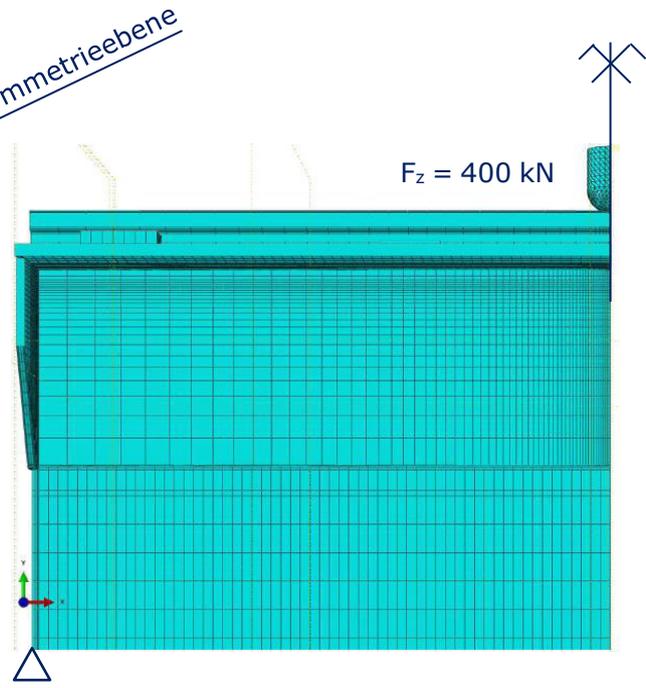


Abbildung 6.9: Detailansicht des verdichteten Bereichs; Schritt 3

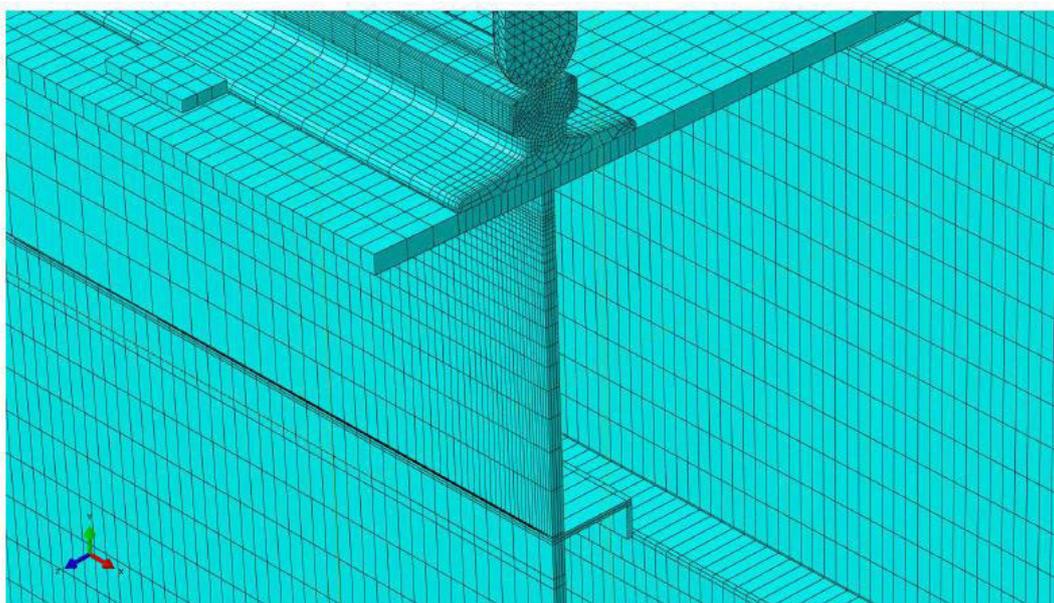


Abbildung 6.10: Dreidimensionales Detail der Netzverfeinerung Schritt 3, unmittelbar im Radlastbereich

### 6.2.5 Ergebnisbetrachtung und Gegenüberstellung

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Netzfeinheiten analysiert. In Tabelle 6.1 werden die Netzfeinheiten und die Berechnungsdauer verglichen.

Tabelle 6.1: Netzfeinheiten und Berechnungsdauer im Überblick

|                                       | Netz 0    | Netz 1    | Netz 2     | Netz 3     |
|---------------------------------------|-----------|-----------|------------|------------|
| Netzfeinheit<br>Bereich Stegoberkante | 30 mm     | 15 mm     | 6 mm       | 3 mm       |
| Berechnungsdauer                      | 5 Minuten | 8 Minuten | 25 Minuten | 27 Minuten |

Die Tabelle 6.2 zeigt die Werte der Spannungen und Dehnungen im Vergleich. Dabei wurden die Werte direkt unterhalb des Laststempels ( $x = 0 \text{ mm}$ ) und einer Höhe  $z = 30 \text{ mm}$  von der Obergurt-Unterkante (Stegaußenseite) abgegriffen.

Tabelle 6.2: Vergleich der Ergebniswerte bei System LP I für  $F_z = 400 \text{ kN}$

| Trägeraußenseite<br>Stelle $x = 0 \text{ mm}$ | Netz 0                     | Netz 1                     | Netz 2                     | Netz 3                     |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Spannungen $\sigma_z$                         | -110,400 N/mm <sup>2</sup> | -112,151 N/mm <sup>2</sup> | -112,102 N/mm <sup>2</sup> | -111,855 N/mm <sup>2</sup> |
| Delta Absolut                                 | ± 0,000                    | 1,751                      | 1,702                      | 1,455                      |
| Delta in %                                    | ± 0,000 %                  | -0,019 %                   | -0,015 %                   | -0,013 %                   |
| Dehnungen $\epsilon_z$                        | -0,0513 %                  | -0,0515 %                  | -0,0514 %                  | -0,0513 %                  |
| Delta Absolut                                 | ± 0,0000                   | 0,0002                     | 0,0001                     | ± 0,0000                   |
| Delta in %                                    | ± 0,0000 %                 | -0,0039 %                  | -0,0019 %                  | ± 0,0000 %                 |

Das nachfolgende Diagramm (Abbildung 6.11) zeigt die vertikalen Normalspannungen in z-Richtung. Bei diesem Diagramm wurden die Werte außenseitig am Trägersteg abgegriffen. Durch die Netzverfeinerung wurden die Graphen mit zutreffenderen Werten ermittelt. Wie man erkennen kann, ist die Linie von Netz 0 „sehr eckig“ im Bereich, in dem der Stempel angesetzt wurde. Mit freiem Auge erkennt man zwischen Netz 1, Netz 2 und Netz 3 keinen Unterschied mehr.

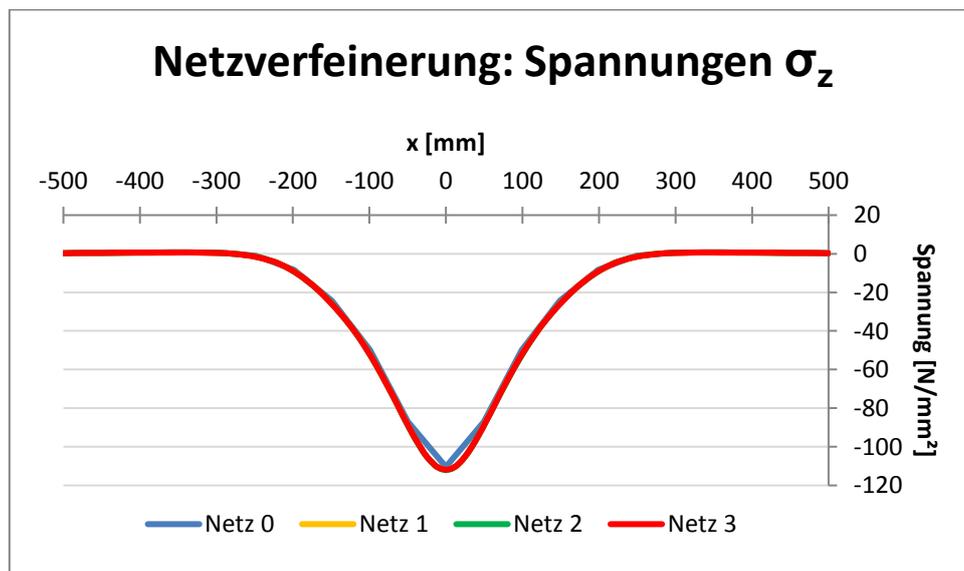


Abbildung 6.11: Vertikalspannungen  $\sigma_z$ , Vergleich der einzelnen Netzverfeinerungen ( $F_z = 400 \text{ kN}$ )

Um dies noch zu verdeutlichen wurde aus dem Graph (in Abbildung 6.11) noch einmal ein Abschnitt herausgezeichnet. Im nachfolgenden Diagramm (Abbildung 6.12) ist der Bereich  $x = -70 \text{ mm}$  bis  $x = 70 \text{ mm}$  abgebildet und man erkennt die vier verschiedenen Netzfeinheiten, wobei jedoch zu erwähnen ist, dass der Unterschied minimal ist.

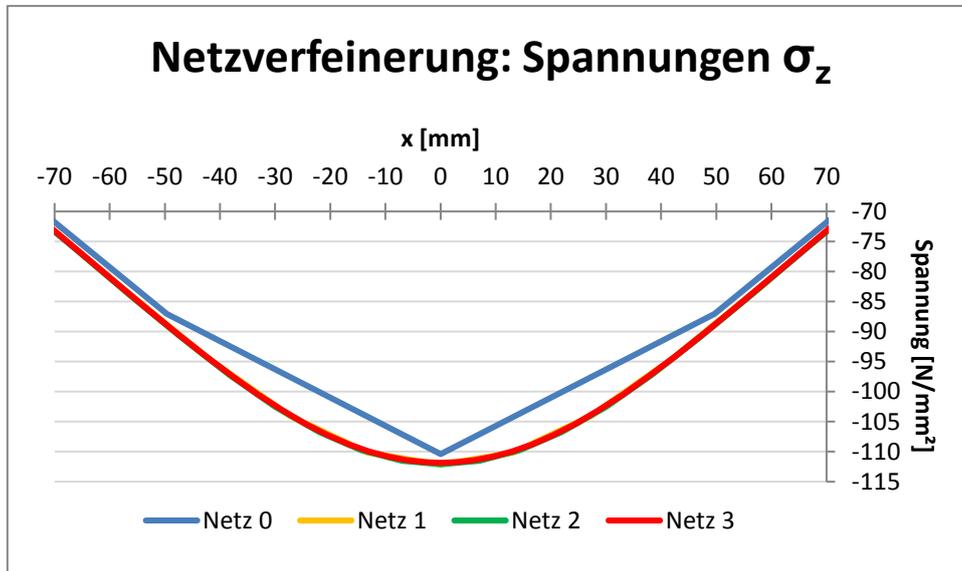


Abbildung 6.12: Vertikalspannungen  $\sigma_z$  der Netzverfeinerungen im Vergleich

Nachfolgendes Diagramm in Abbildung 6.13 zeigt die Dehnungen in z-Richtung im Vergleich. Auch bei diesem Diagramm wurden die Werte außenseitig am Trägersteg abgegriffen. Wie man erkennen kann, ist die Linie von Netz 0 eckig im Bereich, in dem der Stempel angesetzt wurde ( $x = 0 \text{ mm}$ ). Mit freiem Auge erkennt man zwischen Netz 1, Netz 2 und Netz 3 keinen Unterschied mehr.

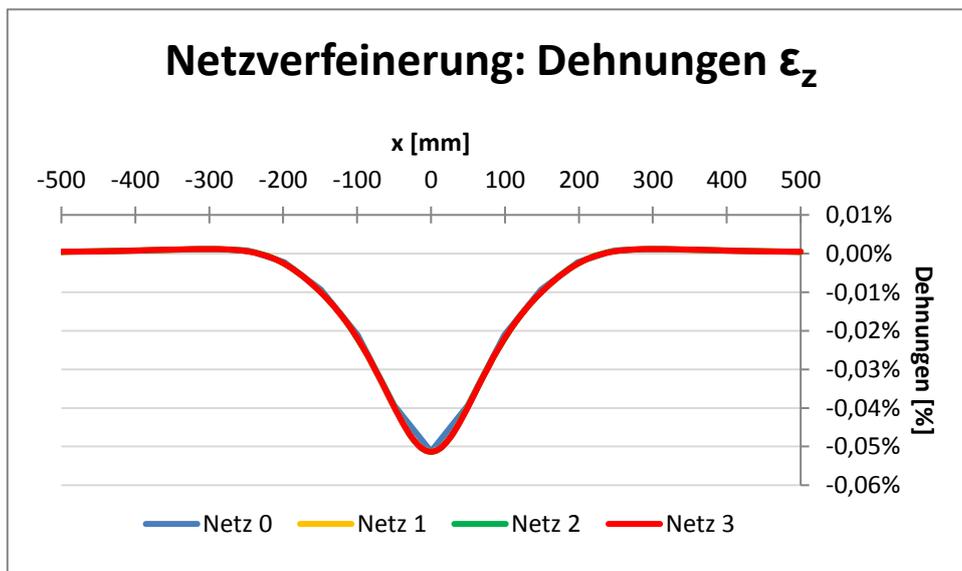


Abbildung 6.13: Vertikale Dehnungen  $\epsilon_z$ , Vergleich der Netzfeinheiten ( $F_z = 400 \text{ kN}$ )

Um dies noch zu verdeutlichen wurde aus dem Graph in Abbildung 6.13 noch einmal ein Abschnitt herausgezeichnet. Im nachfolgenden Diagramm (Abbildung 6.14) ist der Bereich  $x = -70$  mm bis  $x = 70$  mm abgebildet und man erkennt die vier verschiedenen Netzfeinheiten, wobei jedoch wiederum zu erwähnen ist, dass der Unterschied minimal ist.

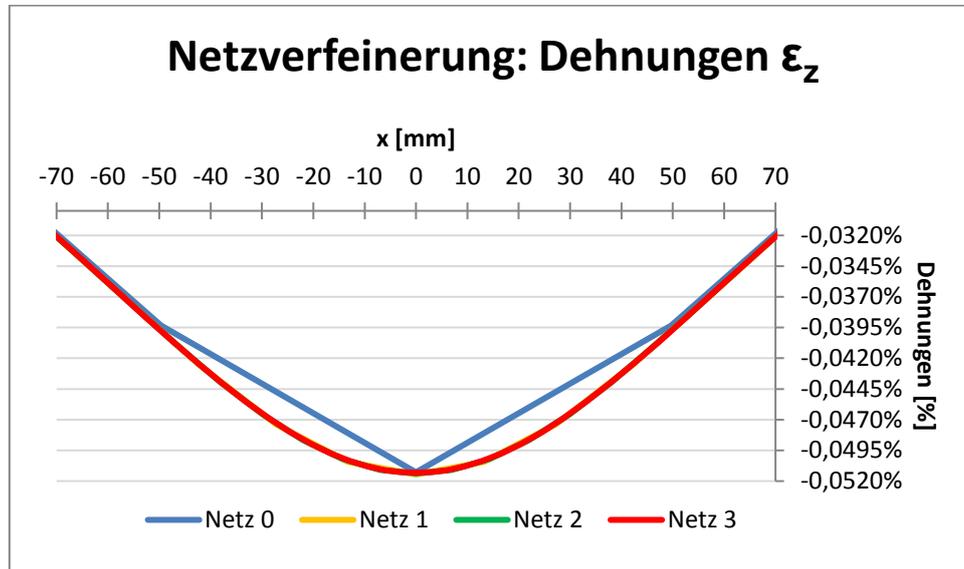


Abbildung 6.14: Vertikaldehnungen  $\epsilon_z$  der Netzfeinheiten im Vergleich

Auf der folgenden Seite werden in Abbildung 6.15 bis Abbildung 6.18 die Vertikalspannungsverläufe an der Stegaußenseite (mit einer Belastung mit  $F_z = 400$  kN und zentrisch über Schiene und Steg) farblich dargestellt. Auch hierbei sind die Unterschiede minimal.

Daher wurde entschieden alle weiteren Untersuchungen mit der Netzfeinheit von 10 mm (Mittelwert aus Netz 1 und Netz 2) durchzuführen, da dies eine angemessene Genauigkeit bei einer vernünftigen Rechenzeit mit sich bringt.

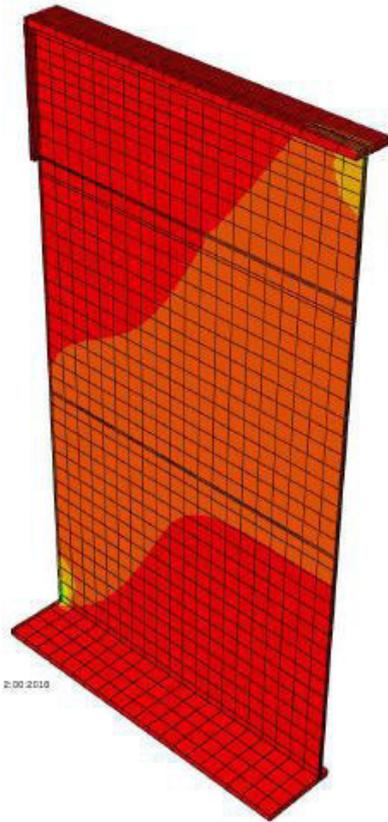


Abbildung 6.15: Vertikalspannungen an der Stegaußenseite; Netzverfeinerungsschritt 0

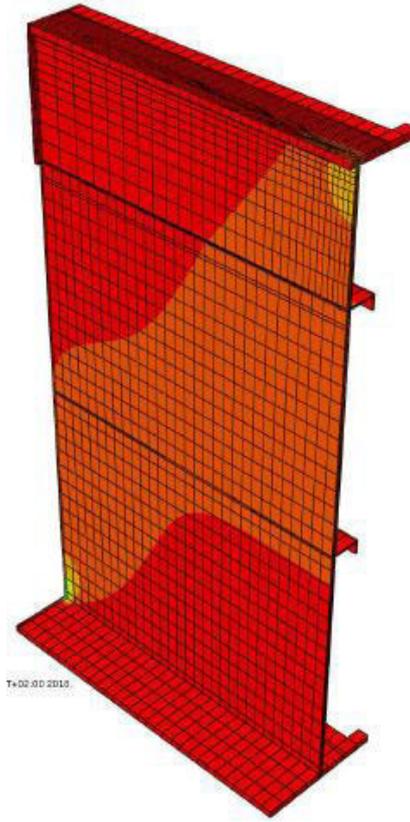


Abbildung 6.16: Vertikalspannungen an der Stegaußenseite; Netzverfeinerungsschritt 1

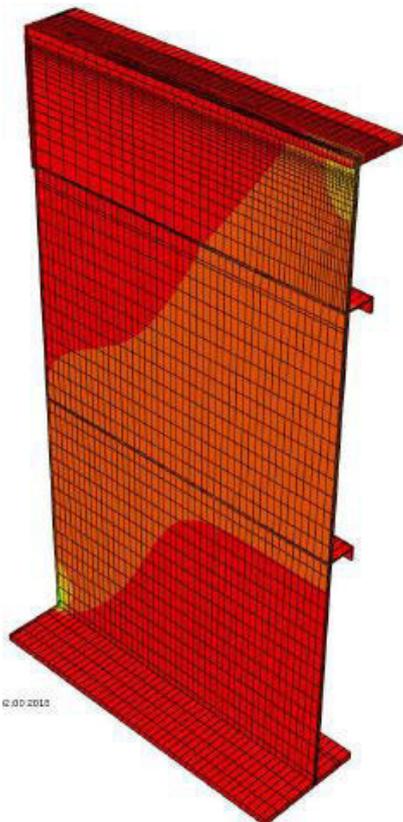


Abbildung 6.17: Vertikalspannungen an der Stegaußenseite; Netzverfeinerungsschritt 2

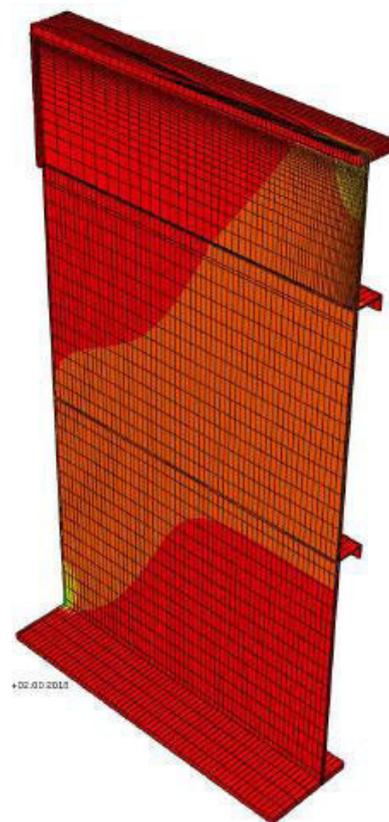


Abbildung 6.18: Vertikalspannungen an der Stegaußenseite; Netzverfeinerungsschritt 3

### 6.3 FE-Modell 0 im Detail

Im nachfolgenden Kapitel werden die Daten und Ergebnisse für das FE-Modell 0 aufbereitet. Es umfasst Spannungs- und Dehnungsdiagramme und die Ergebnisse werden jeweils mit der Norm verglichen. Für die Vergleiche mit der Norm werden die Berechnungen mit der abgenutzten Schiene mit 12,5 % herangezogen (siehe Kapitel 2.6).

In der nachfolgenden Abbildung kann man nochmals eine Darstellung der Modellierungsschritte erkennen. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit Modell 0, das im Bild rot umrahmt ist.

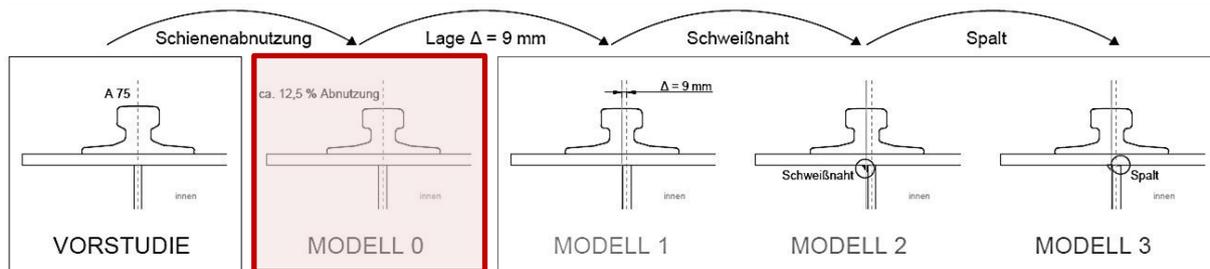


Abbildung 6.19: Schemaskizze der FEM-Studie

Das Modell 0 ist aus der Vorstudie entstanden und die Änderungen belaufen sich auf die Form der Schiene und auf die Lage der Schienenklemmen und der Führungsbacken.

Die Form der Schiene wurde nach der tatsächlichen Schienenform auf dem Versuchsträger erarbeitet (siehe auch Kapitel 4.2.1) und dann in die Software Abaqus implementiert. Die Abnutzung beläuft sich auf circa 12,5 %. Die Schiene wurde, genau wie in der Vorstudie, mit dem Mittelpunkt des Schienenkopfes direkt über der Stegmitte eingefügt.

Beim Erstellen der Vorstudie war noch nicht bekannt, wo sich die Schienenklemmen am Versuchsträger befinden. Daher wurden sie in regelmäßigen Abständen angeordnet. Zusätzlich zu den Schienenklemmen befanden sich an dem Versuchsträger allerdings auch Schienenbacken, das sind im Gegensatz zu den Schienenklemmen flache quaderförmige Stahlstücke, die keine Erhebung aufweisen und die Schiene nur gegen horizontale Verschiebungen sichern. Im Modell 0 wurde die exakte Lage der Schienenklemmen und Backen eingearbeitet und somit das FEM-Modell an die Realität angepasst.



Abbildung 6.20: Schienenklemmen  
 [Quelle: Markus Kettler, Februar 2018]



Abbildung 6.21: Backen und Klemmen am Träger  
 [Quelle: Markus Kettler, Februar 2018]

Die nachstehenden Bilder zeigen den schematischen Trägerquerschnitt (Abbildung 6.22) und einen Detailschnitt des FE-Modell mit dem Ergebnispfad (Abbildung 6.23). Dieser Pfad wurde so gelegt, dass er 30 mm unterhalb der Obergurt-Unterkante liegt, da in den Laborversuchen die DMS auch an dieser Stelle angebracht waren. Positive Exzentrizitäten bedeuten eine Radlastverschiebung nach außen.

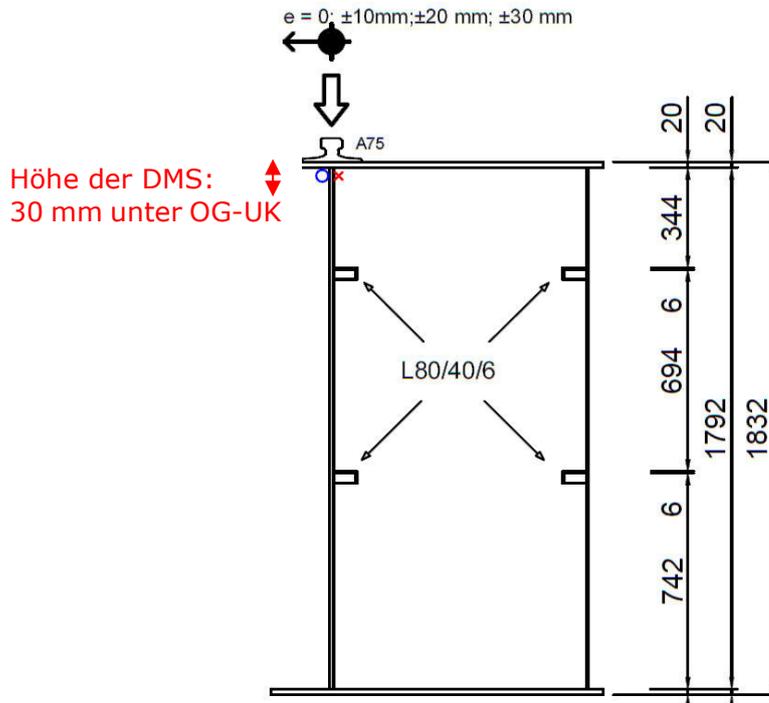


Abbildung 6.22: Trägerquerschnitt und Lage der DMS

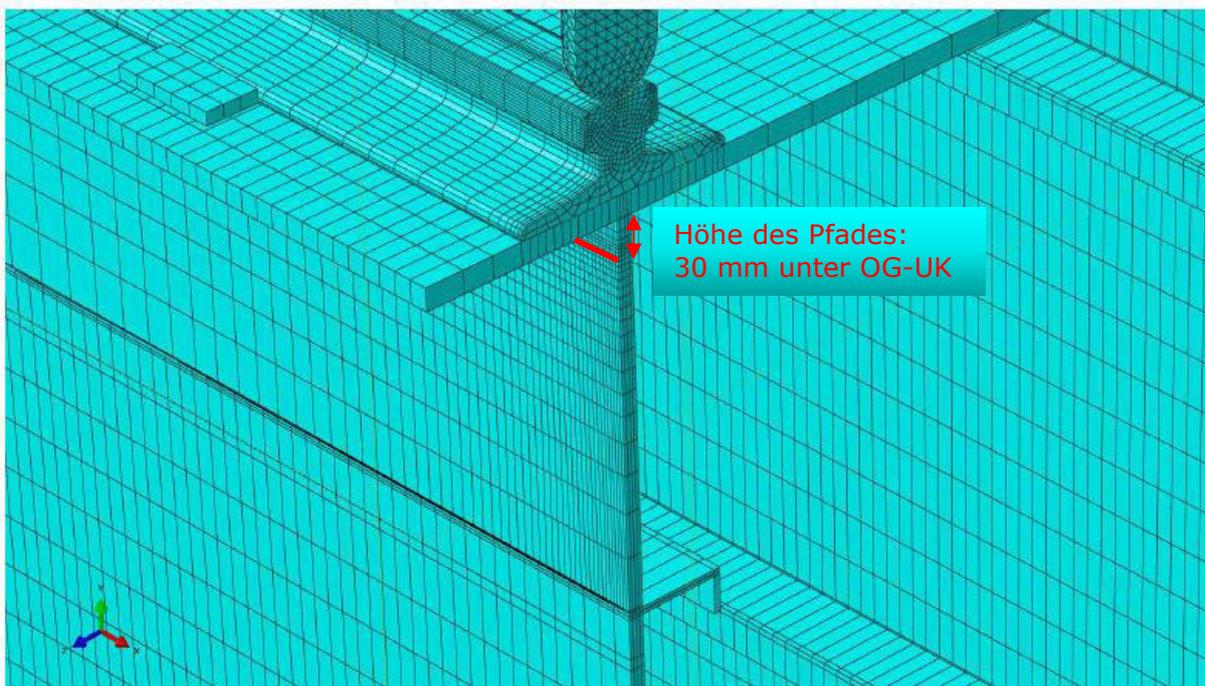


Abbildung 6.23: FE-Modell im Radlastbereich und Pfad der Dehnungen im FEM-Modell

### 6.3.1 Ergebnisvergleich für System LP I

#### 6.3.1.1 System LP I – zentrische Lasteinleitung (e=0)

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die roten Linien stellen die Vergleichswerte aus der Norm dar (Berechnung siehe Abschnitt 2.1 und 2.2). Der Normwert der Dehnungen wurde nach Variante D2 (siehe Kapitel 2.4.2) ermittelt.

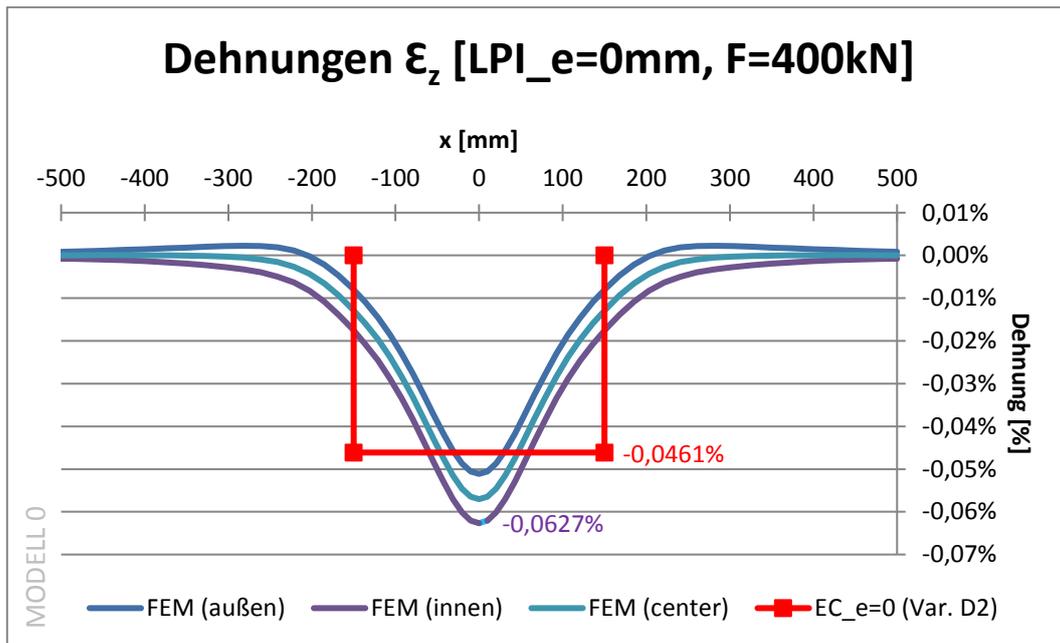


Abbildung 6.24: Dehnungsdiagramm LP I, ohne Exzentrizität, Modell 0

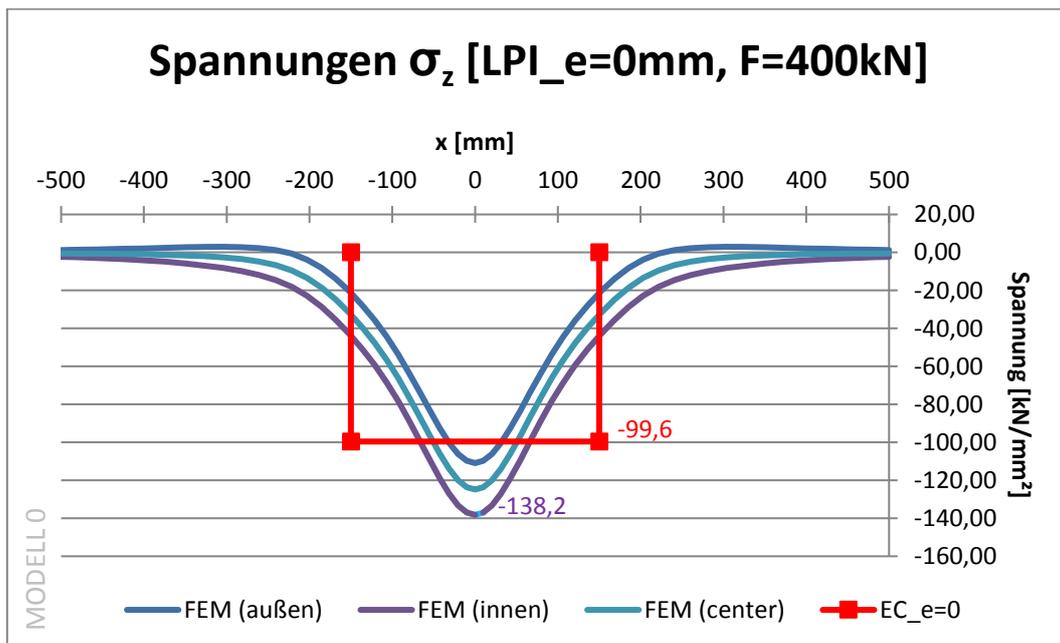


Abbildung 6.25: Spannungsdiagramm LP I, ohne Exzentrizität, Modell 0

6.3.1.2 System LP I – Lasteinleitung  $e=+10$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die roten Linien stellen die Vergleichswerte aus der Norm dar.

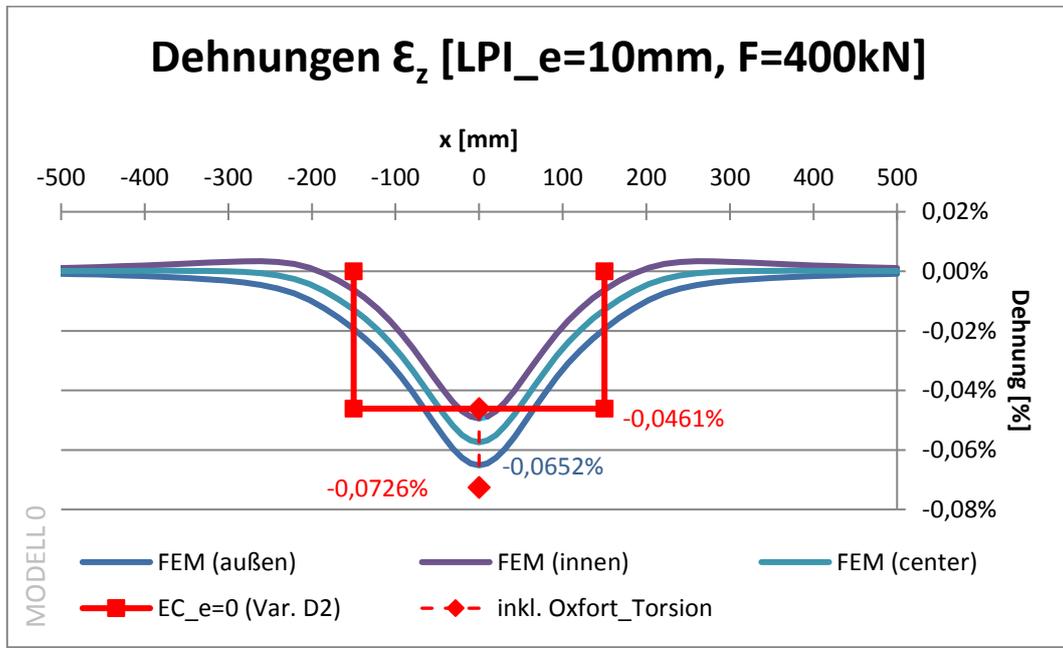


Abbildung 6.26: Dehnungsdiagramm LP I, Exzentrizität +10 mm, Modell 0

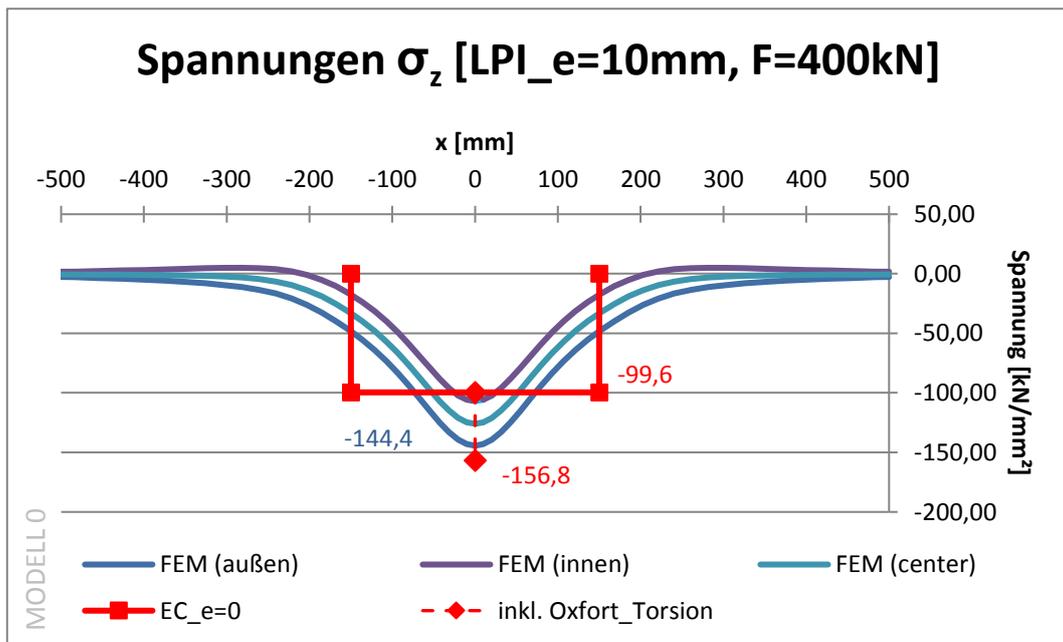


Abbildung 6.27: Spannungsdiagramm LP I, Exzentrizität +10 mm, Modell 0

6.3.1.3 System LP I – Lasteinleitung  $e=+20$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die roten Linien stellen die Vergleichswerte aus der Norm dar.

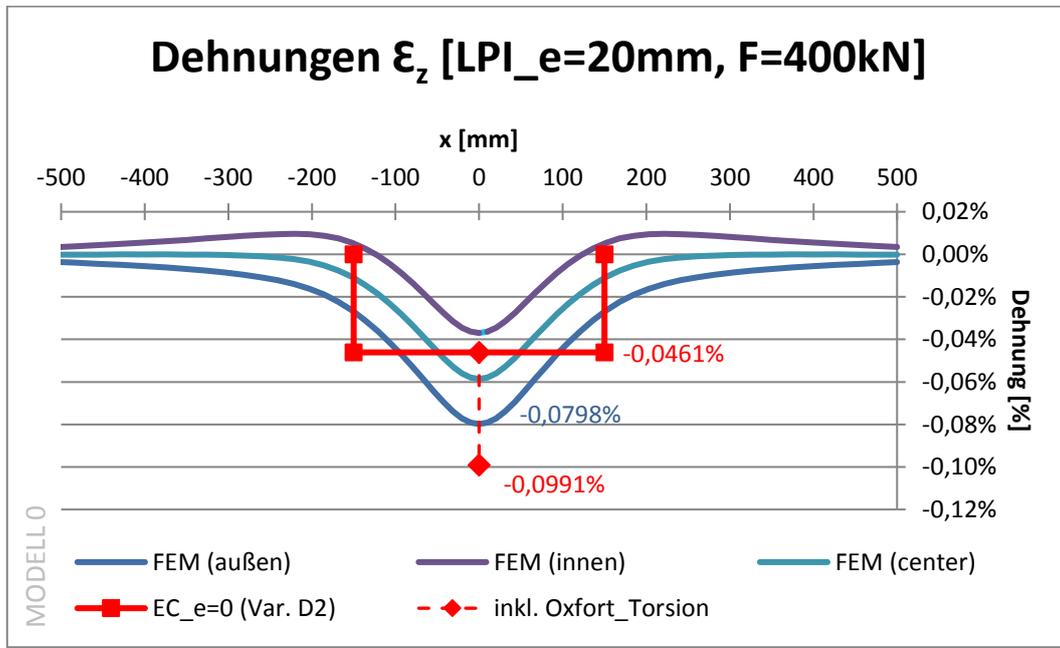


Abbildung 6.28: Dehnungsdiagramm LP I, Exzentrizität +20 mm, Modell 0

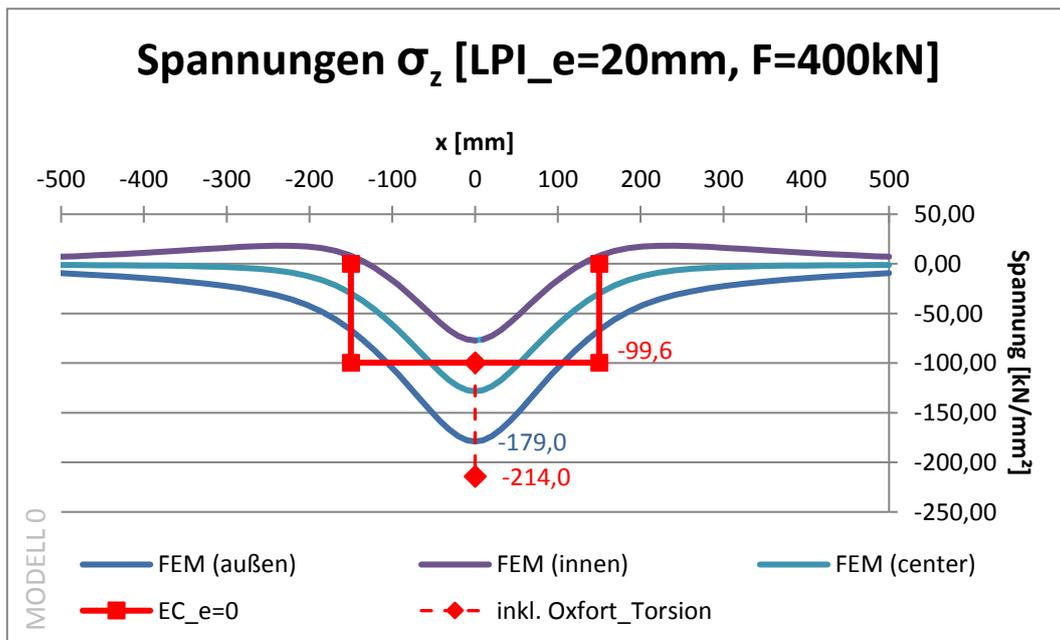


Abbildung 6.29: Spannungsdiagramm LP I, Exzentrizität +20 mm, Modell 0

6.3.1.4 System LP I – Lasteinleitung  $e=+30$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die roten Linien stellen die Vergleichswerte aus der Norm dar.

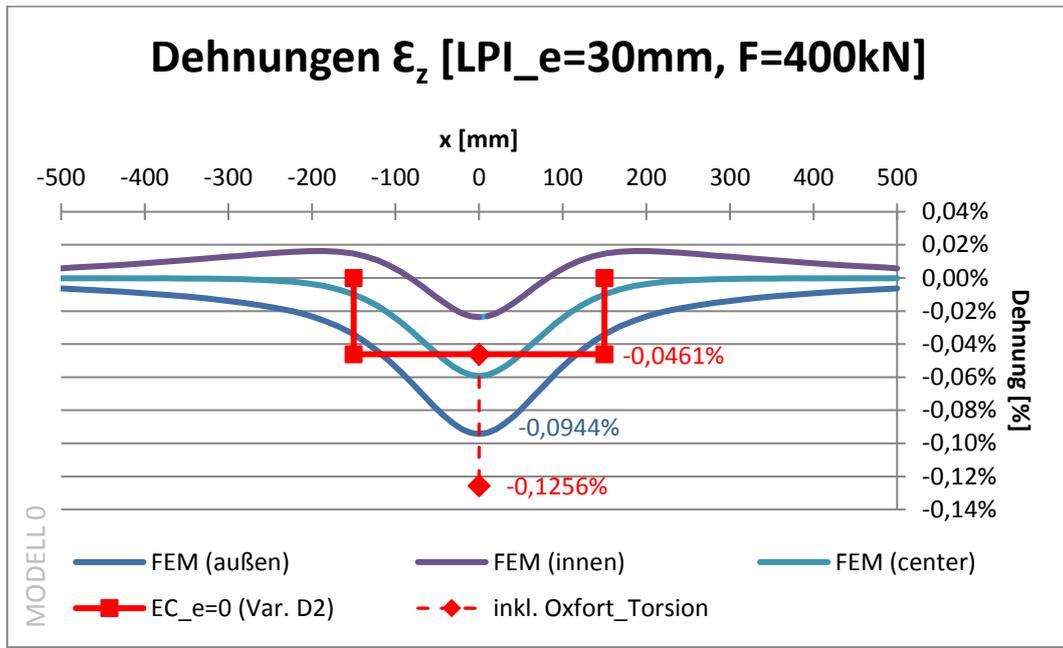


Abbildung 6.30: Dehnungsdiagramm LP I, Exzentrizität +30 mm, Modell 0

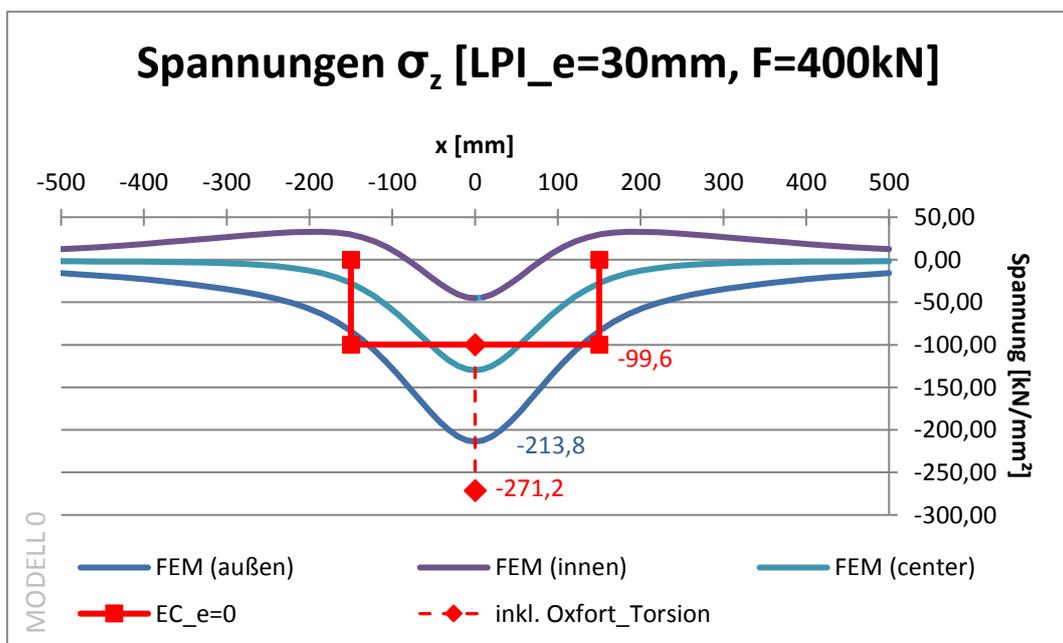


Abbildung 6.31: Spannungsdiagramm LP I, Exzentrizität +30 mm, Modell 0

6.3.1.5 System LP I – Lasteinleitung  $e=-10$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die roten Linien stellen die Vergleichswerte aus der Norm dar.

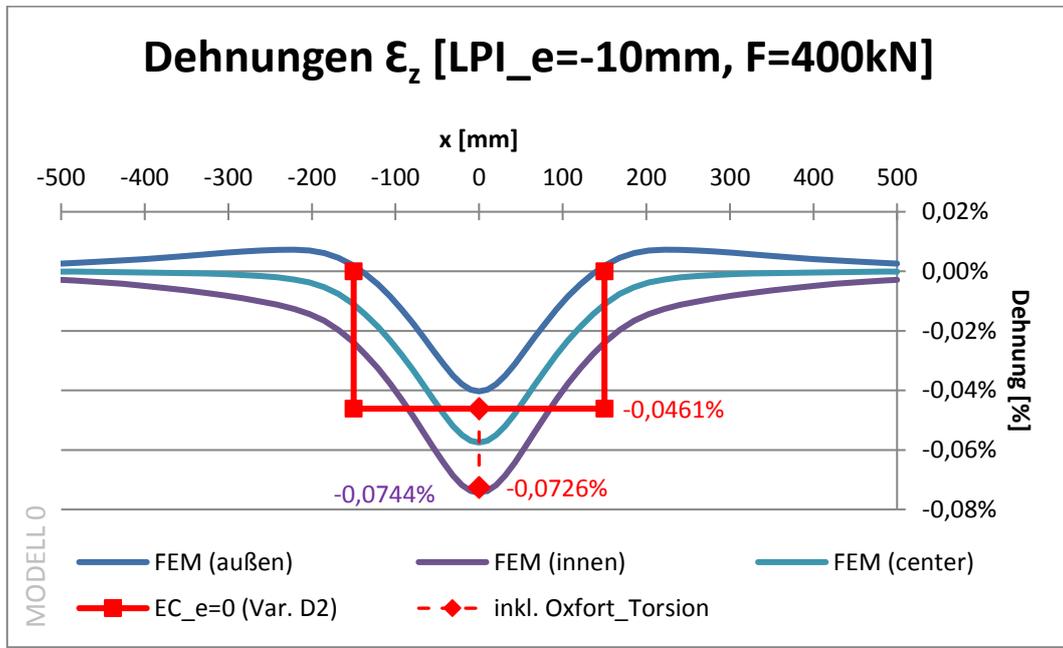


Abbildung 6.32: Dehnungsdiagramm LP I, Exzentrizität -10 mm, Modell 0

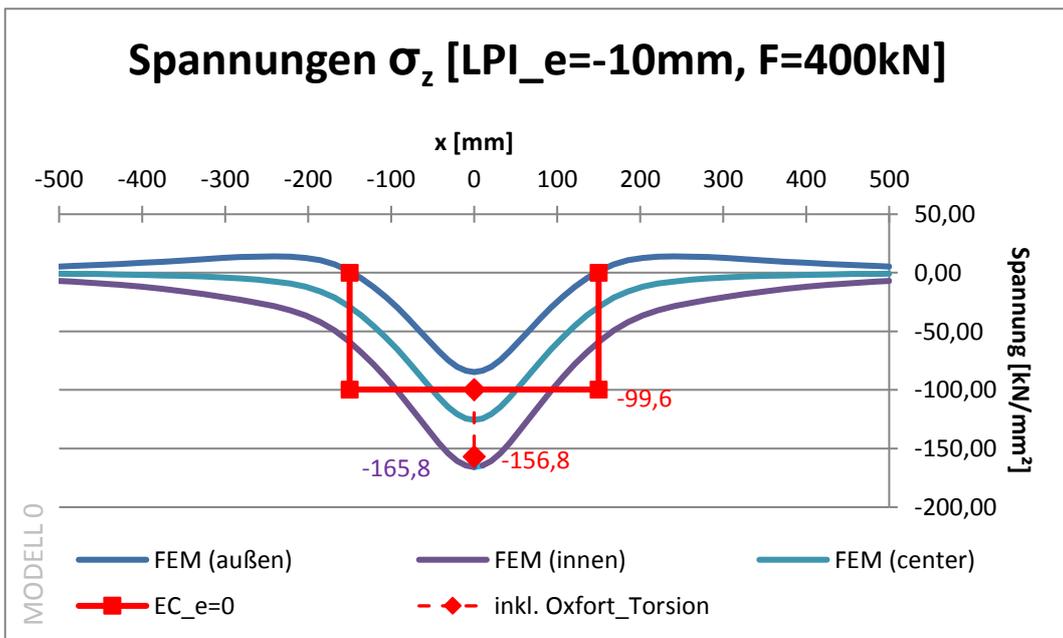


Abbildung 6.33: Spannungsdiagramm LP I, Exzentrizität -10 mm, Modell 0

6.3.1.6 System LP I – Lasteinleitung  $e=-20$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die roten Linien stellen die Vergleichswerte aus der Norm dar.

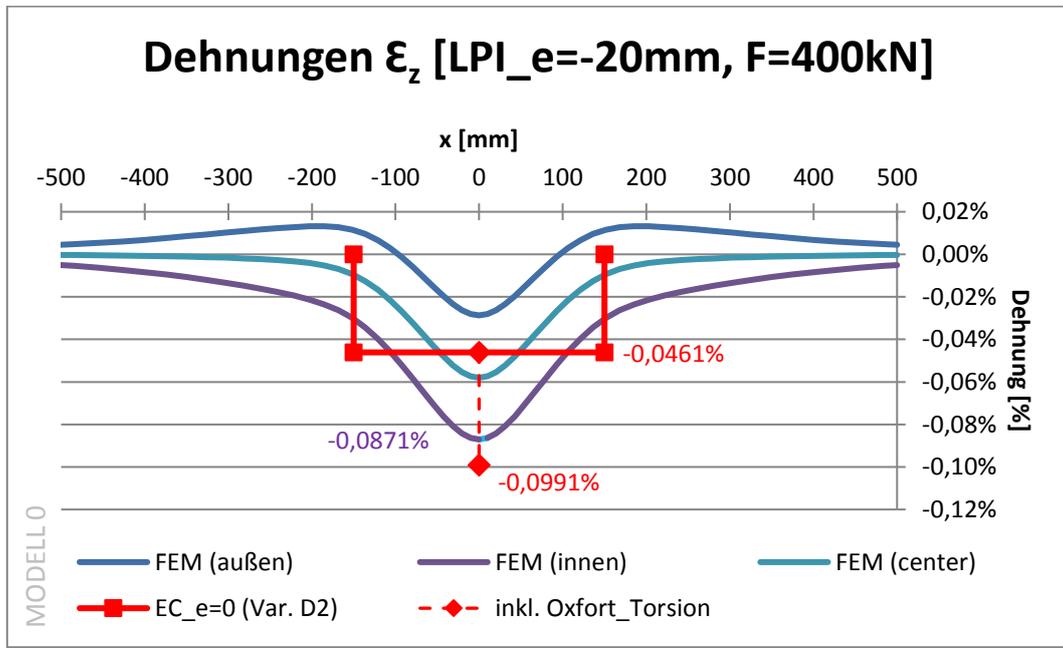


Abbildung 6.34: Dehnungsdiagramm LP I, Exzentrizität -20 mm, Modell 0

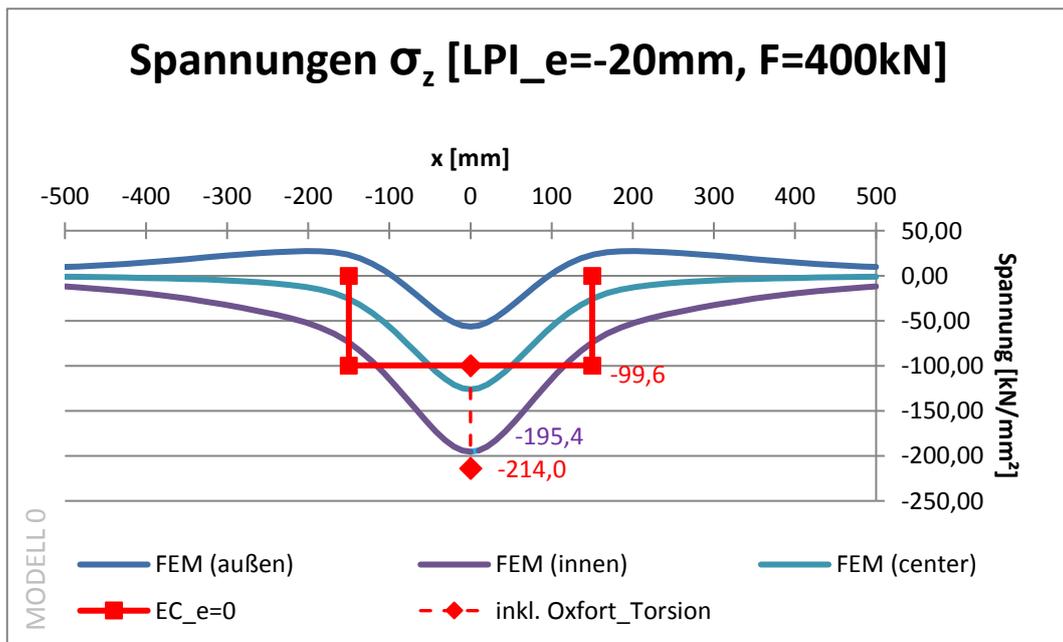


Abbildung 6.35: Spannungsdiagramm LP I, Exzentrizität -20 mm, Modell 0

### 6.3.1.7 System LP I – Vergleich Kontaktdruck und Abhebungen (Kontaktverlust)

In diesem Kapitel wird ein Vergleich zwischen der Lasteinleitung ohne Exzentrizität und mit der größten Exzentrizität (30 Millimeter) angestellt. Dabei werden die Schiene und die Klemmen genauer betrachtet.

Abbildung 6.36 und Abbildung 6.37 zeigen die Unterseite der Schiene bei Kontaktdruck. Man kann erkennen, dass der maximale Kontaktdruck bei  $e=0$  mm bei circa  $63 \text{ kN/mm}^2$  und mit  $e=30$  mm bei ungefähr  $72 \text{ kN/mm}^2$  liegt. Die Spannungsspitzen liegen beide Male sehr zentrisch unter der Lasteinleitung.

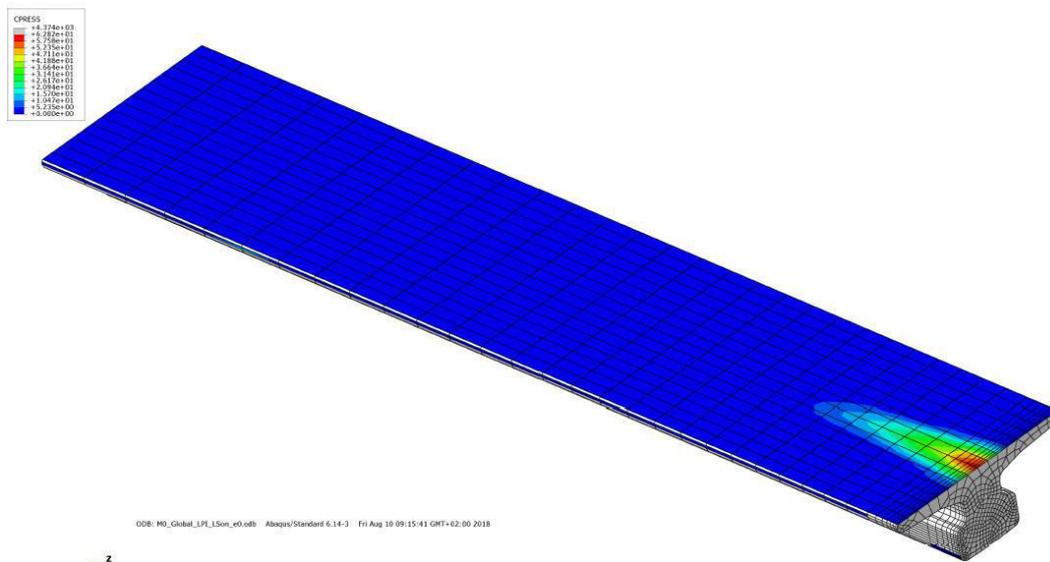


Abbildung 6.36: Vertikaler Kontaktdruck an der Schienenunterseite bei  $e=0$  mm

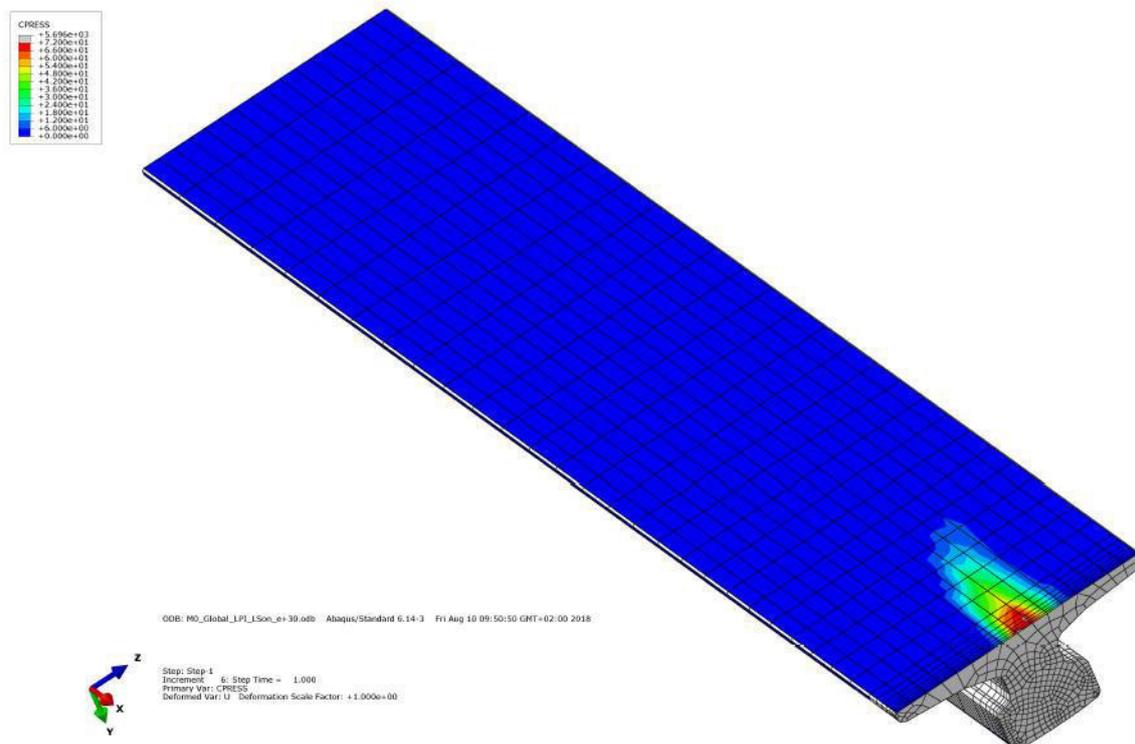


Abbildung 6.37: Vertikaler Kontaktdruck an der Schienenunterseite bei  $e=+30$  mm

Die nachstehenden Abbildungen zeigen die Oberseite der Schiene und den Schienenkopf bei Kontaktdruck. Hier wiederum relevant ist der Bereich zwischen Schiene und Schienenklemmen (siehe Abbildung 6.38 und 6.39 bzw. Abbildung 6.42 und 6.43). Es zeigt sich, dass kein Kontaktdruck zwischen Schiene und Schienenklemmen herrscht. Das Ergebnis ist dasselbe ohne und mit Exzentrizität.

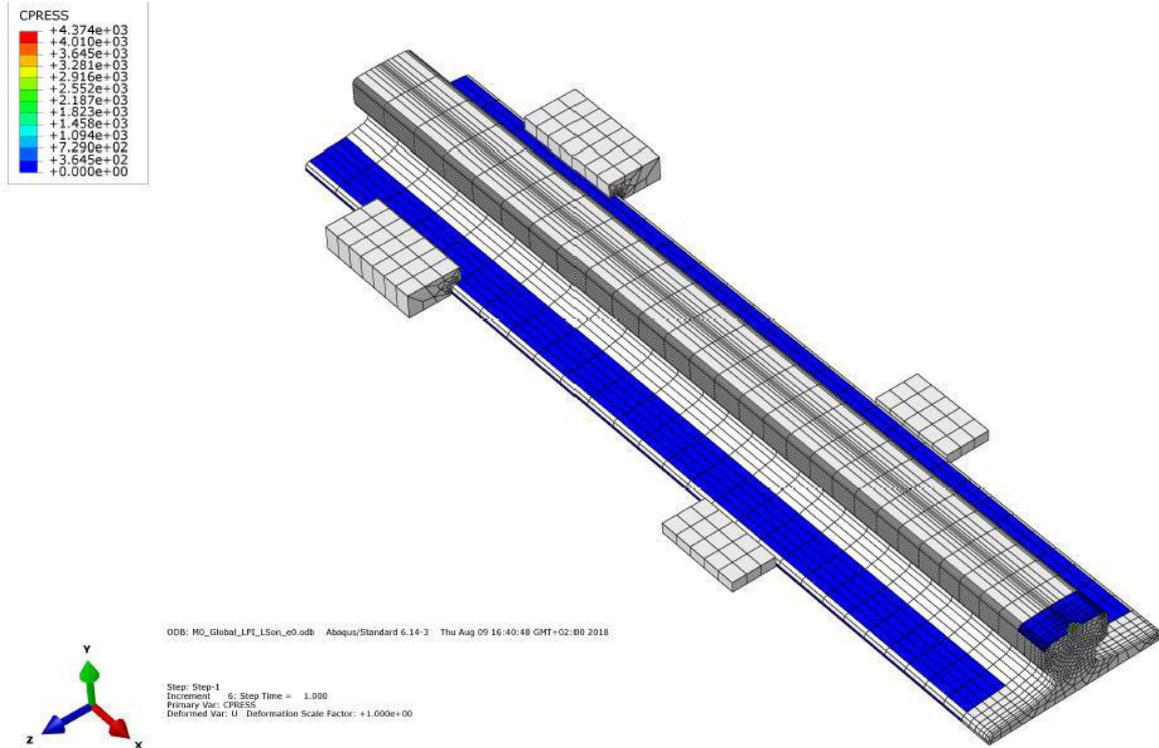


Abbildung 6.38: Kontaktdruck Schienenoberseite bei  $e = 0$  mm

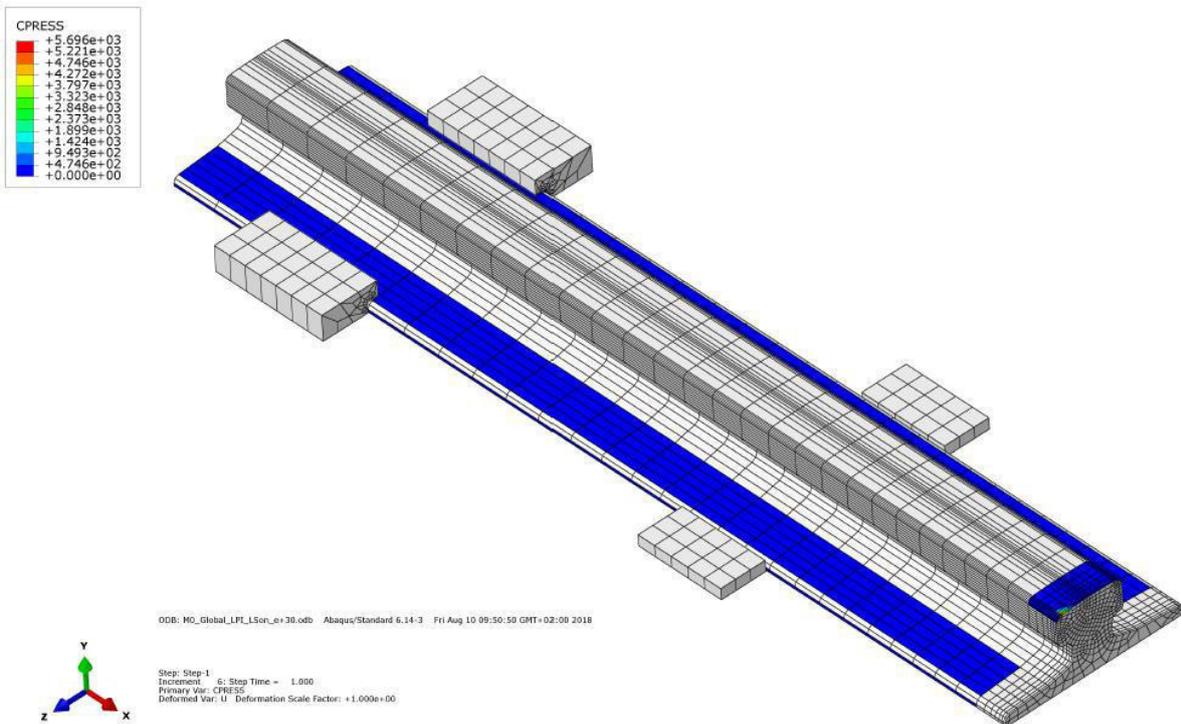


Abbildung 6.39: Kontaktdruck Schienenoberseite bei  $e = +30$  mm

Die beiden nachstehenden Abbildungen zeigen den Kontaktverlust an der Schienenunterseite. Beim ersten Bild (Abbildung 6.40), also der Belastung ohne Exzentrizität, hebt der hintere Bereich (beim Auflager) leicht ab. In Zahlenwerten liegt der Kontaktverlust bei circa 0,4 Millimeter.

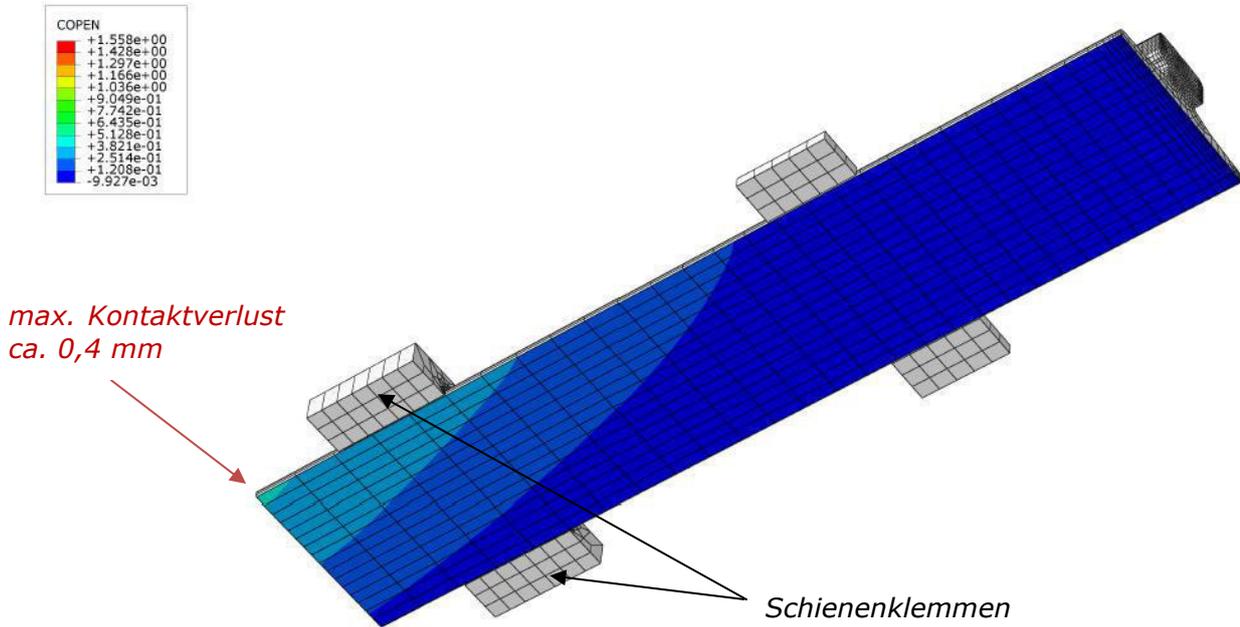


Abbildung 6.40: Kontaktverlust Schiene mit Lasteinleitung bei  $e = 0$  mm

Bei der Belastung mit Exzentrizität  $e = +30$  mm ist der maximale Abhebewert deutlich größer. Hier beläuft sich der Wert auf circa 1,3 Millimeter.

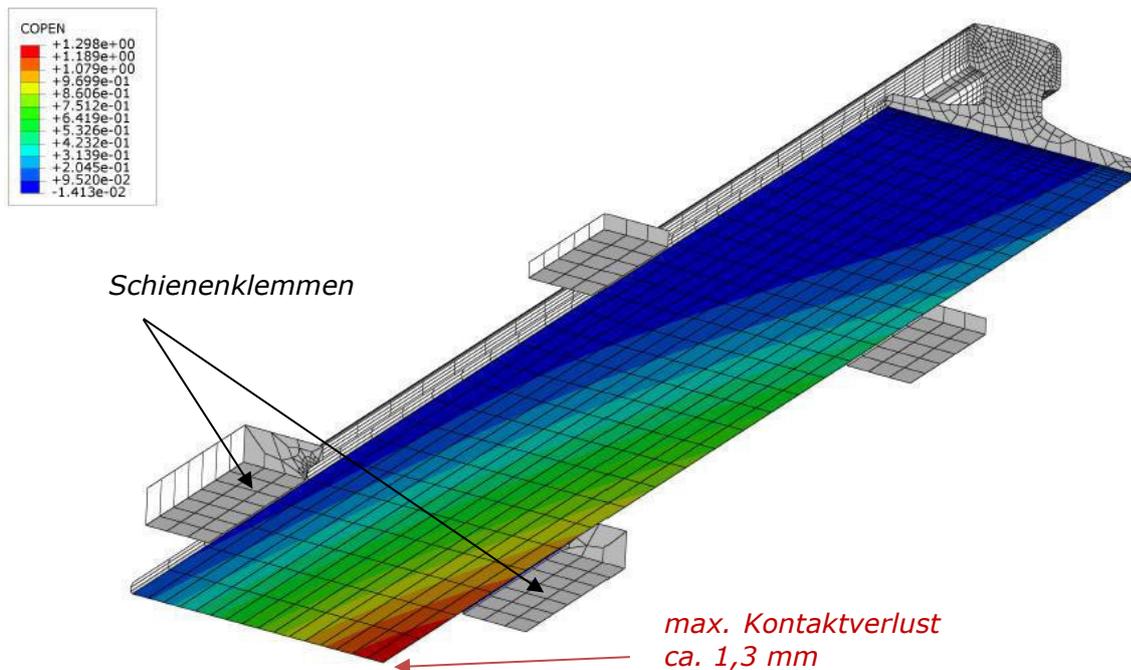


Abbildung 6.41: Kontaktverlust Schiene mit Lasteinleitung bei  $e = +30$  mm

Auf den beiden Abbildungen (6.42 und 6.43) sind die Schienenklemmen einzeln im Bereich der abhebenden Schiene zu sehen. Dargestellt sind die vertikalen Spannungen  $\sigma_z$ . Es ist erkennbar, dass durch das lokale Abheben der Schiene noch keinerlei vertikale Kraftübertragung an der Schienenklemme stattfindet.

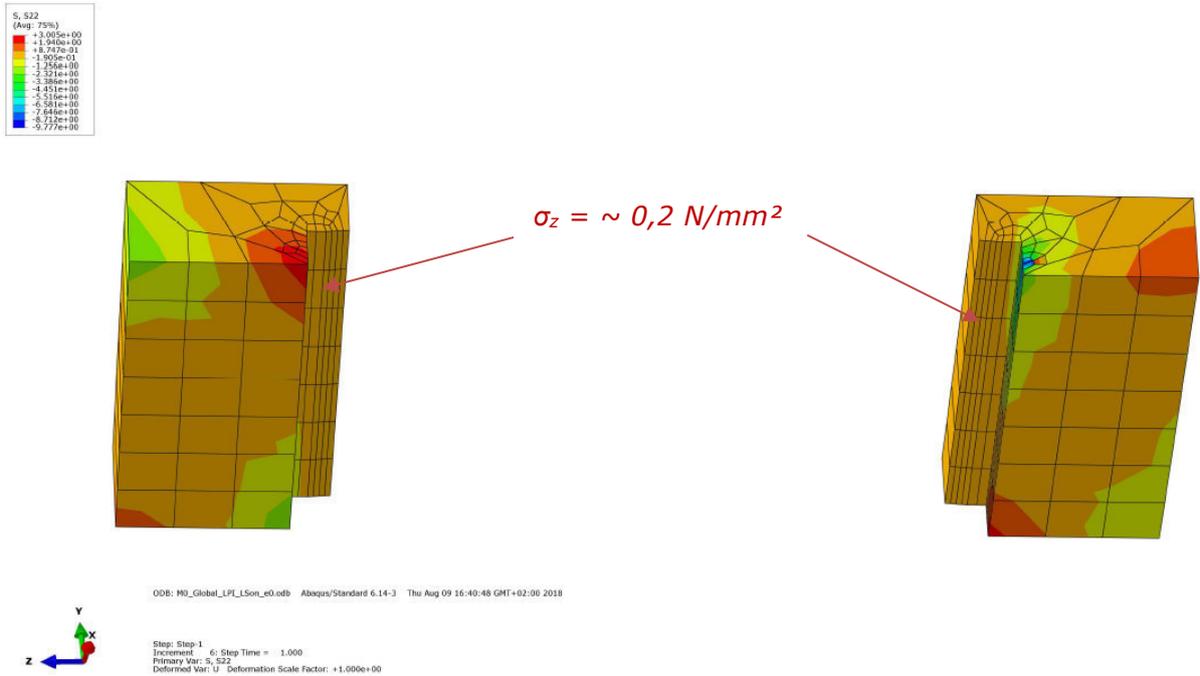


Abbildung 6.42: Vertikale Spannungen  $\sigma_z$  an der Schienenklemme, mit Lasteinleitung  $e=0$  mm

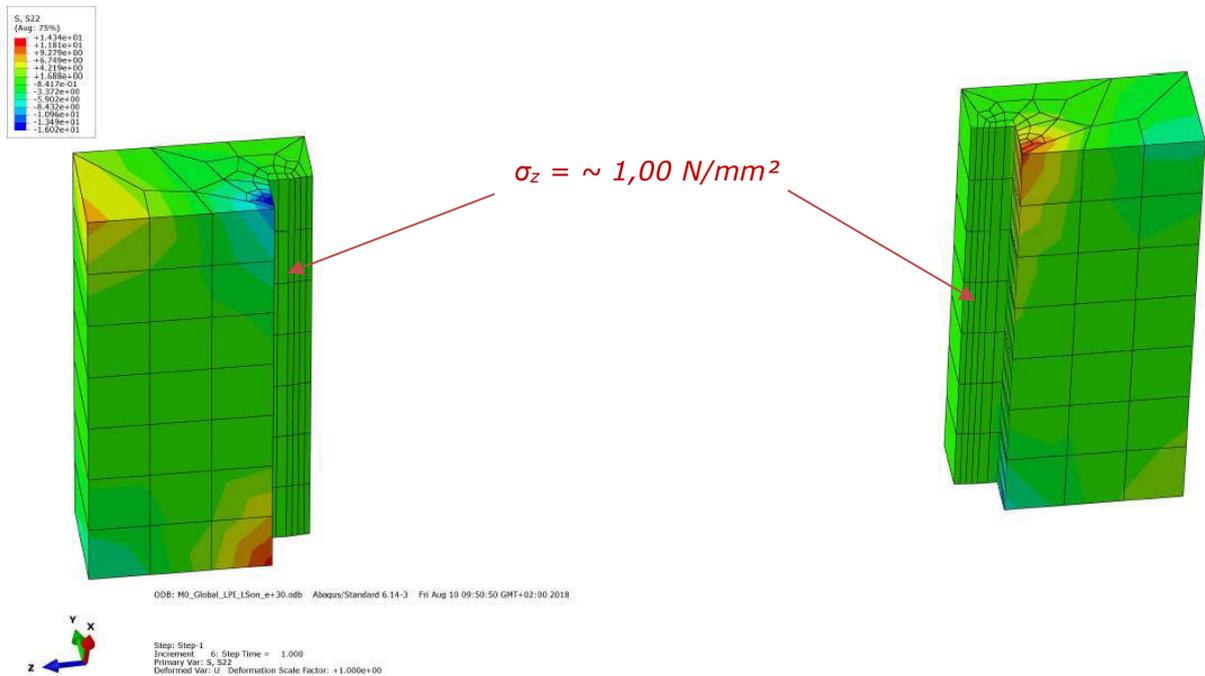


Abbildung 6.43: Vertikale Spannungen  $\sigma_z$  an der Schienenklemme, mit Lasteinleitung  $e= +30$  mm

Die geringen Spannungen, die auf den Abbildungen 6.42 und 6.43 erkennbar sind, sind auf die Dehnungen des Obergurts zurückzuführen, die Sekundärspannungen im Bereich der Schienenklemmen hervorrufen.

### 6.3.2 Ergebnisvergleich für System LP III

#### 6.3.2.1 System LP III – zentrische Lasteinleitung (e=0)

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Steg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die roten Linien stellen die Vergleichswerte aus der Norm dar. Der Normwert der Dehnungen wurde nach Variante D2 (siehe Kapitel 2.4.2) ermittelt.

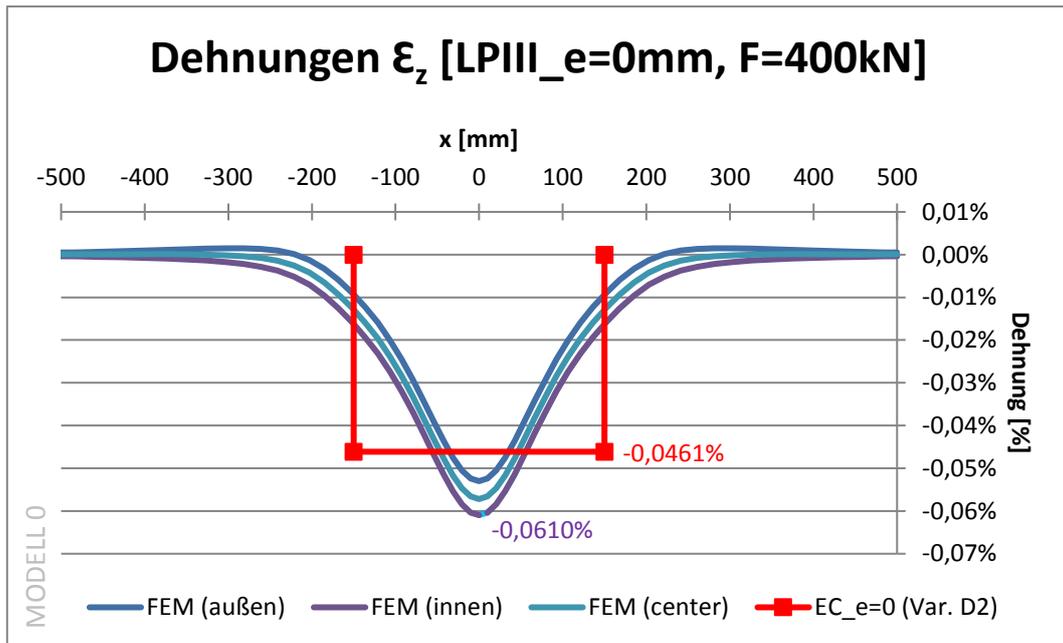


Abbildung 6.44: Dehnungsdiagramm LP III, ohne Exzentrizität, Modell 0

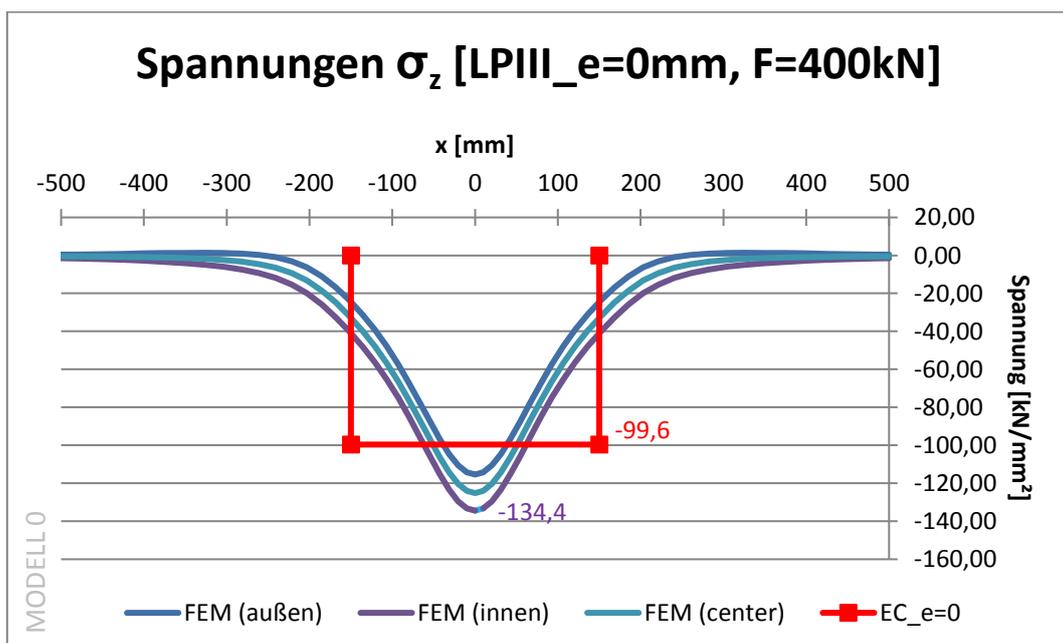


Abbildung 6.45: Spannungsdiagramm LP III, ohne Exzentrizität, Modell 0

6.3.2.2 System LP III – Lasteinleitung:  $e=+10$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Steg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die roten Linien stellen die Vergleichswerte aus der Norm dar.

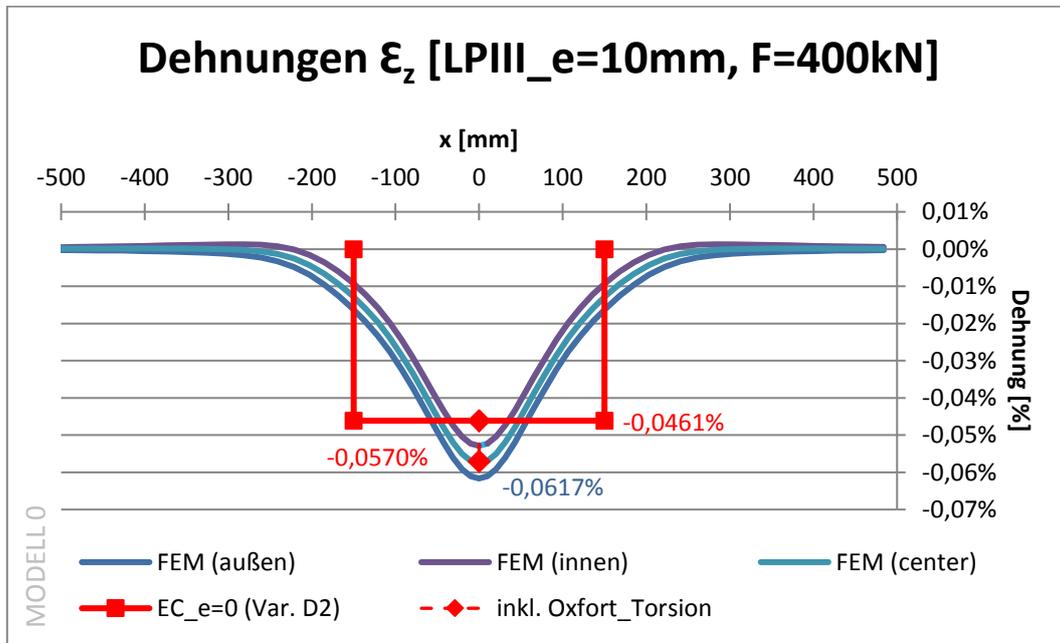


Abbildung 6.46: Dehnungsdiagramm LP III, Exzentrizität +10 mm, Modell 0

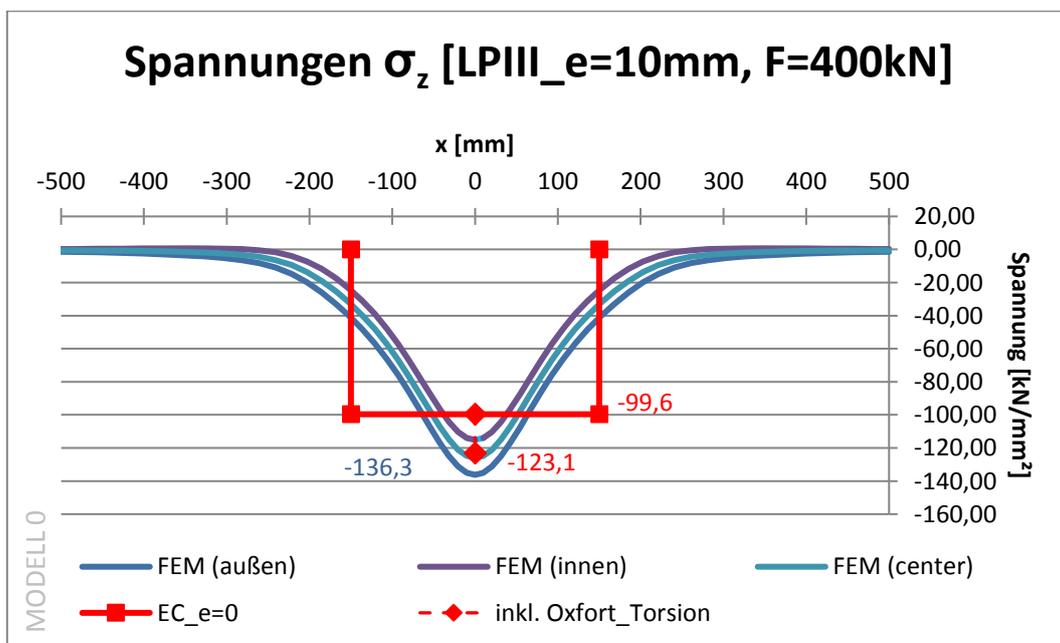


Abbildung 6.47: Spannungsdiagramm LP III, Exzentrizität +10 mm, Modell 0

6.3.2.3 System LP III – Lasteinleitung:  $e=+20$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Steg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die roten Linien stellen die Vergleichswerte aus der Norm dar.

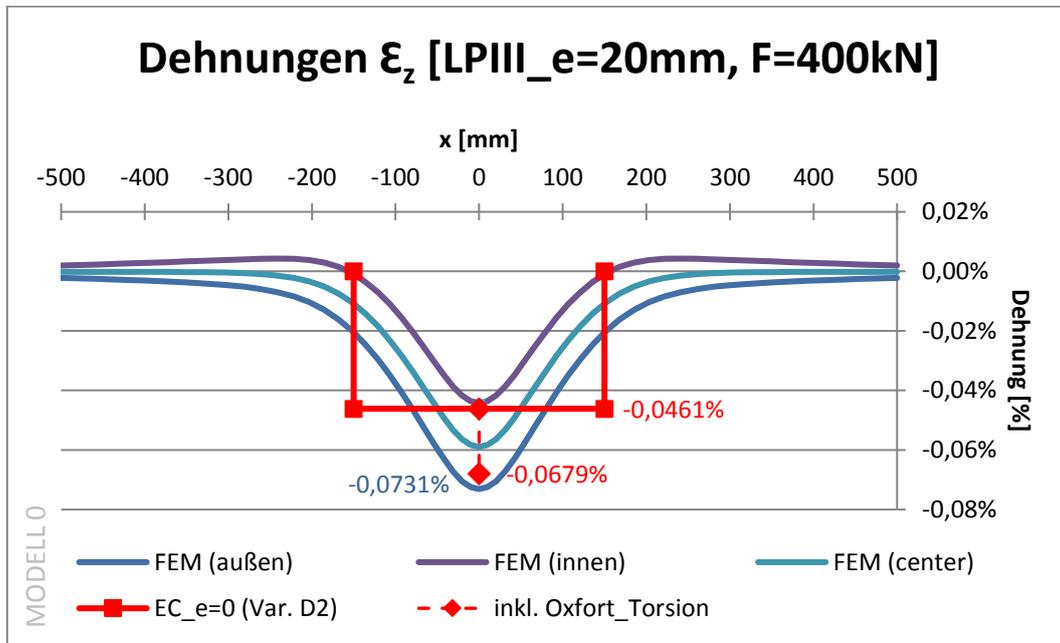


Abbildung 6.48: Dehnungsdiagramm LP III, Exzentrizität +20 mm, Modell 0

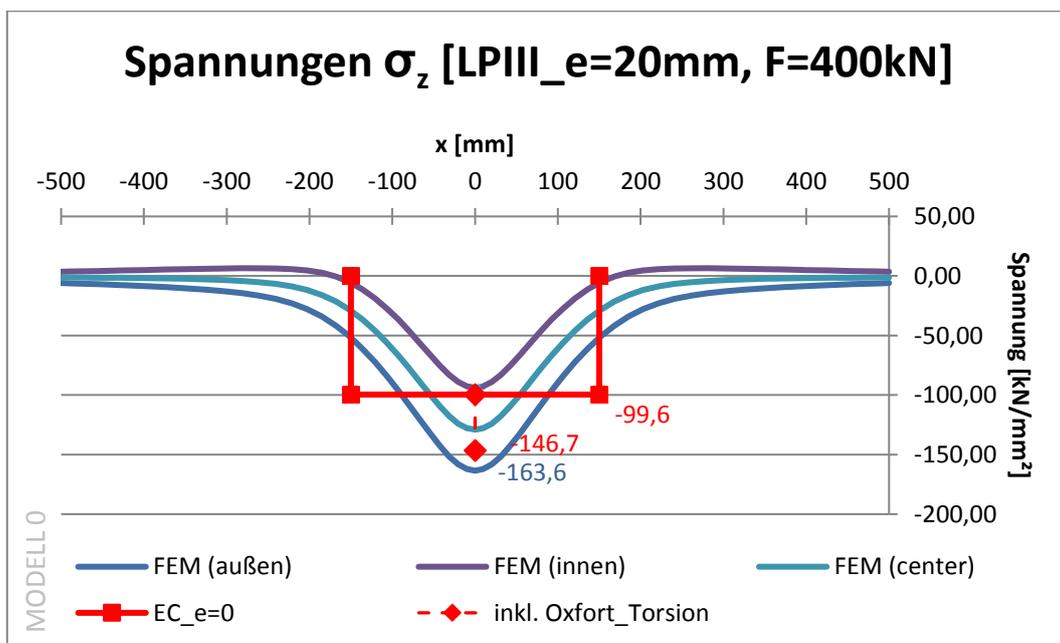


Abbildung 6.49: Spannungsdiagramm LP III, Exzentrizität +20 mm, Modell 0

6.3.2.4 System LP III – Lasteinleitung:  $e=+30$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Steg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die roten Linien stellen die Vergleichswerte aus der Norm dar.

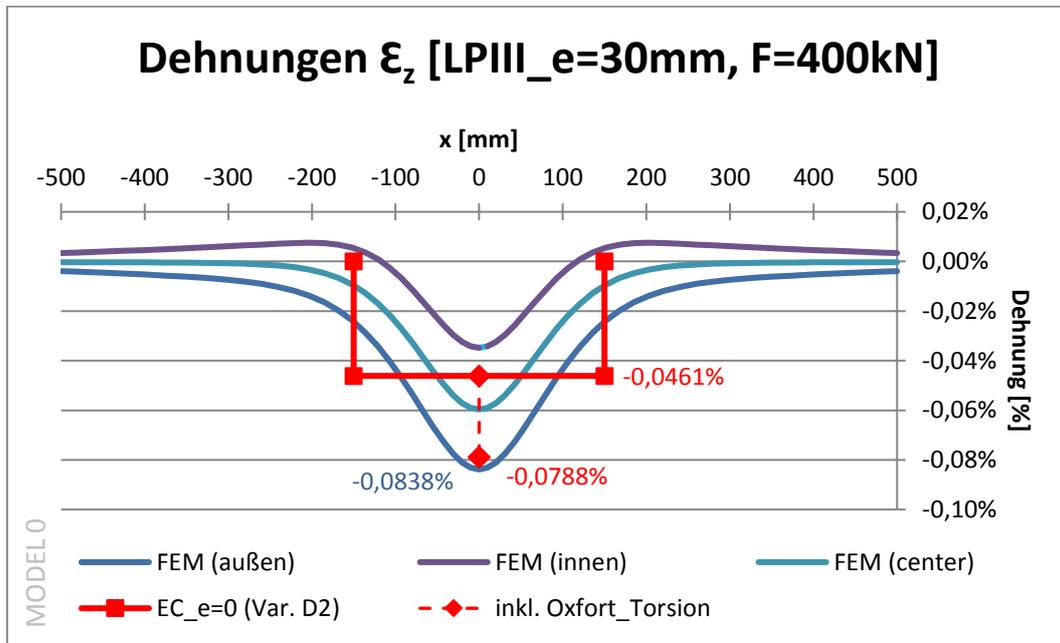


Abbildung 6.50: Dehnungsdiagramm LP III, Exzentrizität +30 mm, Modell 0

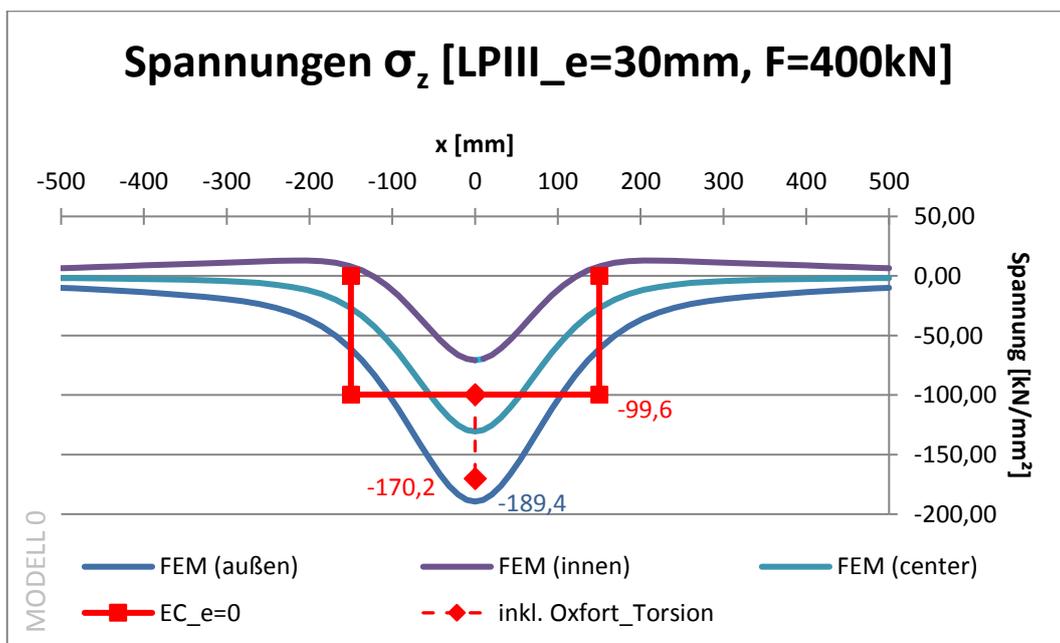


Abbildung 6.51: Spannungsdiagramm LP III, Exzentrizität +30 mm, Modell 0

6.3.2.5 System LP III – Lasteinleitung:  $e=-10$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Steg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die roten Linien stellen die Vergleichswerte aus der Norm dar.

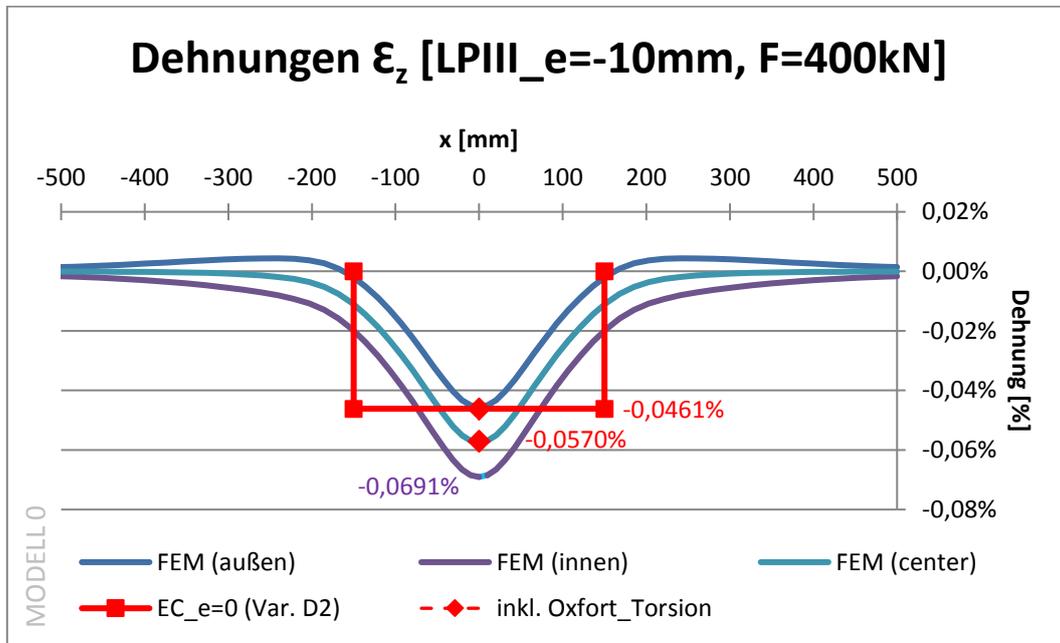


Abbildung 6.52: Dehnungsdiagramm LP III, Exzentrizität -10 mm, Modell 0

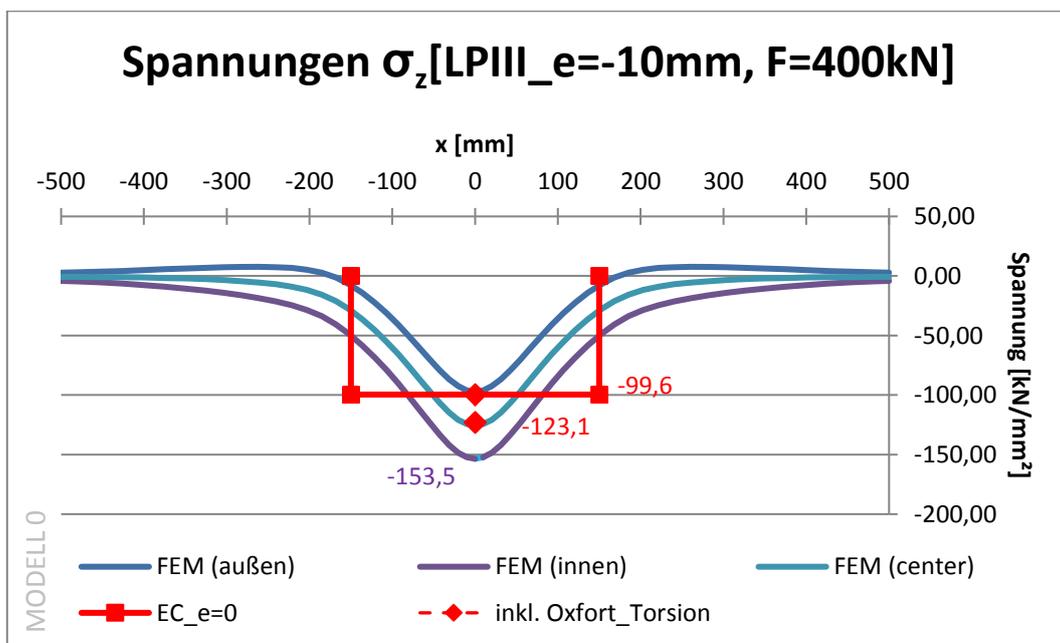


Abbildung 6.53: Spannungsdiagramm LP III, Exzentrizität -10 mm, Modell 0

6.3.2.6 System LP III – Lasteinleitung:  $e=-20$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Steg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die roten Linien stellen die Vergleichswerte aus der Norm dar.

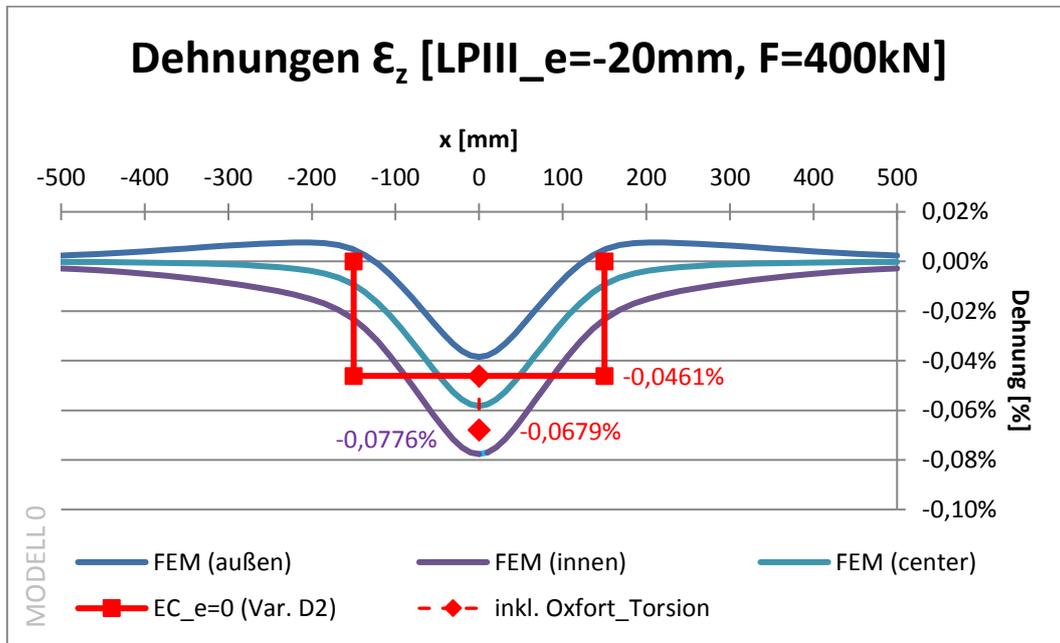


Abbildung 6.54: Dehnungsdiagramm LP III, Exzentrizität -20 mm, Modell 0

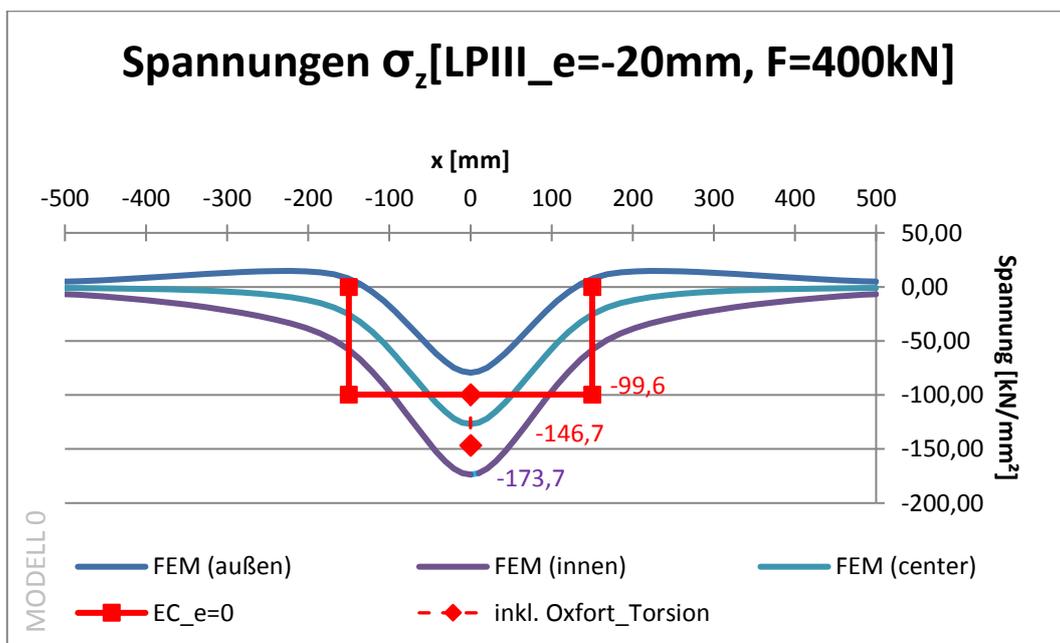


Abbildung 6.55: Spannungsdiagramm LP III, Exzentrizität -20 mm, Modell 0

## 6.4 Vergleich Vorstudie mit Modell 0

Im nachfolgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Vorstudie mit denen des Modell 0 verglichen.

### 6.4.1 Ergebnisvergleich für System LP I

#### 6.4.1.1 System LP I – zentrische Lasteinleitung (e=0)

Nachfolgend zeigen die Diagramme den Vergleich zwischen der Vorstudie und Modell 0. Zuerst sind die Diagramme ohne Exzentrizität abgebildet. Dafür wurden die einzelnen Ergebnisverläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Steg und innenseitig am Steg) herausgegriffen, was der besseren Übersichtlichkeit dienen soll.

Tabelle 6.3: Ergebnisvergleich Vorstudie zu Modell 0, System LPI ohne Exzentrizität, F = 400 kN

| <b>LPI e=0 mm</b>  | <b>Außenseitig</b> | <b>Zentrisch im Steg</b> | <b>Innenseitig</b> |
|--------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|
| Vorstudie          | -0,0517 %          | -0,0521 %                | -0,0564 %          |
| Modell 0           | -0,0511%           | -0,0570 %                | -0,0627 %          |
| Abweichung Absolut | 0,0006             | -0,0049                  | -0,0063            |
| Abweichung in %    | -1,16 %            | 9,40 %                   | 1,12 %             |

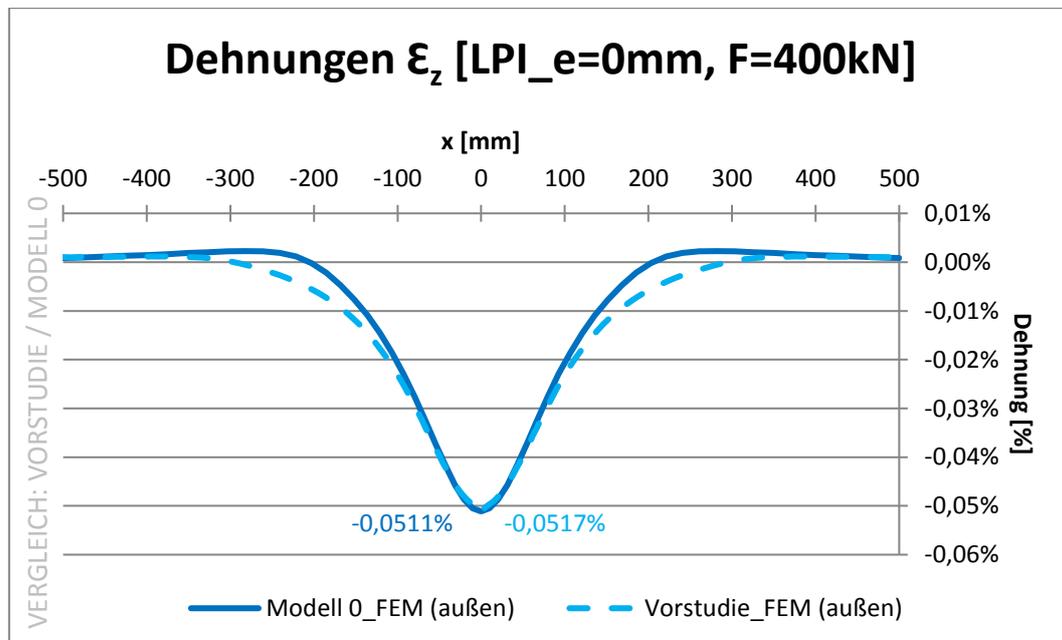


Abbildung 6.56: Dehnungsdiagramm im Vergleich für System LP I, ohne Exzentrizität, außenseitig am Steg

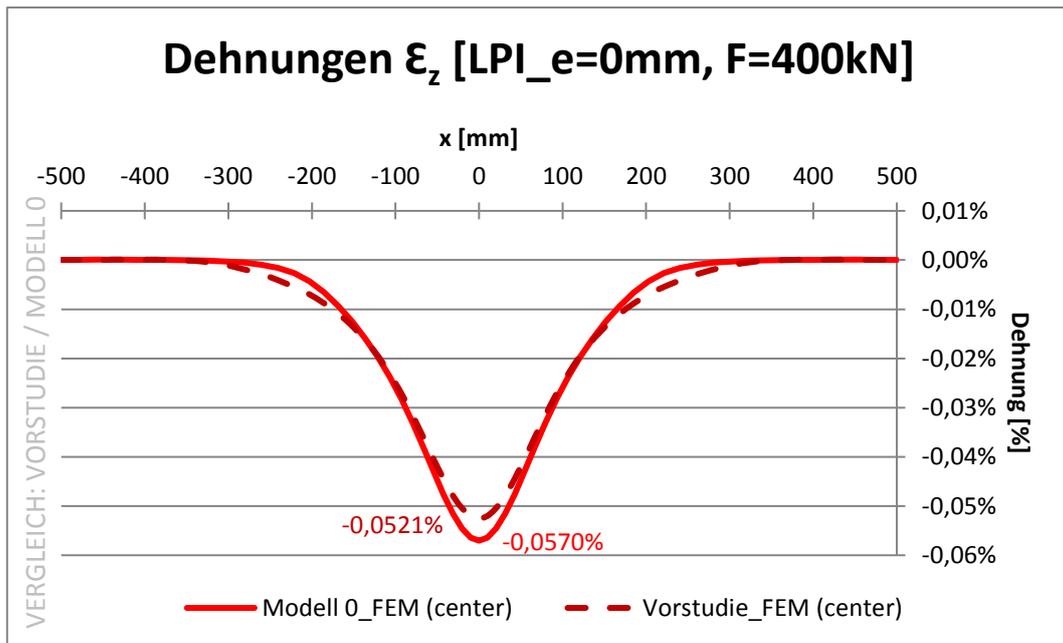


Abbildung 6.57: Dehnungsdiagramm im Vergleich für System LP I, ohne Exzentrizität, in Stegmitte

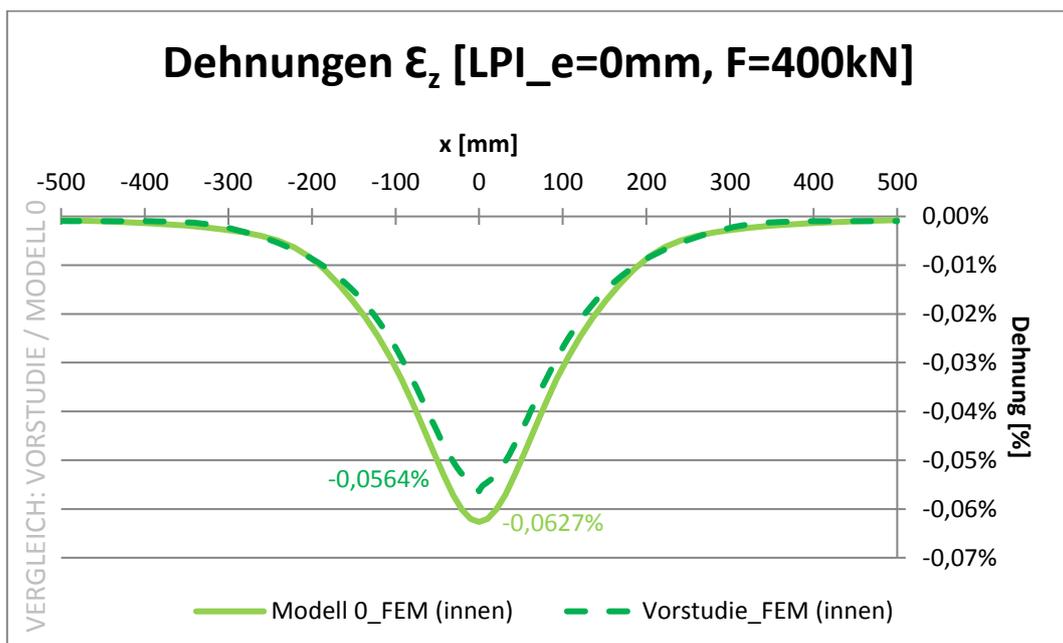


Abbildung 6.58: Dehnungsdiagramm im Vergleich für System LP I, ohne Exzentrizität, innenseitig am Steg

Wie man erkennen kann, ist die Abweichung an der Steginnenseite am größten. Die Abweichung an der Stegaußenseite ist nahezu nicht vorhanden.

### 6.4.1.2 System LP I – exzentrische Lasteinleitung bei $e=+30$

Das nachfolgende Diagramm zeigt den Vergleich zwischen Vorstudie und Modell 0 bei der Lastaufbringung mit +30 mm Exzentrizität. Hierbei wurden alle Verläufe in einem Diagramm abgebildet. Man erkennt deutlich, dass der Unterschied zwischen den Werten, die in der Stegmitte abgegriffen wurden, sehr gering ist. Die Abweichung der Werte, die außenseitig am Steg gemessen worden sind, ist am größten. Somit kehrt sich der Effekt zu den Werten ohne Exzentrizität um.

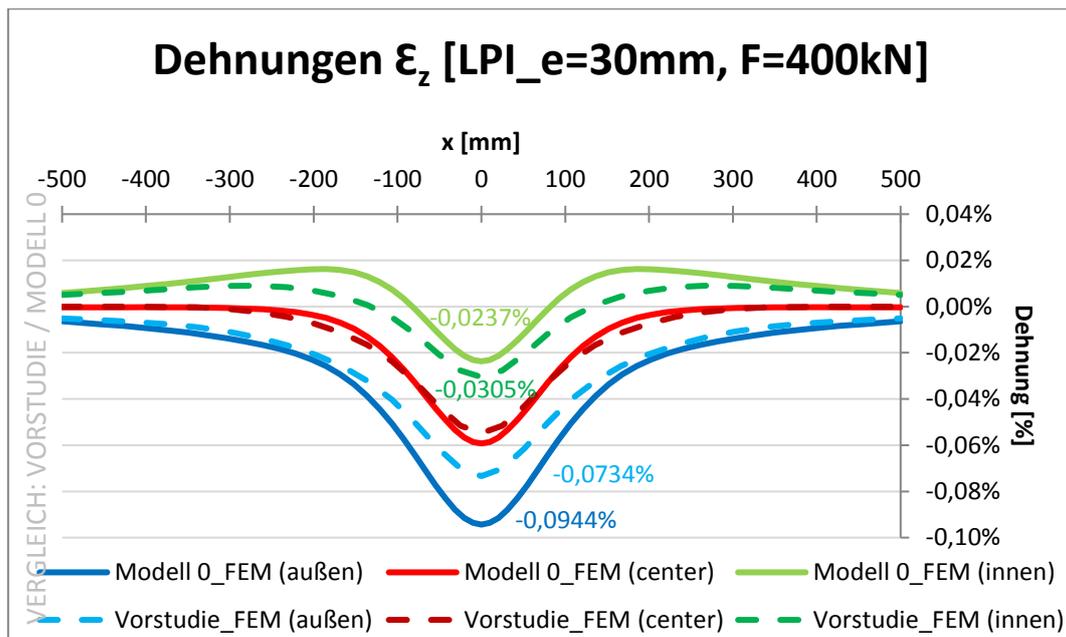


Abbildung 6.59: Dehnungsdiagramm im Vergleich für System LP I, Exzentrizität +30 mm

Somit lässt sich aus Abbildung 6.59 erkennen, dass das geringere Torsionsträgheitsmoment  $I_T$  (Einfluss auf die Spannung bzw. Dehnung, innen und außen, siehe Abschnitt 2.2) einen größeren Einfluss hat, als ein kleineres Flächenträgheitsmoment  $I_y$  (Einfluss auf die mittige Spannung bzw. Dehnung, siehe Abschnitt 2.1).

## 6.5 FE-Modell 1 im Detail

Im nachfolgenden Kapitel werden die Daten und Ergebnisse für das FE-Modell 1 aufbereitet. Es umfasst Spannungs- und Dehnungsdiagramme und die Ergebnisse werden jeweils mit der Norm verglichen. Für die Vergleiche mit der Norm werden die Berechnungen mit der abgenutzten Schiene mit 12,5 % herangezogen. Dazu werden die Ergebnisse aus Kapitel 2.6 herangezogen.

Nachstehende Abbildung zeigt nochmals die Schemaskizze über die Modellierungsschritte. Modell 1, welches in diesem Kapitel analysiert wird, ist hierbei grün umrandet.

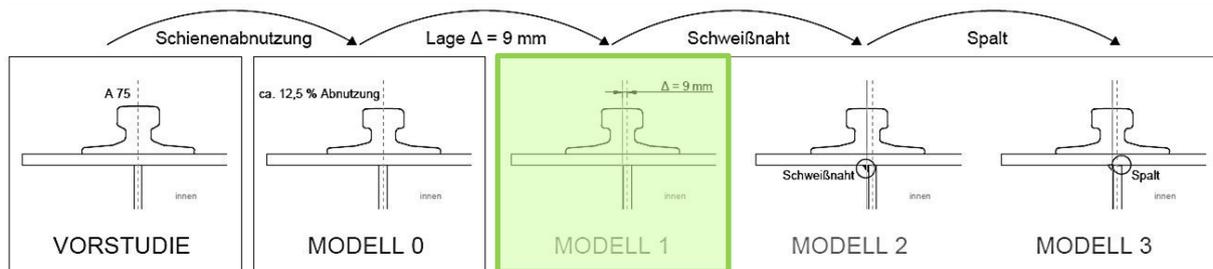


Abbildung 6.60: Schemaskizze der FEM-Studie

An dieser Stelle soll noch einmal erläutert werden, um welches Modell es sich hier handelt. Das Modell 1 ist aus dem Modell 0 entstanden, wie man an der schematischen Abbildung erkennen kann. Die Änderungen belaufen sich auf die Schienenlage.

Die Schienenlage war am Versuchsträger nicht genau zentrisch über dem Steg ausgerichtet. Dies wurde mit diesem Modellierungsschritt berücksichtigt. Die Lage der Schiene wurde angepasst, indem sie um neun Millimeter nach außen verschoben wurde. Somit sind die Stegmitte und die Schienenachse nicht mehr gleich. Wie auch bei den Laborversuchen wurde als Nullpunkt der Exzentrizitäten  $e=0 \text{ mm}$  der Stegmittelpunkt gewählt. Dies gilt auch für die Normergebnisse.



Abbildung 6.61: Tatsächliche Schienenlage über dem Steg [Quelle: Markus Kettler, Februar 2018]

### 6.5.1 Ergebnisvergleich für System LP I

#### 6.5.1.1 System LP I – zentrische Lasteinleitung (e=0)

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt. Der Dehnungswert aus der Norm wurde nach Variante D2 berechnet. Keine Exzentrizität (e=0 mm) bedeutet hierbei, dass die Radlast zentrisch über dem Steg liegt.

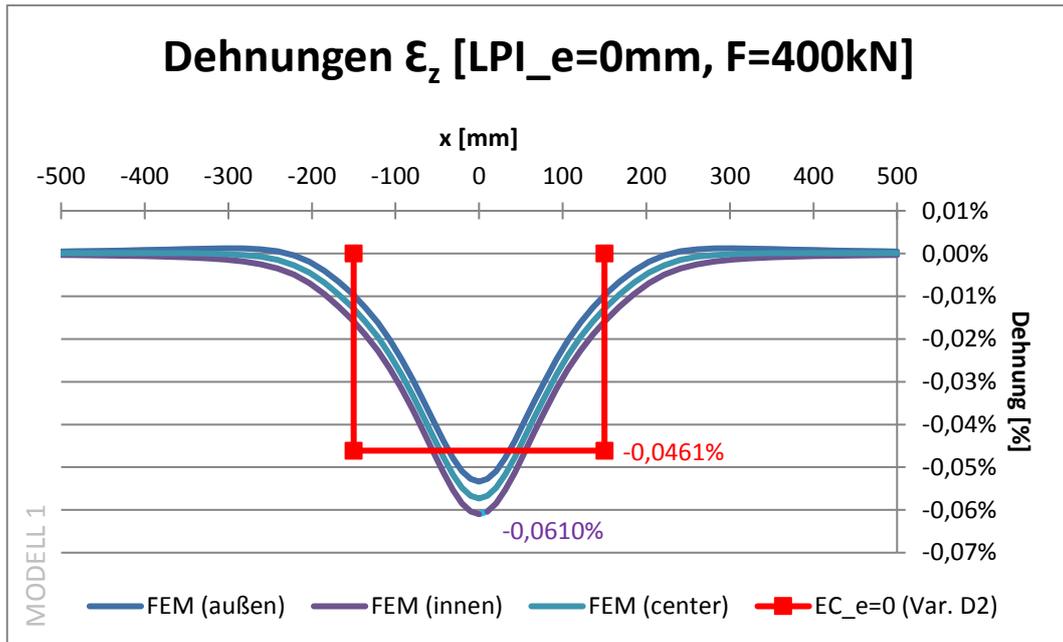


Abbildung 6.62: Dehnungsdiagramm System LP I, ohne Exzentrizität, Modell 1

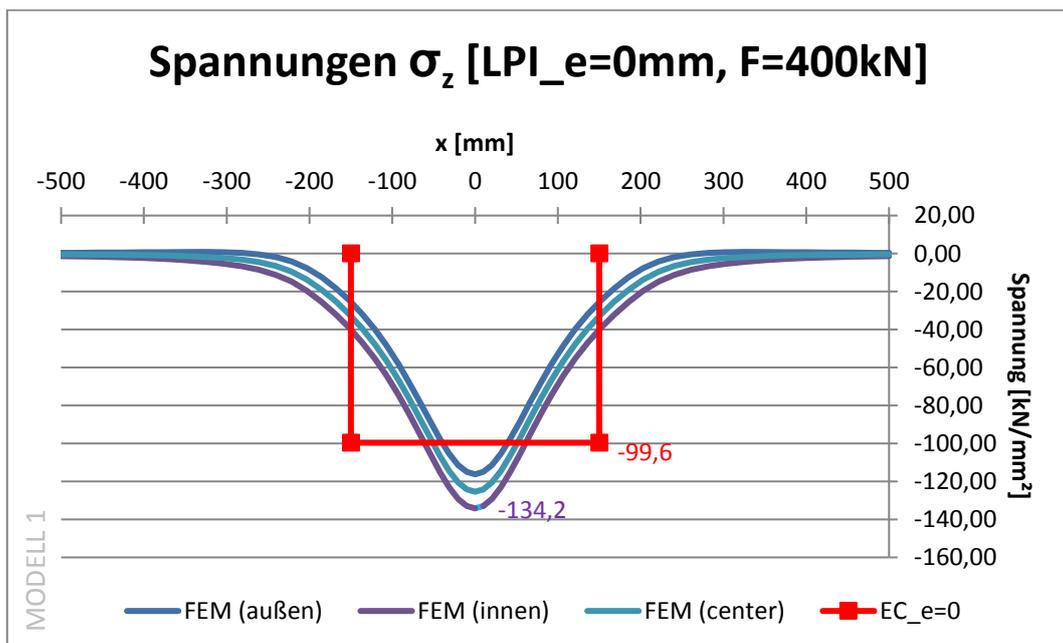


Abbildung 6.63: Spannungsdiagramm System LP I, ohne Exzentrizität, Modell 1

### 6.5.1.2 System LP I – Lasteinleitung $e=+10$ mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt. Eine Exzentrizität von  $e=+10$  mm bedeutet hier, dass die Last ungefähr über der Schienenmitte eingeleitet wurde.

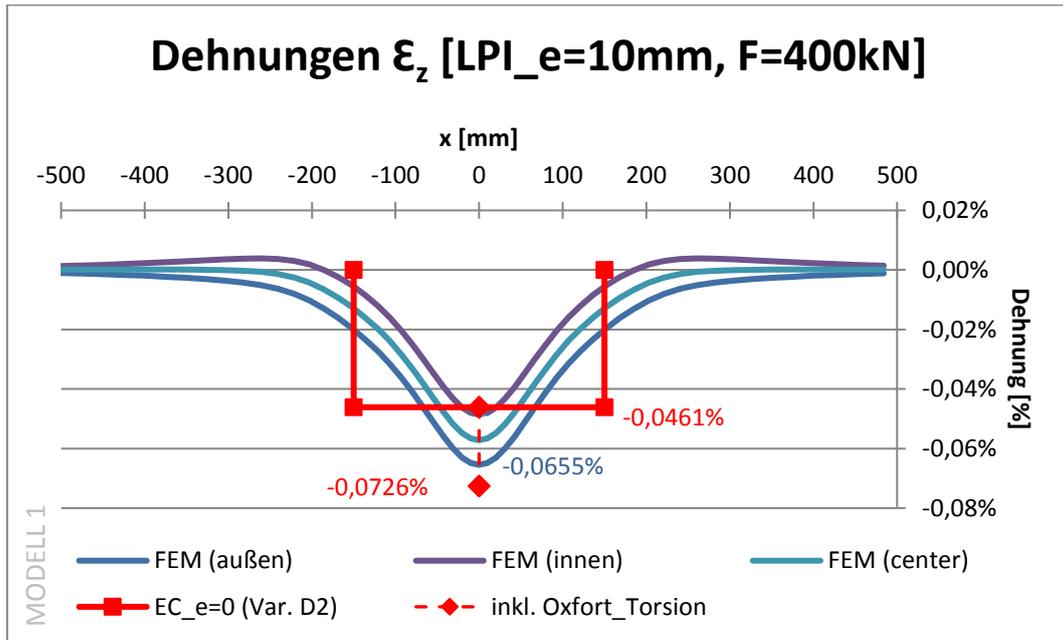


Abbildung 6.64: Dehnungsdiagramm System LP I, Exzentrizität +10 mm, Modell 1

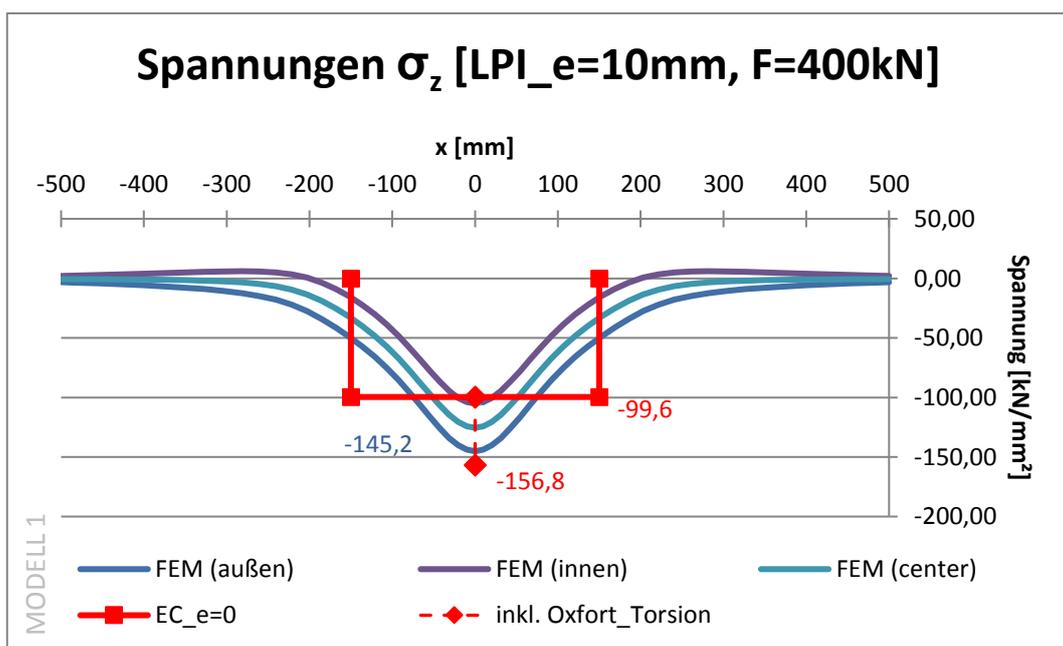


Abbildung 6.65: Spannungsdiagramm System LP I, Exzentrizität +10 mm, Modell 1

6.5.1.3 System LP I – Lasteinleitung  $e=+20$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt.

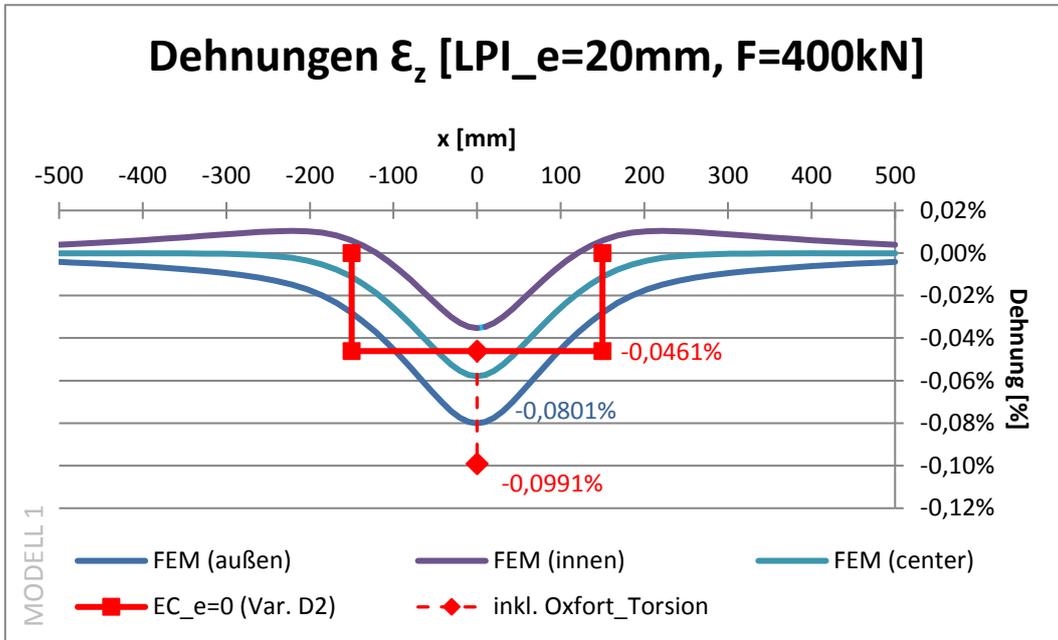


Abbildung 6.66: Dehnungsdiagramm System LP I, Exzentrizität +20 mm, Modell 1

Die Norm unterschätzt hier den zentrischen Anteil und auch der Oxfort-Wert überschätzt die Torsion deutlich. Daher ist auch die Summe zu groß.

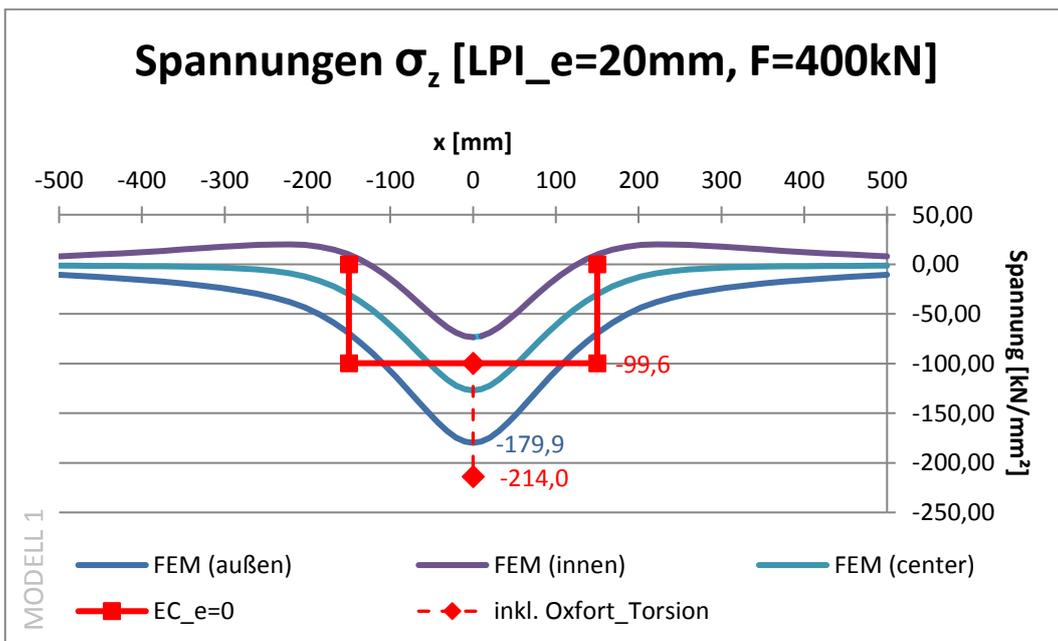


Abbildung 6.67: Spannungsdiagramm System LP I, Exzentrizität +20 mm, Modell 1

6.5.1.4 System LP I – Lasteinleitung  $e=+30$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt.

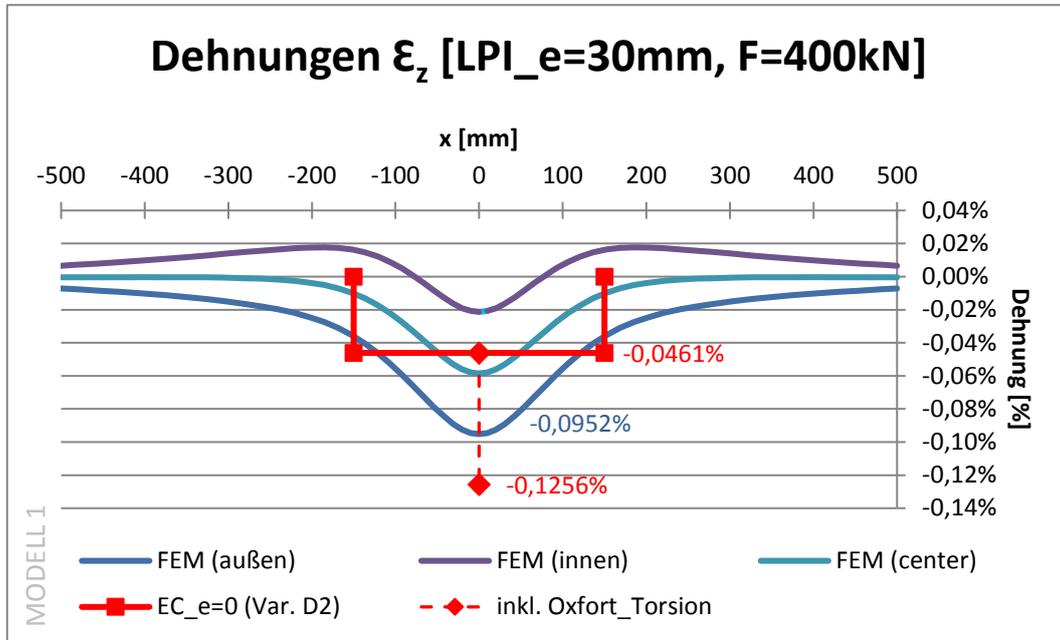


Abbildung 6.68: Dehnungsdiagramm System LP I, Exzentrizität +30 mm, Modell 1

Bei diesen Diagrammen (Abbildung 6.68 und 6.69) ist die Überschätzung der Dehnungen durch Oxfort sehr deutlich zu sehen.

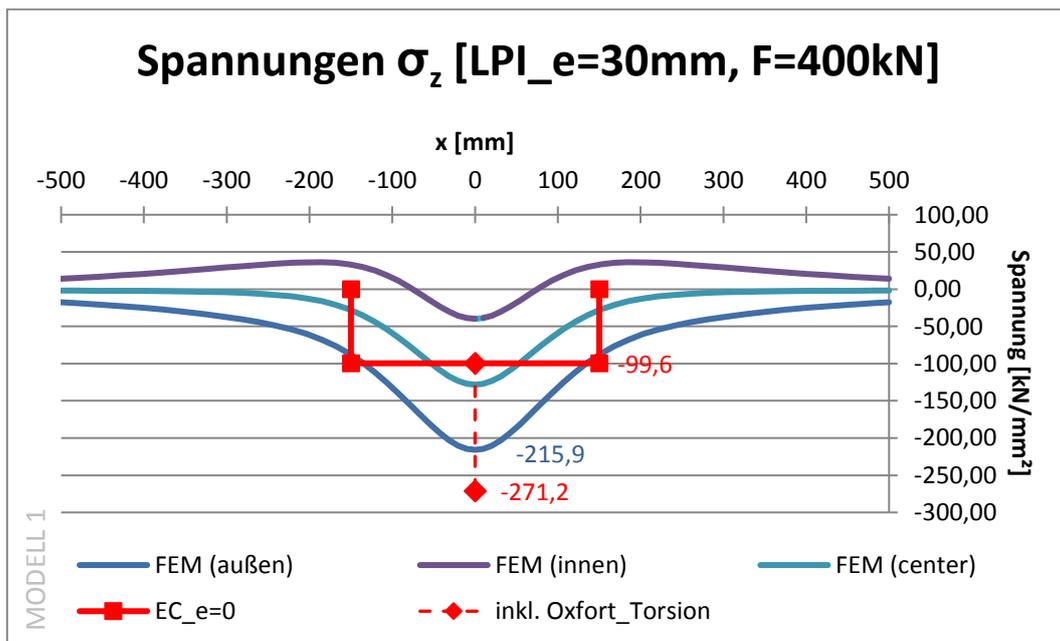


Abbildung 6.69: Spannungsdiagramm System LP I, Exzentrizität +30 mm, Modell 1

6.5.1.5 System LP I – Lasteinleitung  $e=-10$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt.

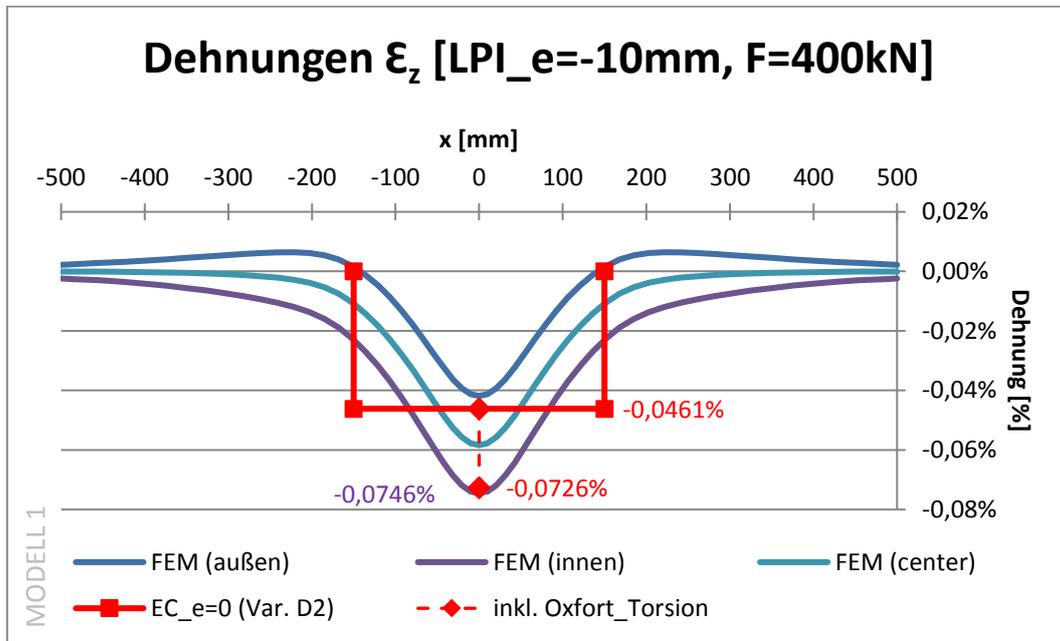


Abbildung 6.70: Dehnungsdiagramm System LP I, Exzentrizität -10 mm, Modell 1

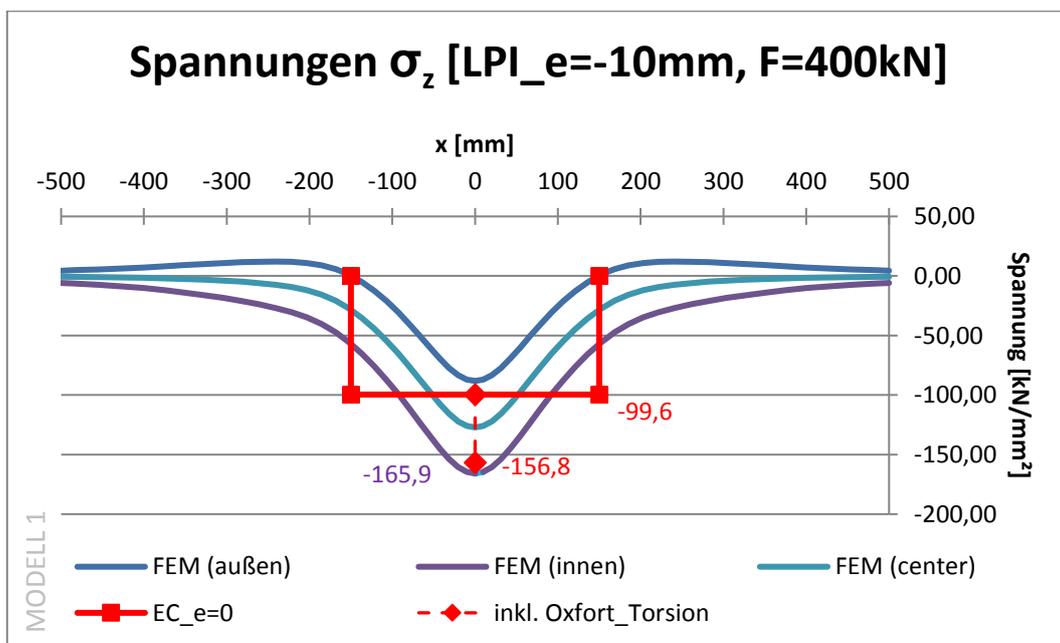


Abbildung 6.71: Spannungsdiagramm System LP I, Exzentrizität -10 mm, Modell 1

## 6.5.2 Ergebnisvergleich für System LP III

### 6.5.2.1 System LP III – zentrische Lasteinleitung (e=0)

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt.

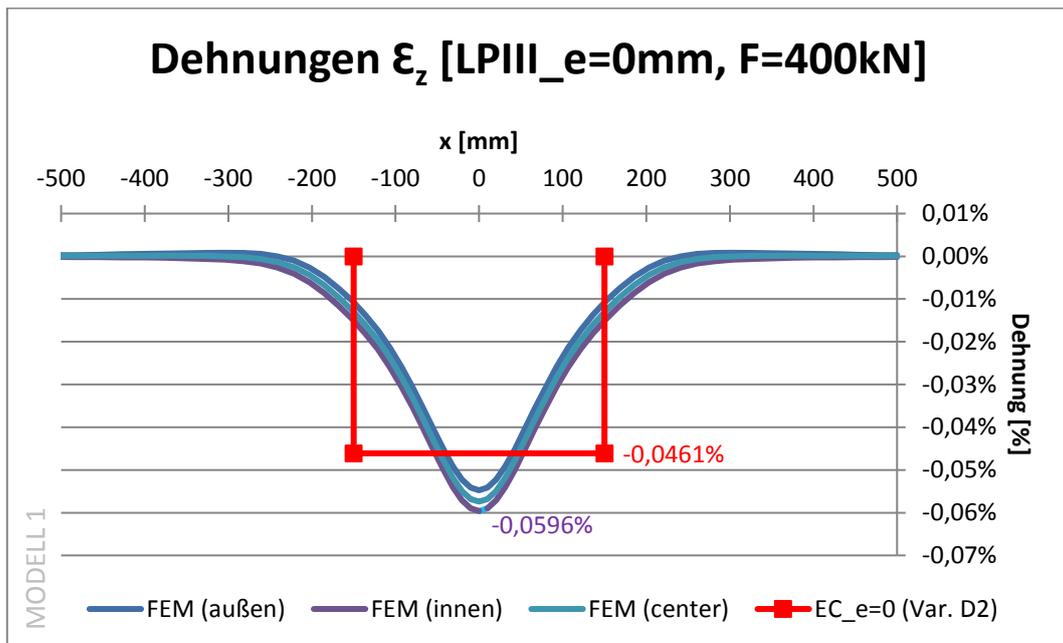


Abbildung 6.72: Dehnungsdiagramm System LP III, ohne Exzentrizität, Modell 1

Auch hier unterschätzt die Norm die zentrischen Spannungen.

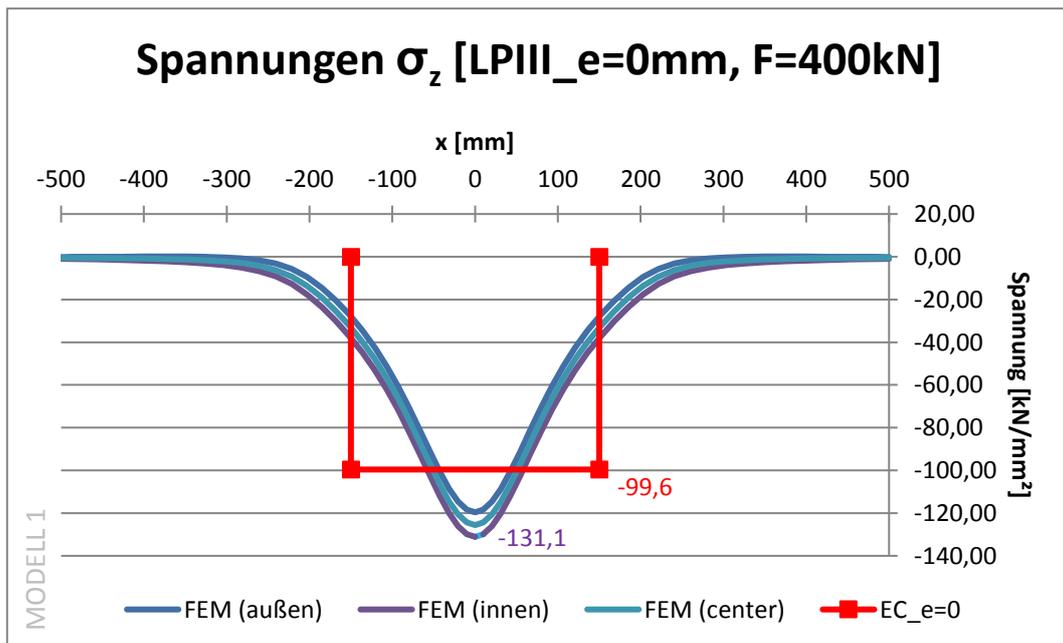


Abbildung 6.73: Spannungsdiagramm System LP III, ohne Exzentrizität, Modell 1

6.5.2.2 System LP III – Lasteinleitung  $e=+10$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt.

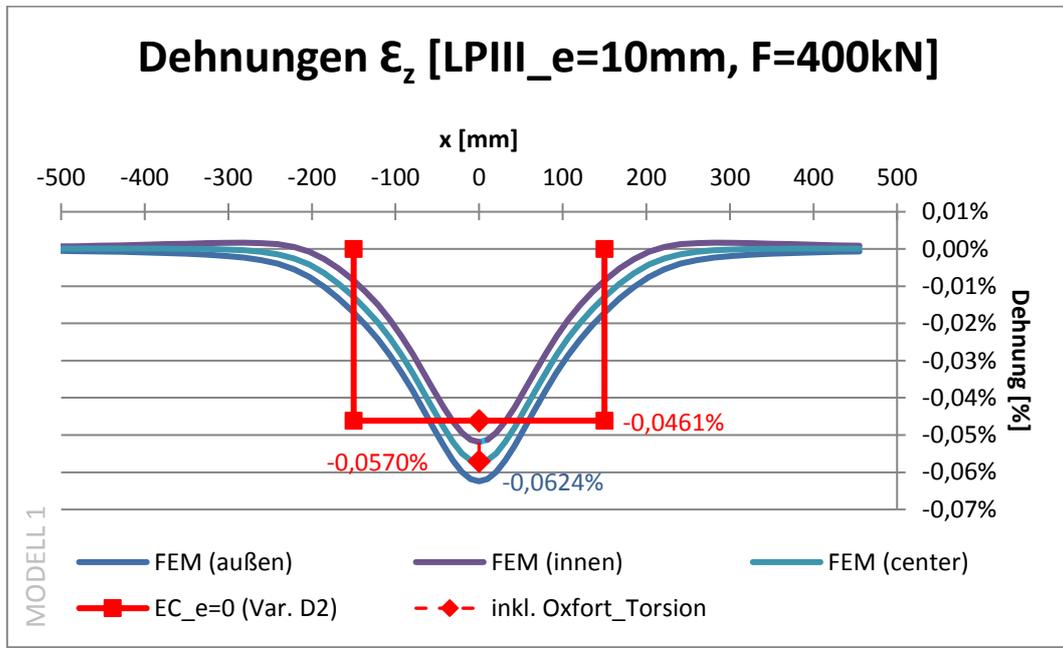


Abbildung 6.74: Dehnungsdiagramm System LP III, Exzentrizität +10 mm, Modell 1

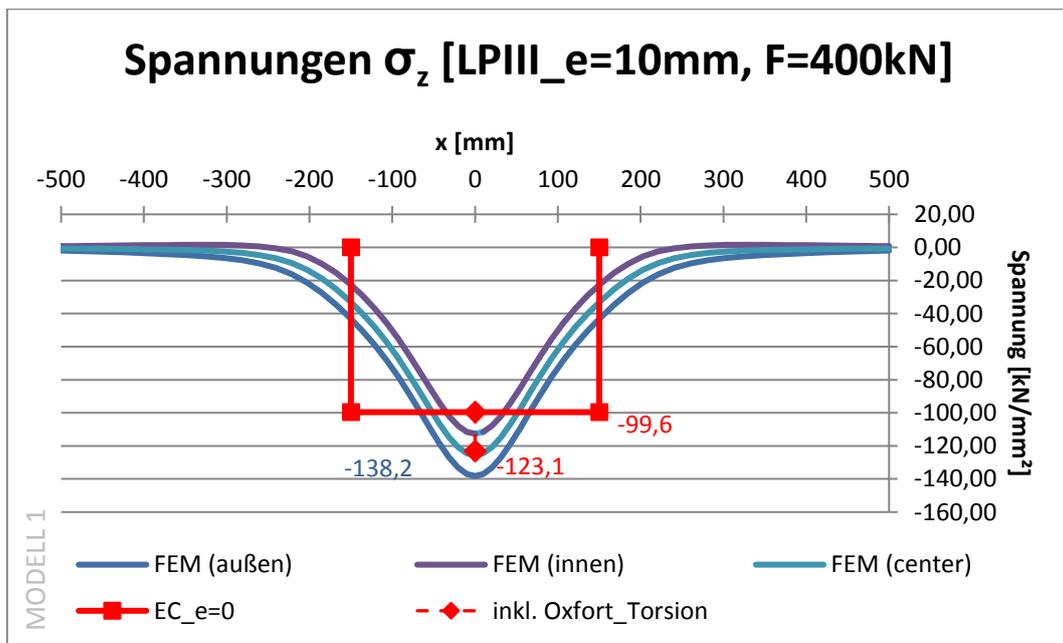


Abbildung 6.75: Spannungsdiagramm System LP III, Exzentrizität +10 mm, Modell 1

6.5.2.3 System LP III – Lasteinleitung  $e=+20$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt.

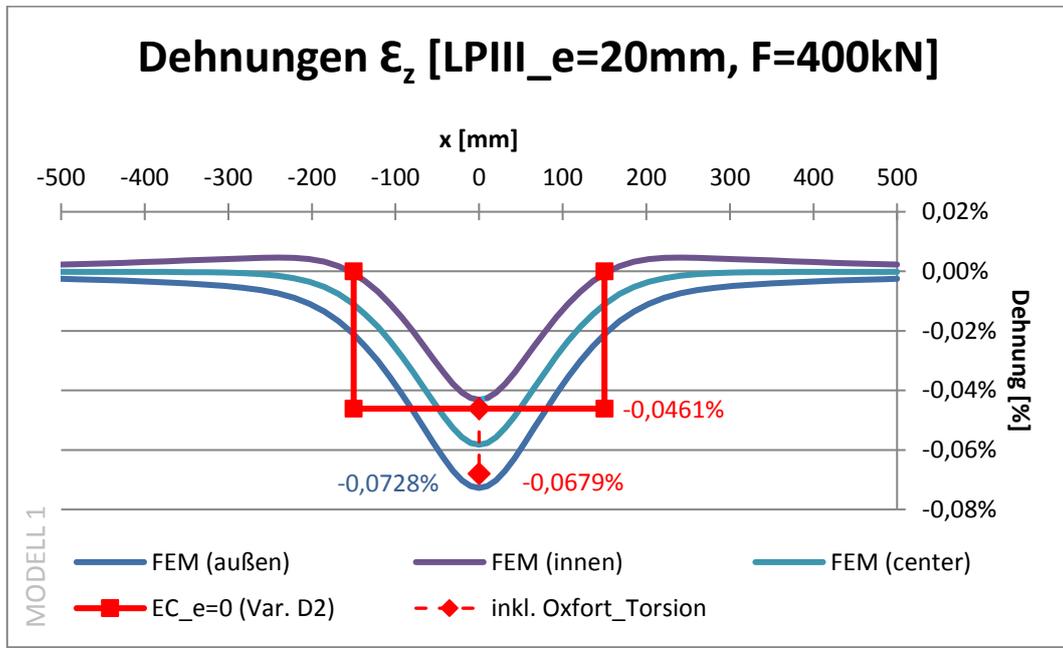


Abbildung 6.76: Dehnungsdiagramm System LP III, Exzentrizität +20 mm, Modell 1

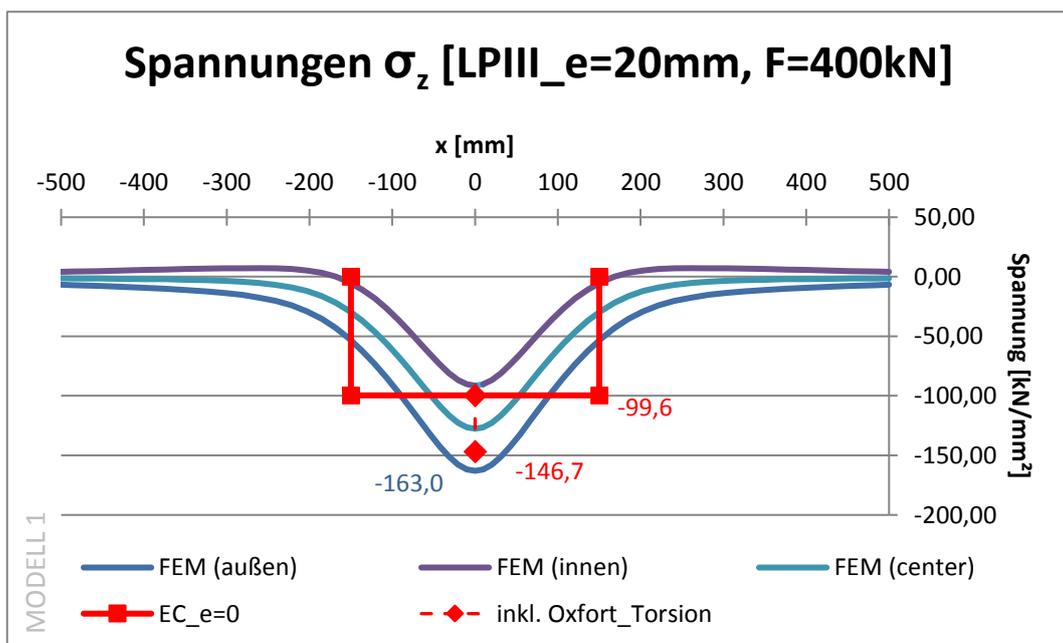


Abbildung 6.77: Spannungsdiagramm System LP III, Exzentrizität +20 mm, Modell 1

6.5.2.4 System LP III – Lasteinleitung  $e=+30$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt.

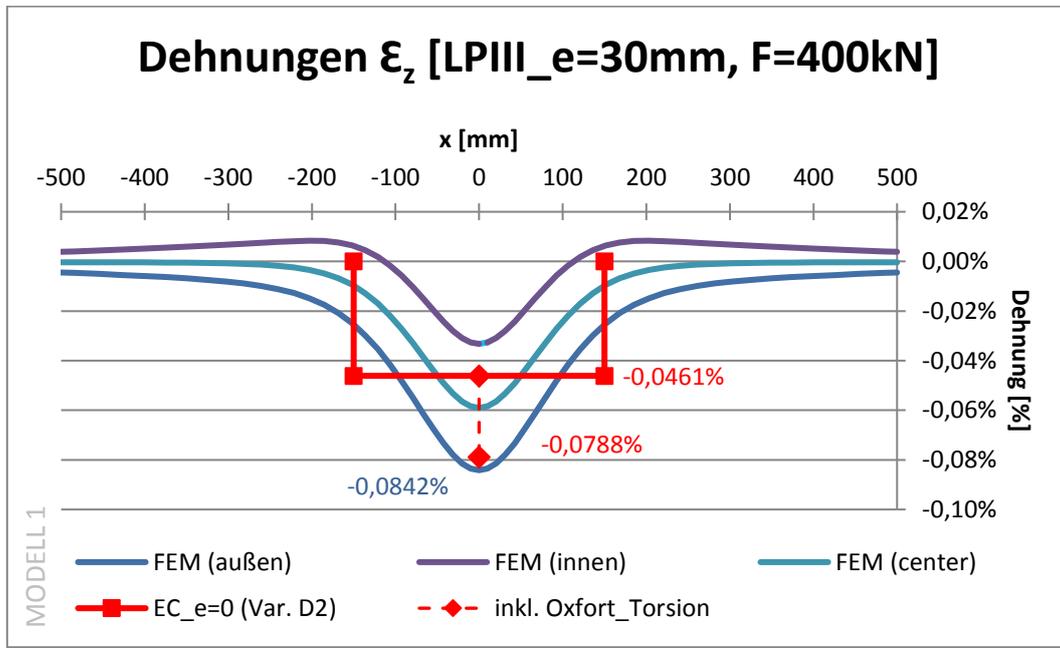


Abbildung 6.78: Dehnungsdiagramm System LP III, Exzentrizität +30 mm, Modell 1

Im folgenden Diagramm (Abbildung 6.79) wird der zentrische Anteil unterschätzt, dafür ist der Torsionsanteil größer, wodurch das Norm-Ergebnis in Summe wieder nahe am FEM-Ergebnis liegt.

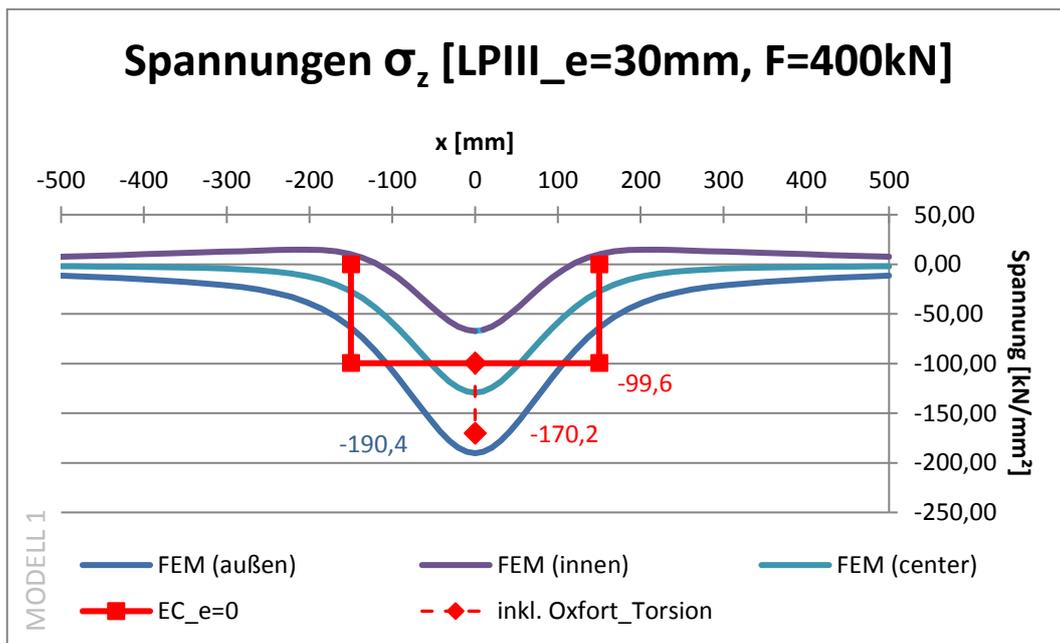


Abbildung 6.79: Spannungsdiagramm System LP III, Exzentrizität +30 mm, Modell 1

6.5.2.5 System LP III – Lasteinleitung  $e=-10$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt.

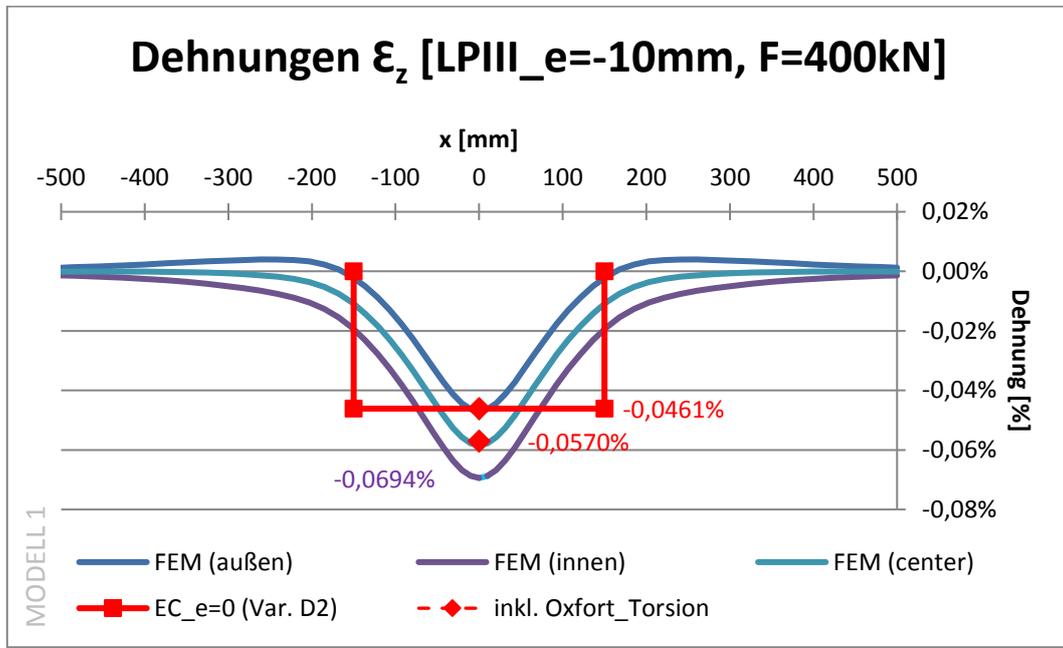


Abbildung 6.80: Dehnungsdiagramm System LP III, Exzentrizität -10 mm, Modell 1

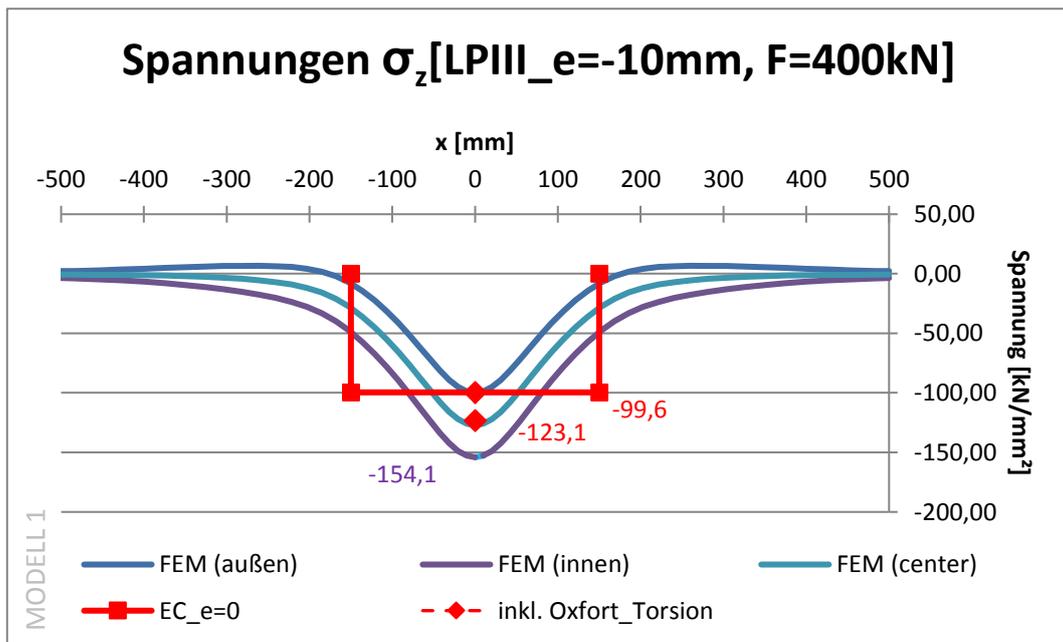


Abbildung 6.81: Spannungsdiagramm System LP III, Exzentrizität -10 mm, Modell 1

## 6.6 FE-Modell 2 im Detail

Im nachfolgenden Kapitel werden die Daten und die Ergebnisse für das Modell 2 aufbereitet. Es umfasst Spannungs- und Dehnungsdiagramme und die Ergebnisse werden jeweils mit der Norm verglichen. Für die Vergleiche mit der Norm werden die Berechnungen mit der abgenutzten Schiene mit 12,5 % herangezogen. Dazu werden die Ergebnisse aus Kapitel 2.6 herangezogen.

Nachfolgende Abbildung zeigt nochmals die verschiedenen Modellierungsschritte. In grün umrandet befindet sich das Modell 2, welches in diesem Kapitel näher betrachtet wird.

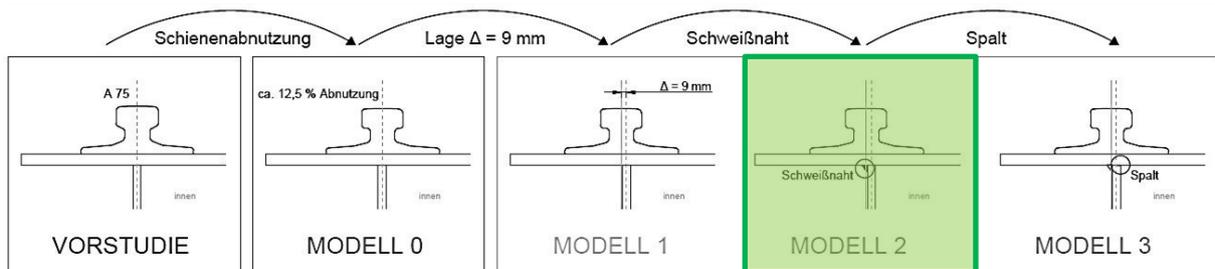


Abbildung 6.82: Schemaskizze der FEM-Studie

An dieser Stelle soll noch einmal erläutert werden, welche Änderungen das betrachtete Modell beinhaltet. Das Modell 2 ist aus dem Modell 1 entstanden, wie man an der schematischen Abbildung erkennen kann. Die Änderungen die vorgenommen wurden, belaufen sich auf die zusätzliche außenliegende Schweißnaht.

Am Versuchsträger gab es eine Schweißnaht, die außenseitig am Träger liegt. Diese wurde nun im Modell 2 implementiert. Die Schweißnaht wurde als Dreieck mit den gemessenen Abmessungen von sieben Millimeter horizontal und 13 Millimeter vertikal im FEM-Modell realisiert (siehe Abbildung 6.83).

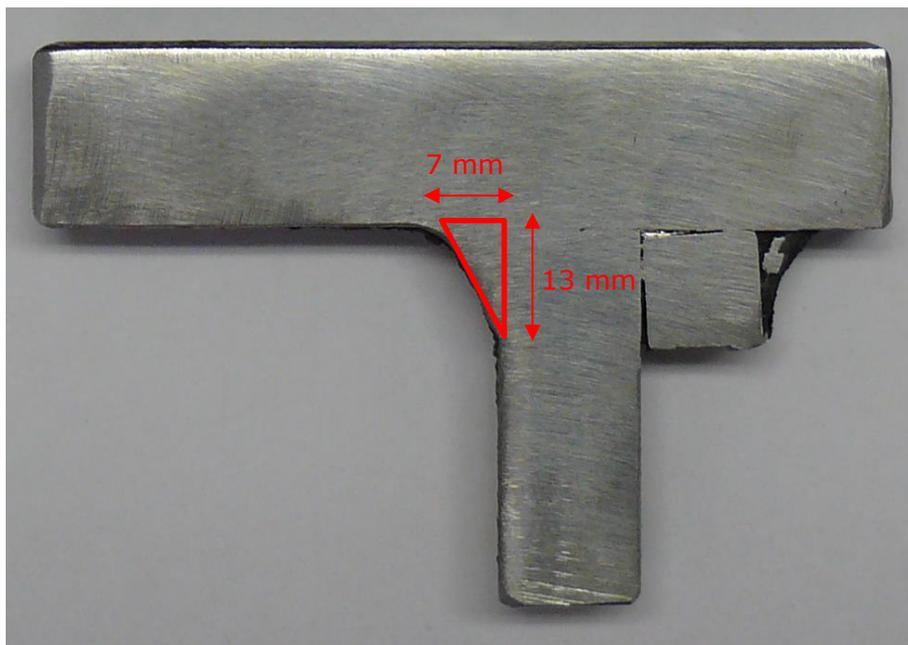


Abbildung 6.83: Stegdetail mit Schweißnaht [Quelle: Markus Kettler, Februar 2018]

### 6.6.1 Ergebnisvergleich für System LP I

#### 6.6.1.1 System LP I – zentrische Lasteinleitung (e=0)

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt. Der Dehnungswert der Norm wurde auch hier nach der Variante D2 berechnet.

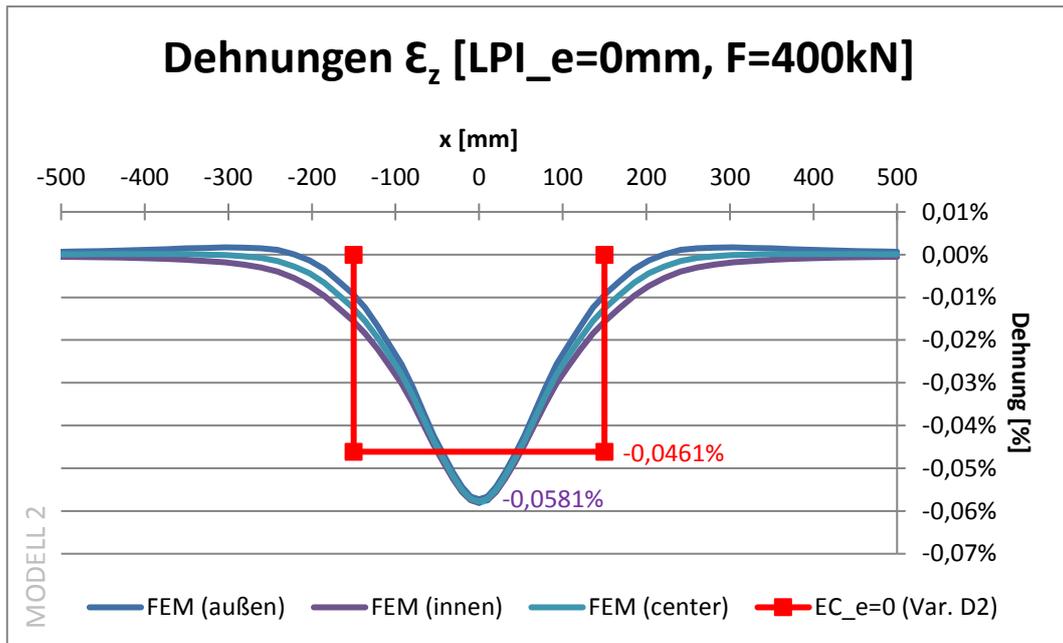


Abbildung 6.84: Dehnungsdiagramm LP I, ohne Exzentrizität, Modell 2

Wie bereits bei Modell 1 unterschätzt auch hier die Norm die zentrische Lage.

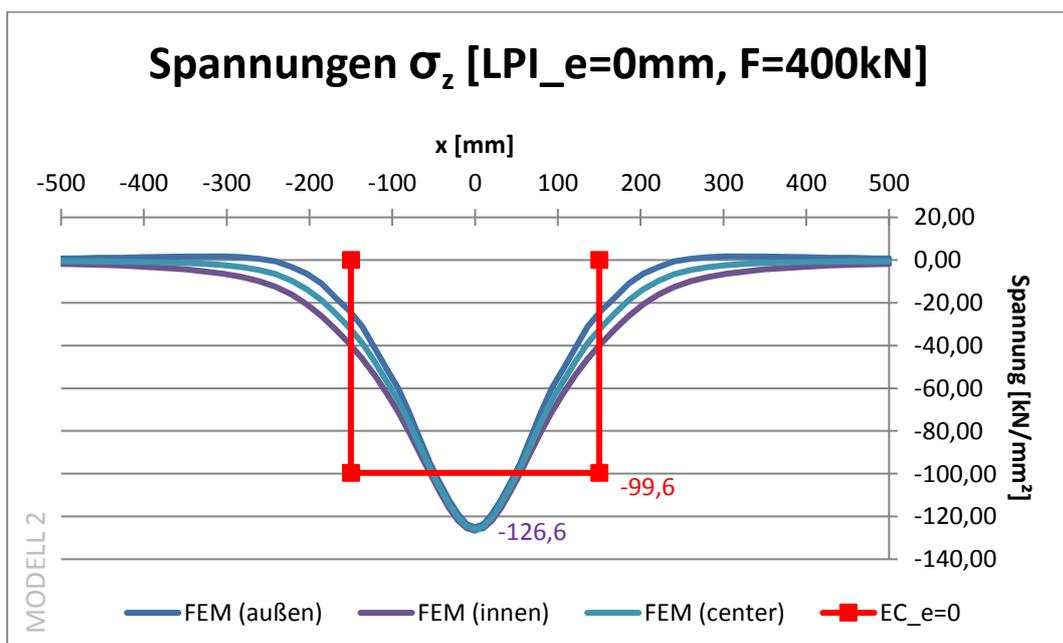


Abbildung 6.85: Spannungsdiagramm LP I ohne Exzentrizität, Modell 2

6.6.1.2 System LP I – Lasteinleitung  $e=+10$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt.

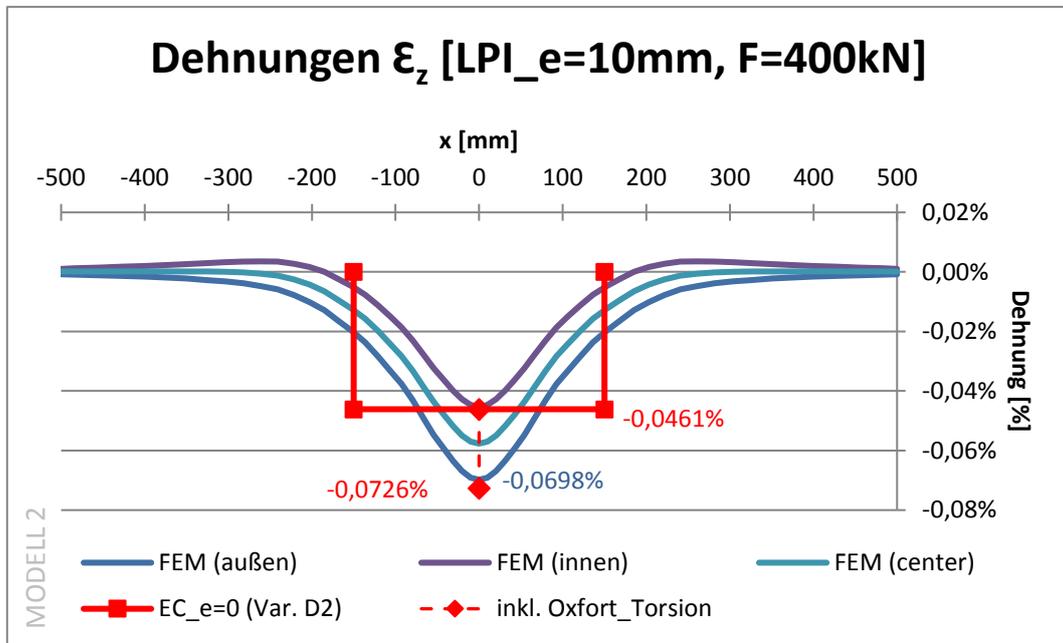


Abbildung 6.86: Dehnungsdiagramm LP I, Exzentrizität +10 mm, Modell 2

Für kleinere Exzentrizitäten stimmen die Norm und die FEM-Berechnung gut überein.

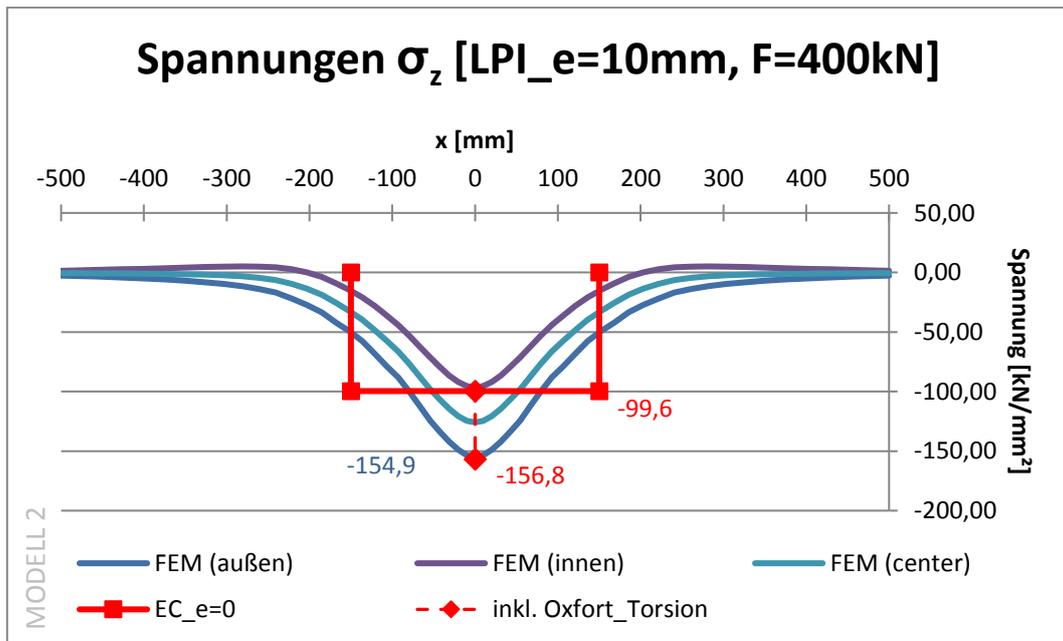


Abbildung 6.87: Spannungsdiagramm LP I, Exzentrizität +10 mm, Modell 2

6.6.1.3 System LP I – Lasteinleitung  $e=+20$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt.

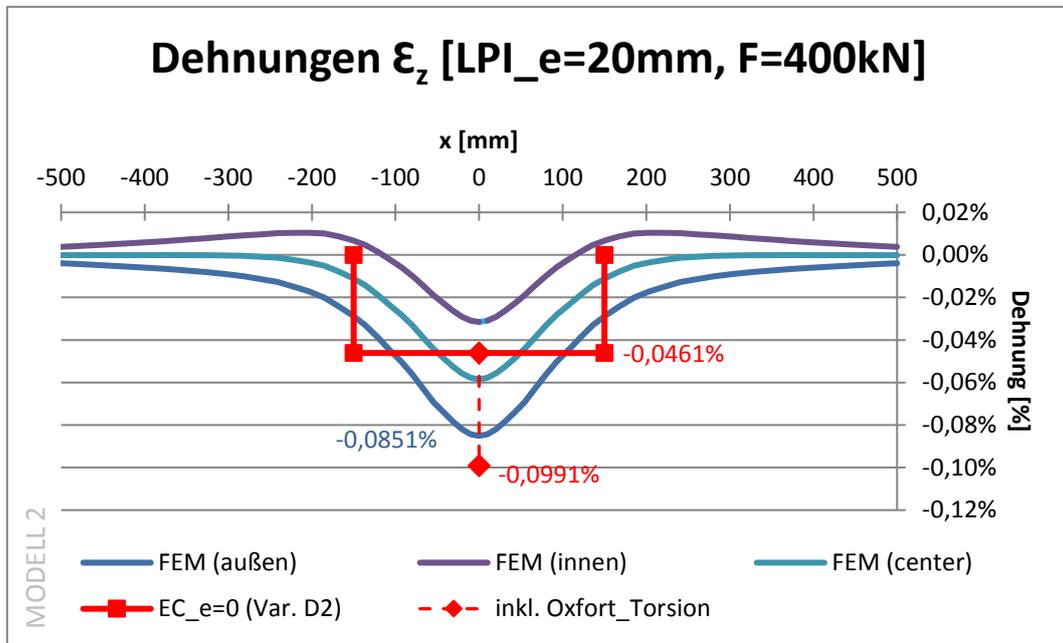


Abbildung 6.88: Dehnungsdiagramm LP I, Exzentrizität +20 mm, Modell 2

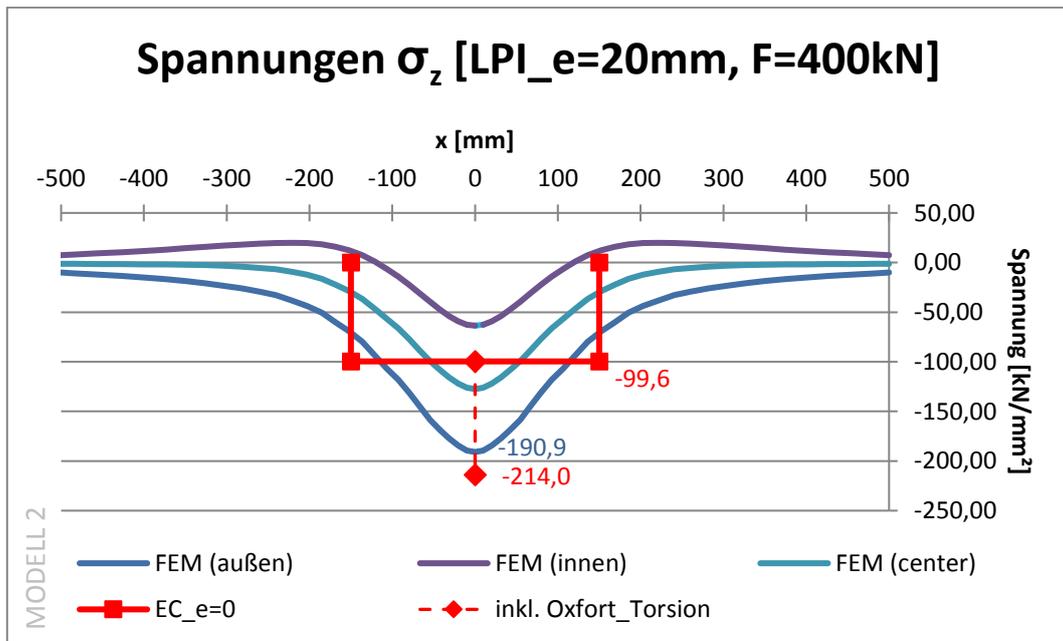


Abbildung 6.89: Spannungsdiagramm LP I, Exzentrizität +20 mm, Modell 2

6.6.1.4 System LP I – Lasteinleitung  $e=+30$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt.

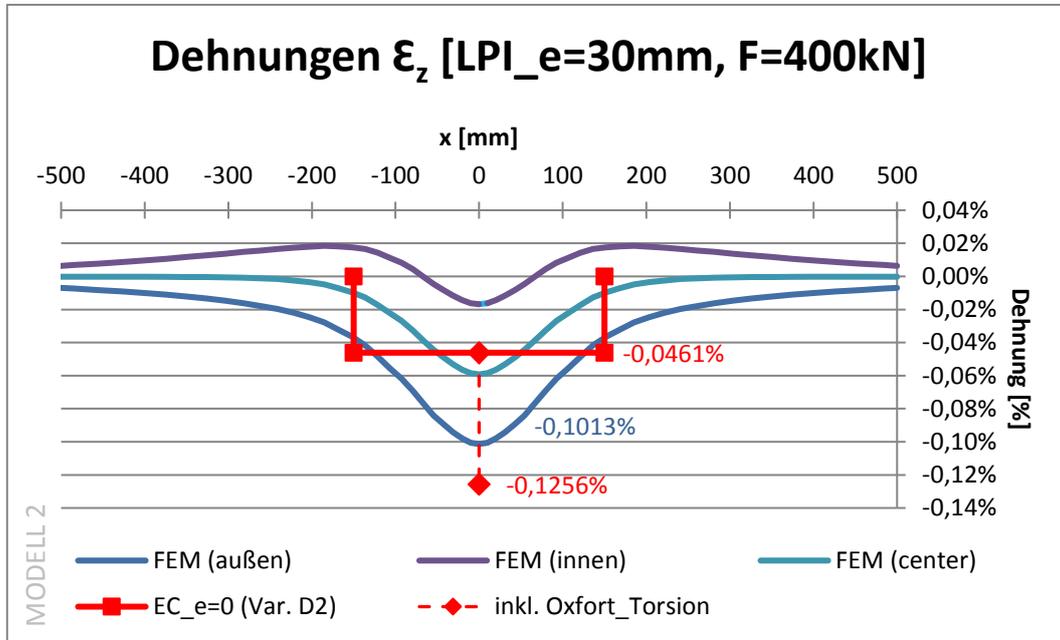


Abbildung 6.90: Dehnungsdiagramm LP I, Exzentrizität +30 mm, Modell 2

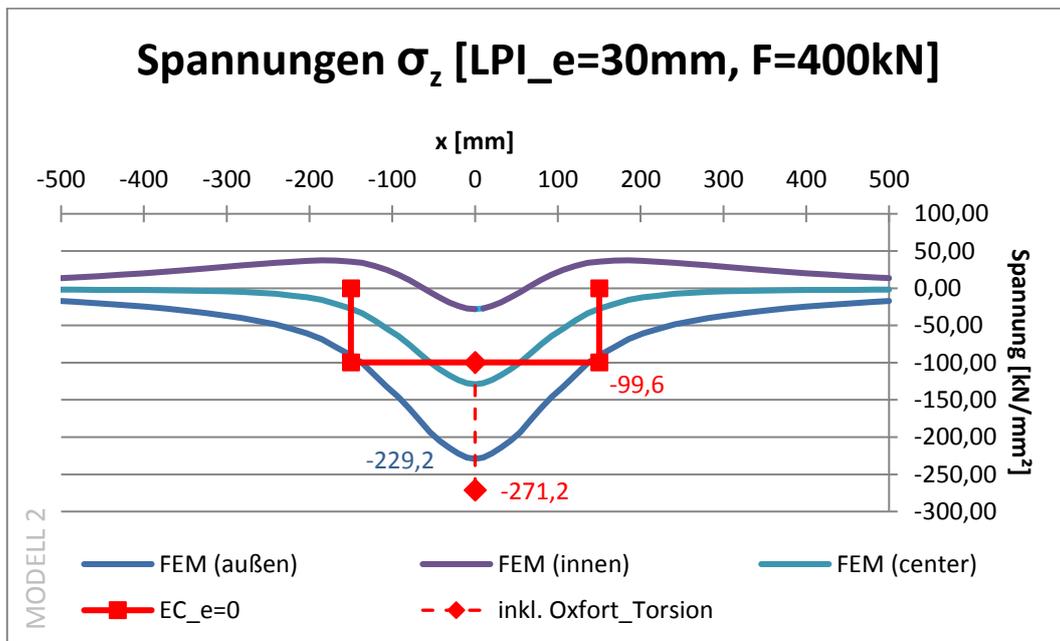


Abbildung 6.91: Spannungsdiagramm LP I, Exzentrizität +30 mm, Modell 2

6.6.1.5 System LP I – Lasteinleitung  $e=-10$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt.

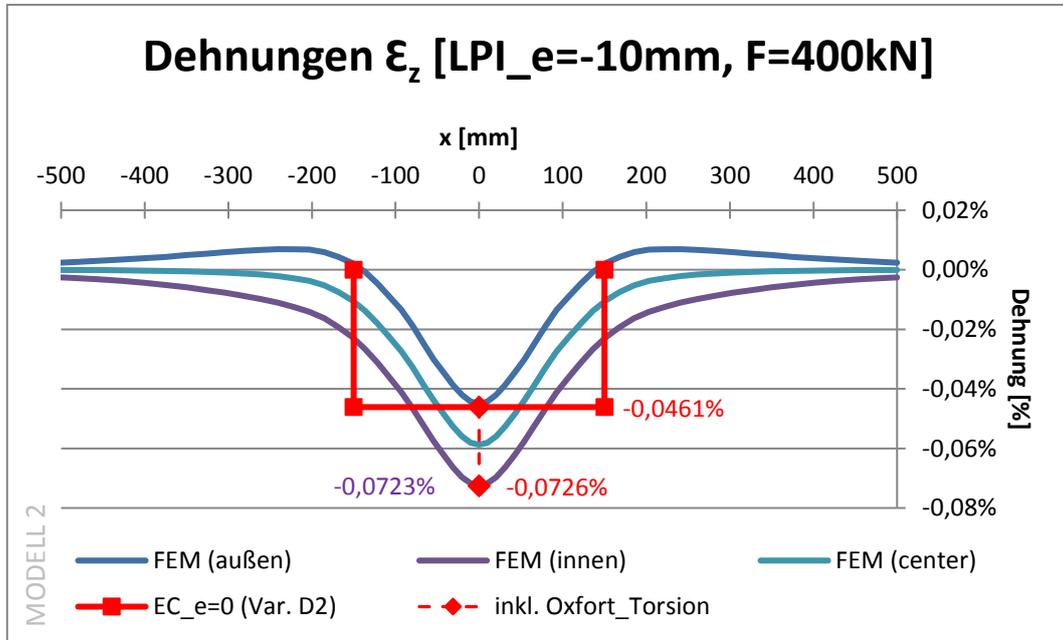


Abbildung 6.92: Dehnungsdiagramm LP I, Exzentrizität -10 mm, Modell 2

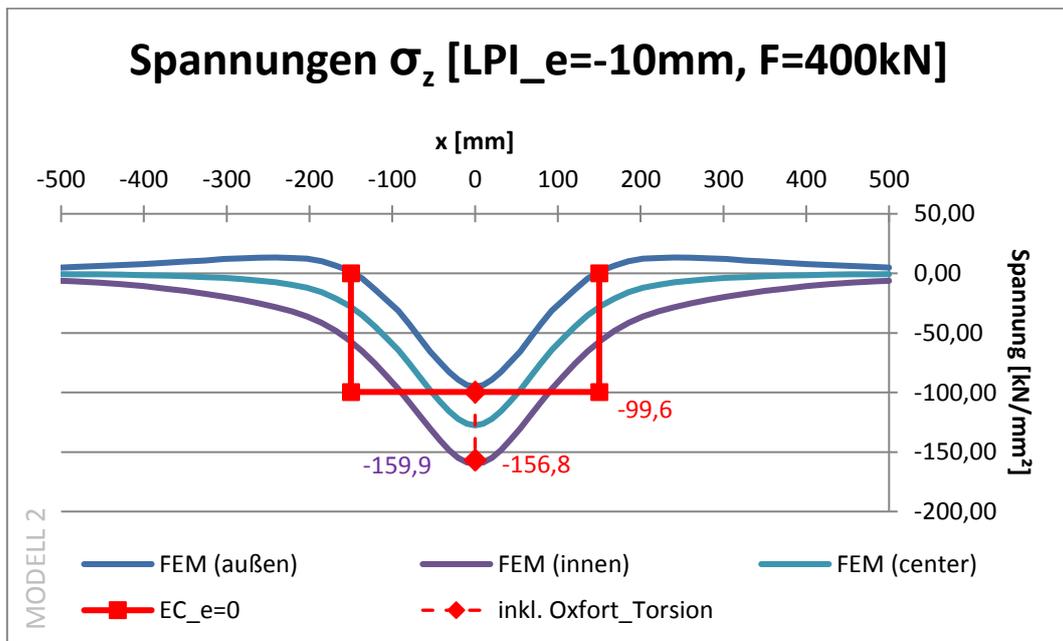


Abbildung 6.93: Spannungsdiagramm LP I, Exzentrizität -10 mm, Modell 2

## 6.6.2 Ergebnisvergleich für System LP III

### 6.6.2.1 System LP III – zentrische Lasteinleitung (e=0)

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt.

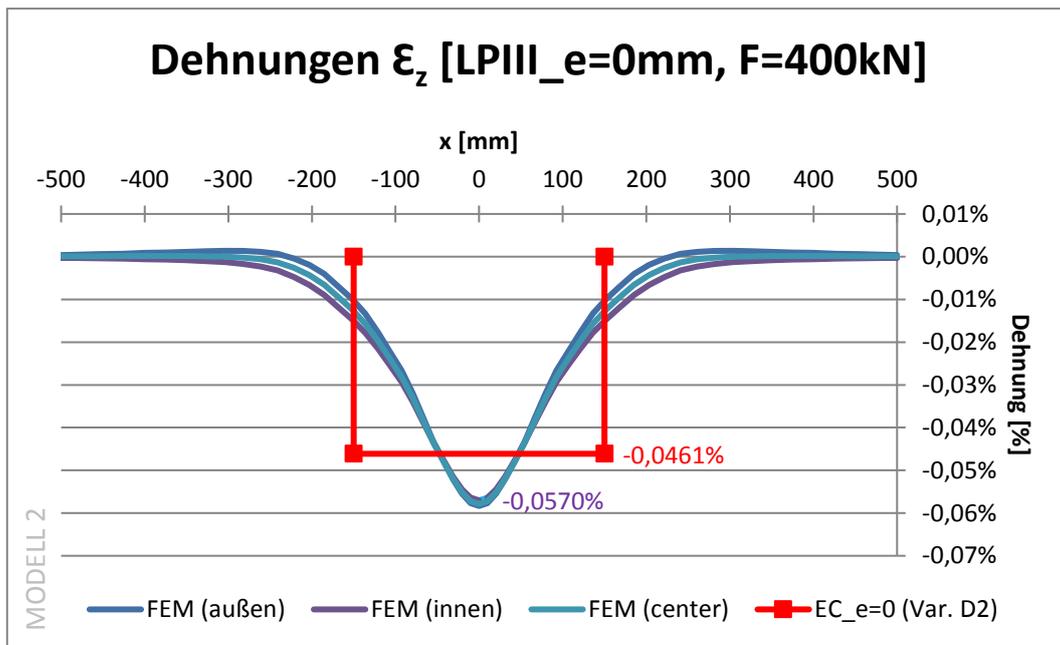


Abbildung 6.94: Dehnungsdiagramm LP III, ohne Exzentrizität, Modell 2

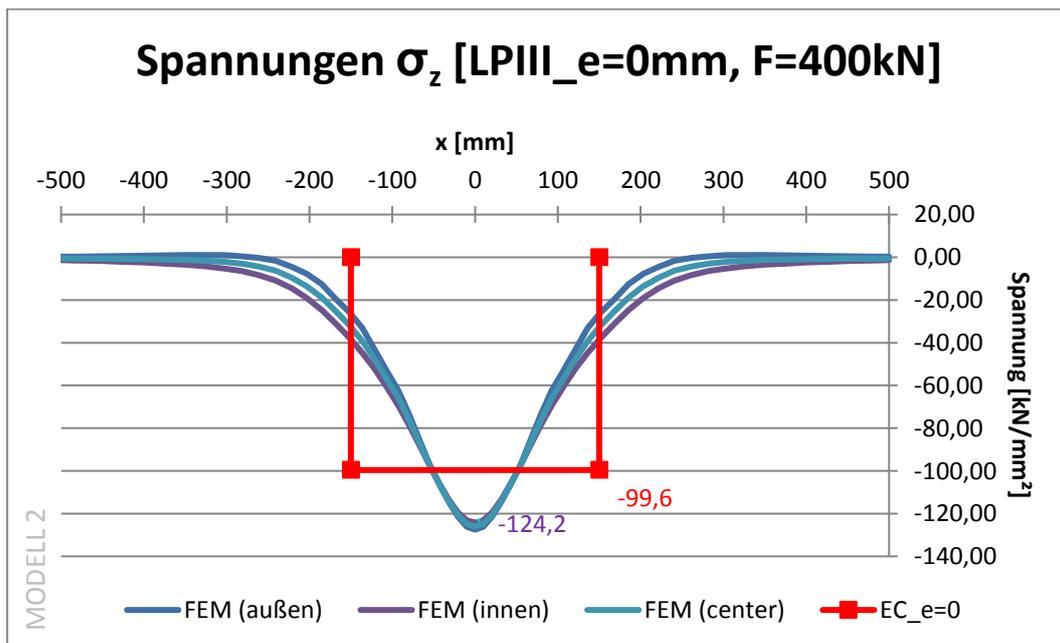


Abbildung 6.95: Spannungsdiagramm LP III, ohne Exzentrizität, Modell 2

6.6.2.2 System LP III – Lasteinleitung  $e=+10$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt.

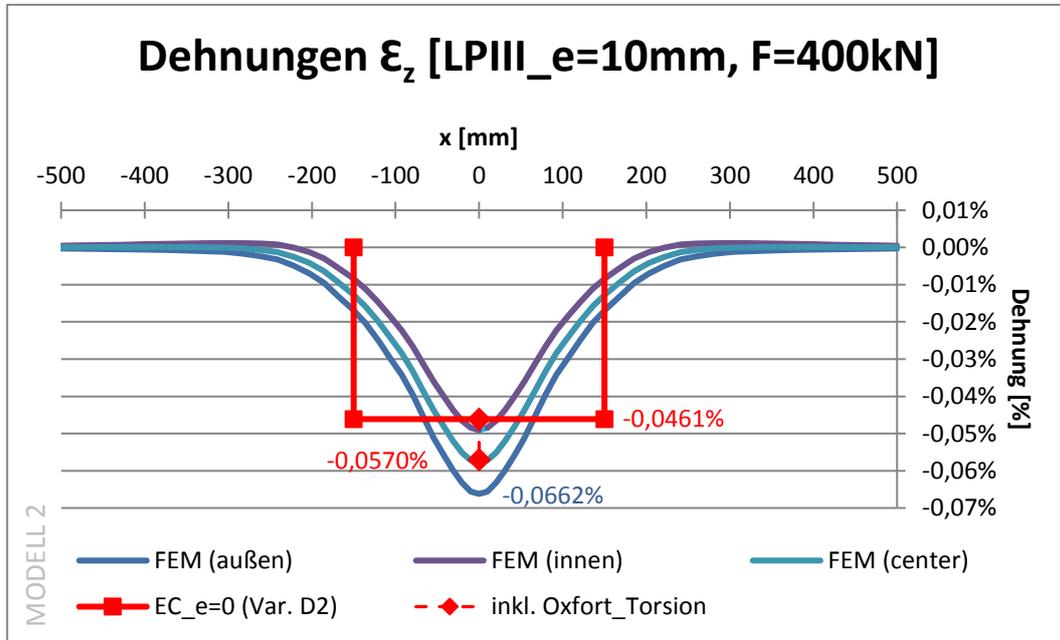


Abbildung 6.96: Dehnungsdiagramm LP III, Exzentrizität +10 mm, Modell 2

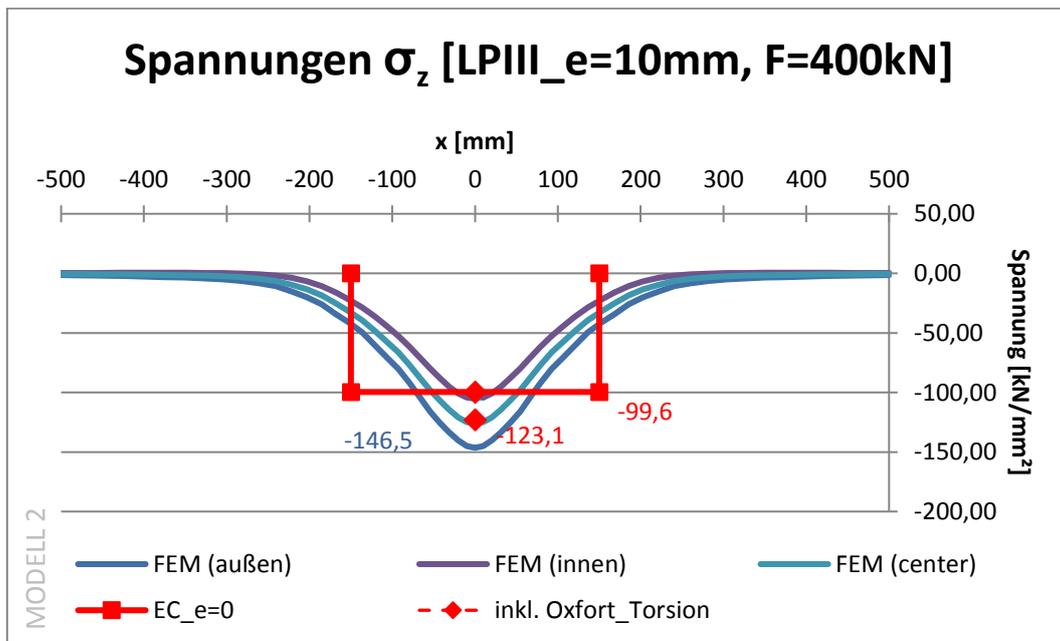


Abbildung 6.97: Spannungsdiagramm LP III, Exzentrizität +10 mm, Modell 2

6.6.2.3 System LP III – Lasteinleitung  $e=+20$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt.

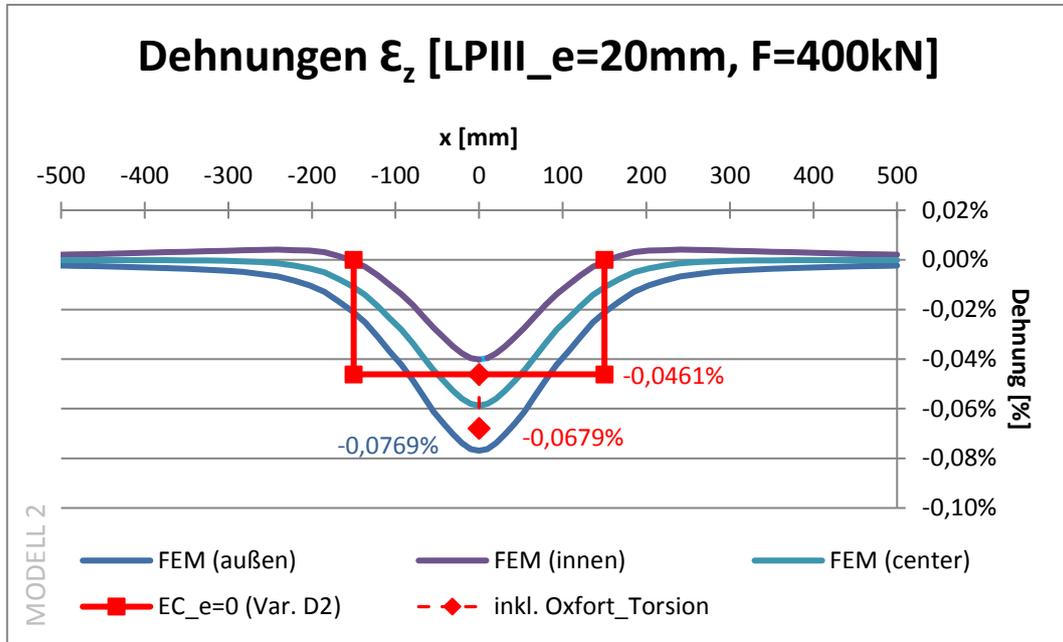


Abbildung 6.98: Dehnungsdiagramm LP III, Exzentrizität +20 mm, Modell 2

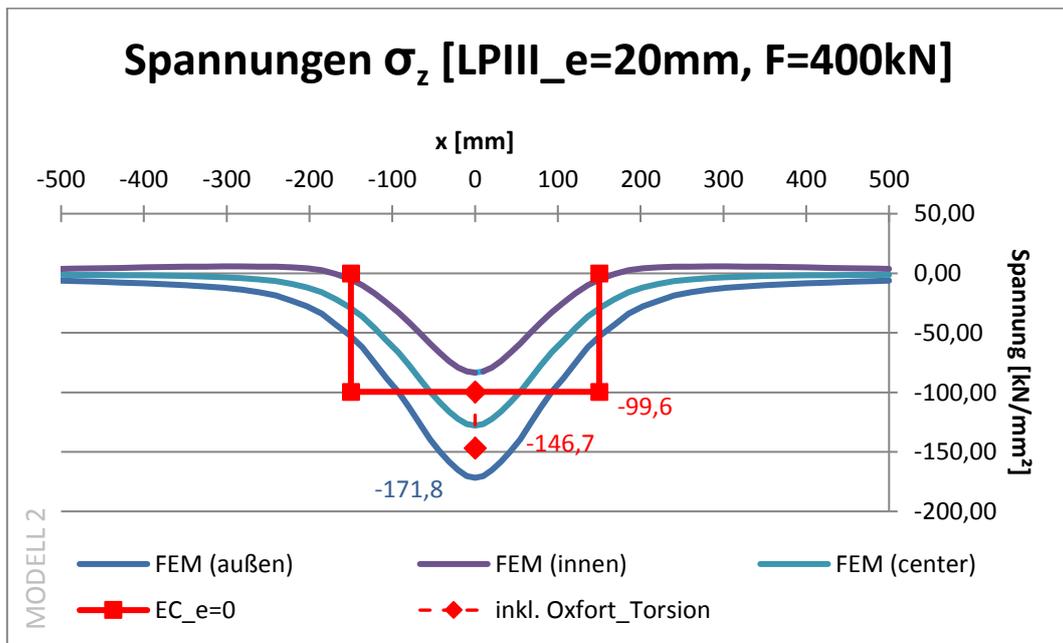


Abbildung 6.99: Spannungsdiagramm LP III, Exzentrizität +20 mm, Modell 2

6.6.2.4 System LP III – Lasteinleitung  $e=+30$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt.

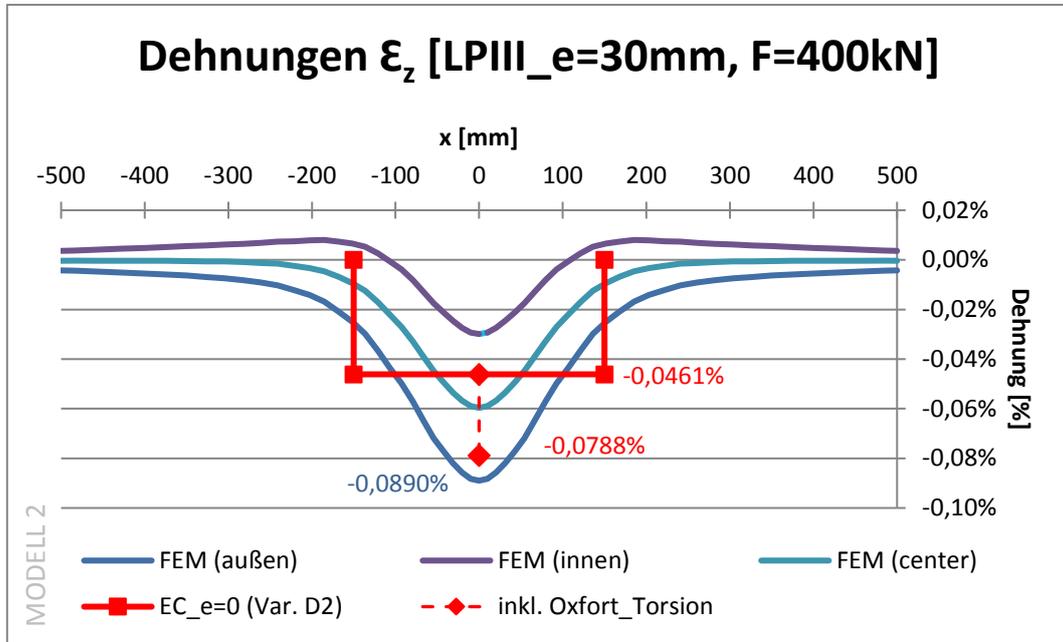


Abbildung 6.100: Dehnungsdiagramm LP III, Exzentrizität +30 mm, Modell 2

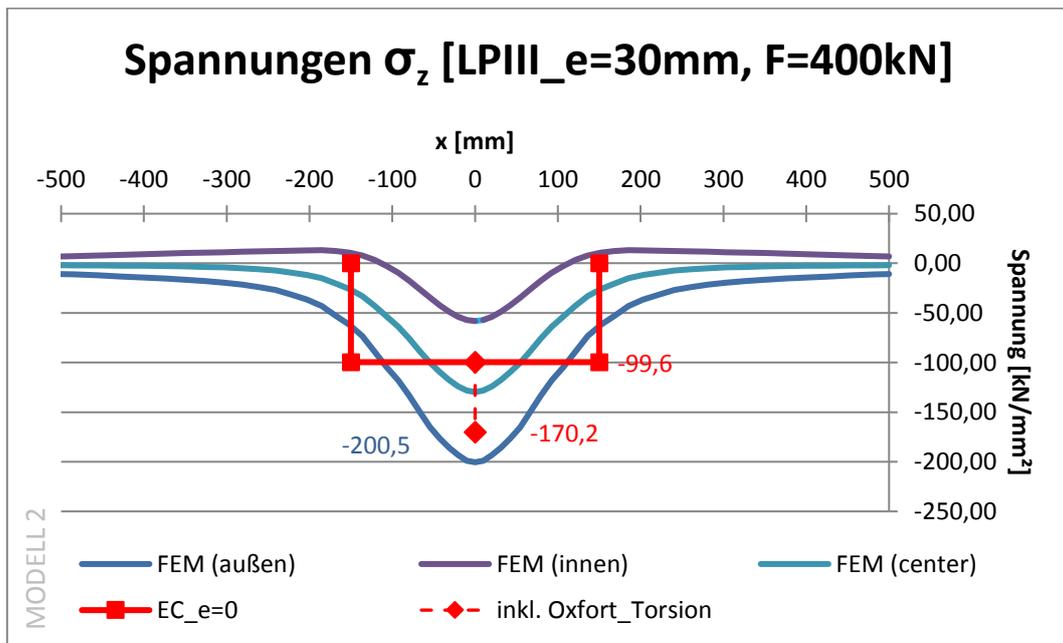


Abbildung 6.101: Spannungsdiagramm LP III, Exzentrizität +30 mm, Modell 2

6.6.2.5 System LP III – Lasteinleitung  $e=-10$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt.

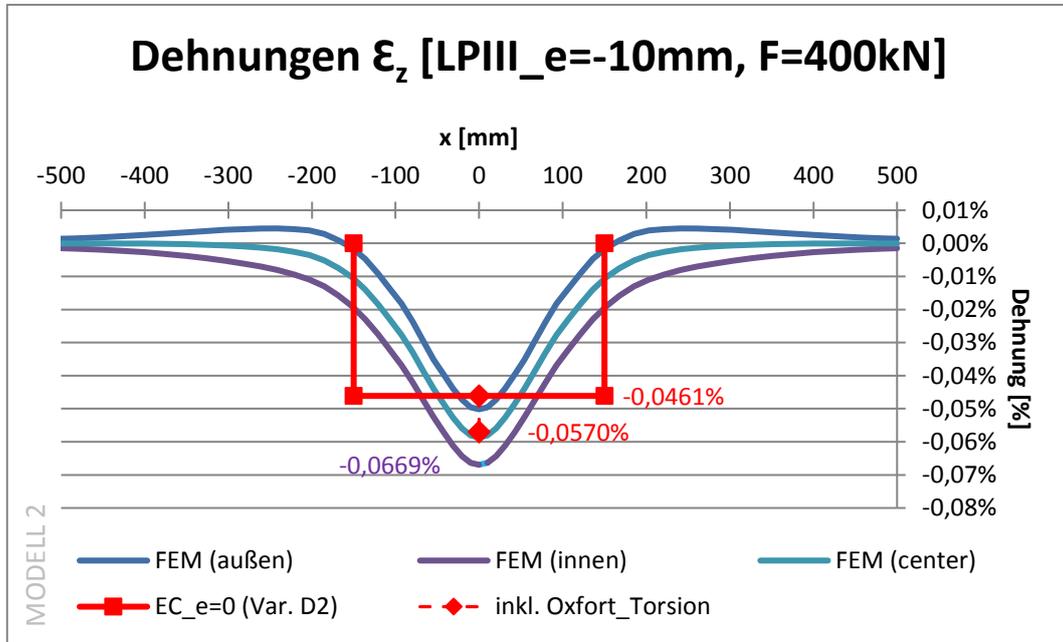


Abbildung 6.102: Dehnungsdiagramm LP III, Exzentrizität -10 mm, Modell 2

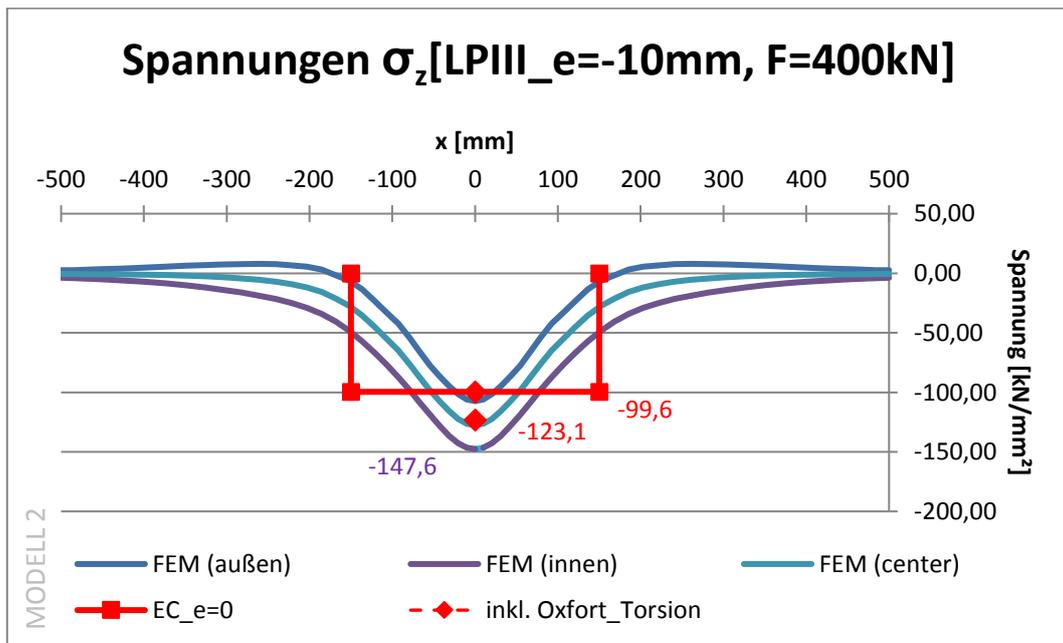


Abbildung 6.103: Spannungsdiagramm LP III, Exzentrizität -10 mm, Modell 2

## 6.7 FE-Modell 3 im Detail

Im nachfolgenden Kapitel werden die Daten und Ergebnisse für das FE-Modell 3 aufbereitet. Es umfasst Spannungs- und Dehnungsdiagramme und die Ergebnisse werden jeweils mit der Norm verglichen. Für die Vergleiche mit der Norm werden die Berechnungen mit der abgenutzten Schiene mit 12,5 % herangezogen. Dazu werden die Ergebnisse aus Kapitel 2.6 herangezogen.

Nachfolgende Abbildung zeigt nochmals die Modellierungsschritte. Modell 3 ist hier grün umrandet.

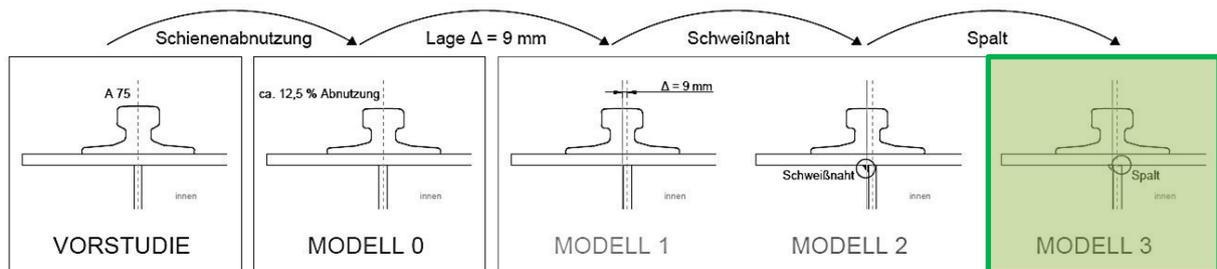


Abbildung 6.104: Schemaskizze der FEM-Studie

An dieser Stelle soll noch einmal erläutert werden, welche Änderungen das betrachtete Modell beinhaltet. Das Modell 3 ist aus dem Modell 2 entstanden, wie man an der schematischen Abbildung erkennen kann. Die Änderungen die vorgenommen wurden, belaufen sich auf den Spalt, der innenseitig im Hohlkastenprofil liegt.

Am Versuchsträger gab es einen Spalt, der sich innenseitig an der Stegobenseite befindet. Dieser wurde nun im Modell 3 implementiert. Der Spalt wurde als Hohlraum mit den Abmessungen sechs Millimeter horizontal und 0,1 Millimeter vertikal realisiert.



Abbildung 6.105: Stegdetail mit Spalt [Quelle: Markus Kettler, Februar 2018]

### 6.7.1 Ergebnisvergleich für System LP I

#### 6.7.1.1 System LP I – zentrische Lasteinleitung (e=0)

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt.

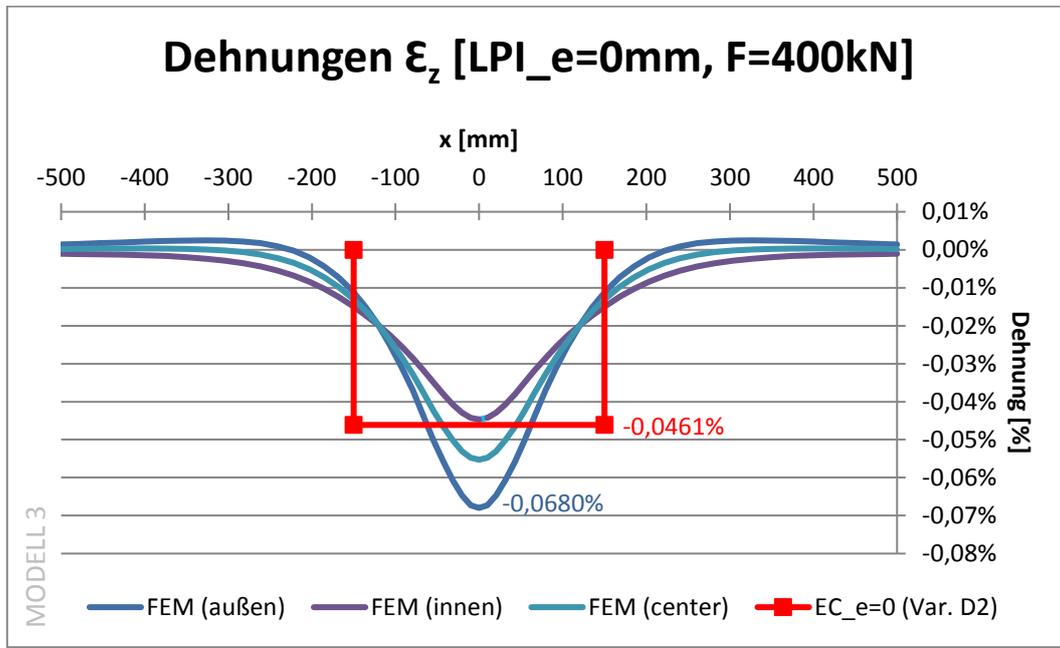


Abbildung 6.106: Dehnungsdiagramm LP I, ohne Exzentrizität, Modell 3

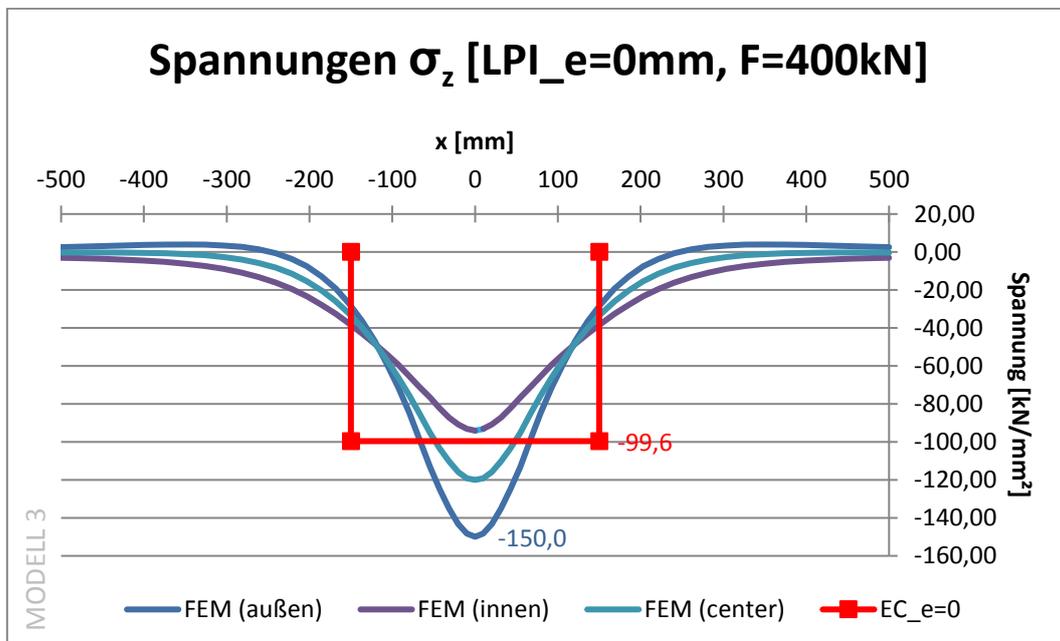


Abbildung 6.107: Spannungsdiagramm LP I, ohne Exzentrizität, Modell 3

Man kann erkennen, dass sich die Werte außen und innen durch den Spalt deutlich verändern. Erwartungsgemäß stellt sich innen eine Abnahme und außen eine Zunahme der Spannungen und Dehnungen ein.

6.7.1.2 System LP I – Lasteinleitung  $e=+10$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt.

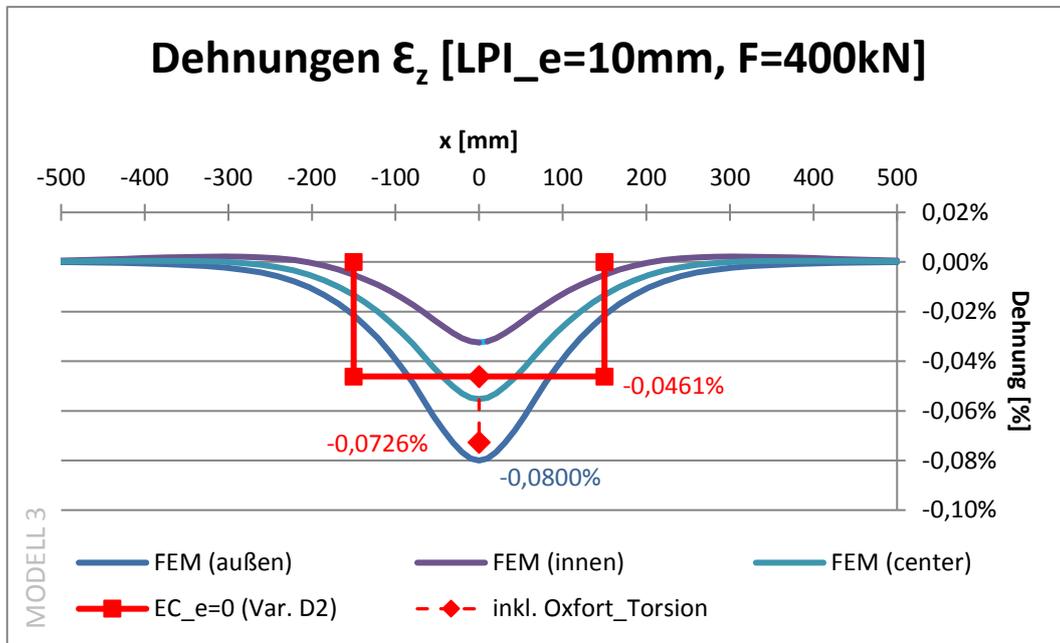


Abbildung 6.108: Dehnungsdiagramm LP I, Exzentrizität +10 mm, Modell 3

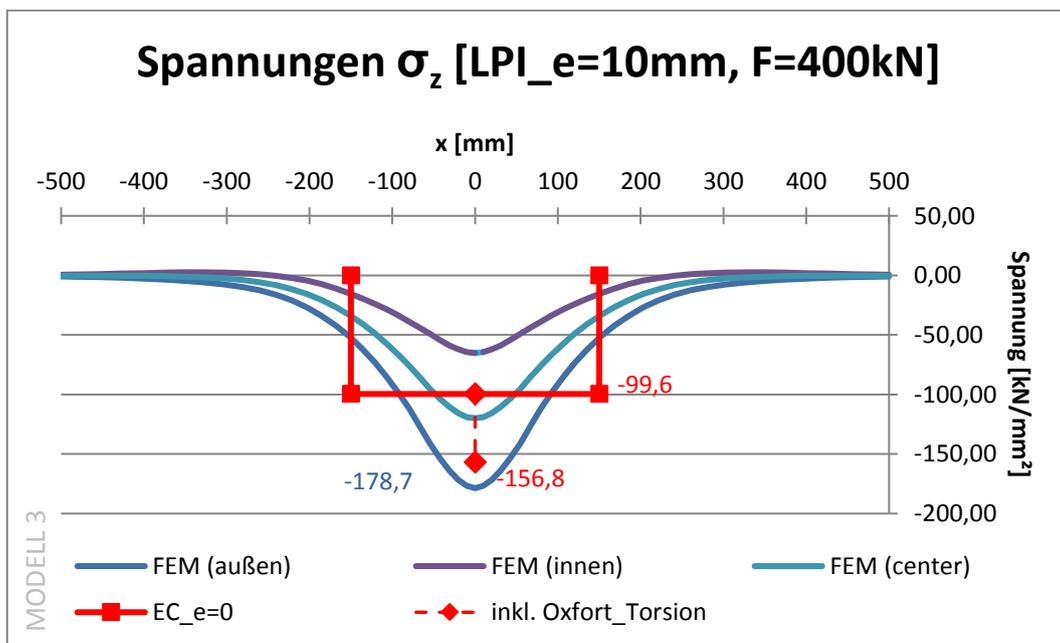


Abbildung 6.109: Spannungsdiagramm LP I, Exzentrizität +10 mm, Modell 3

6.7.1.3 System LP I – Lasteinleitung  $e=+20$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt.

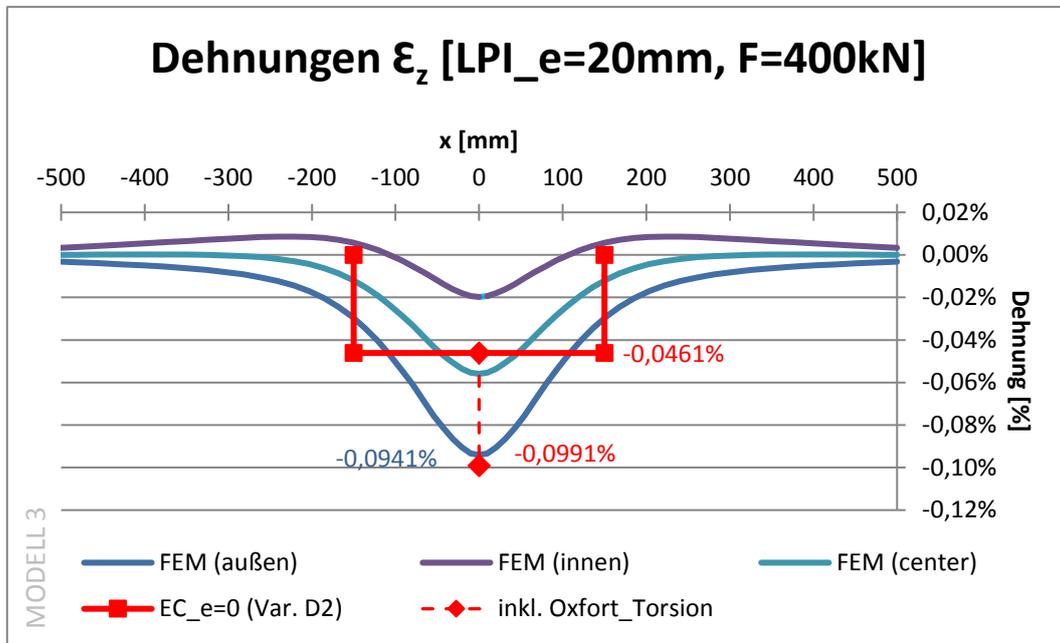


Abbildung 6.110: Dehnungsdiagramm LP I, Exzentrizität +20 mm, Modell 3

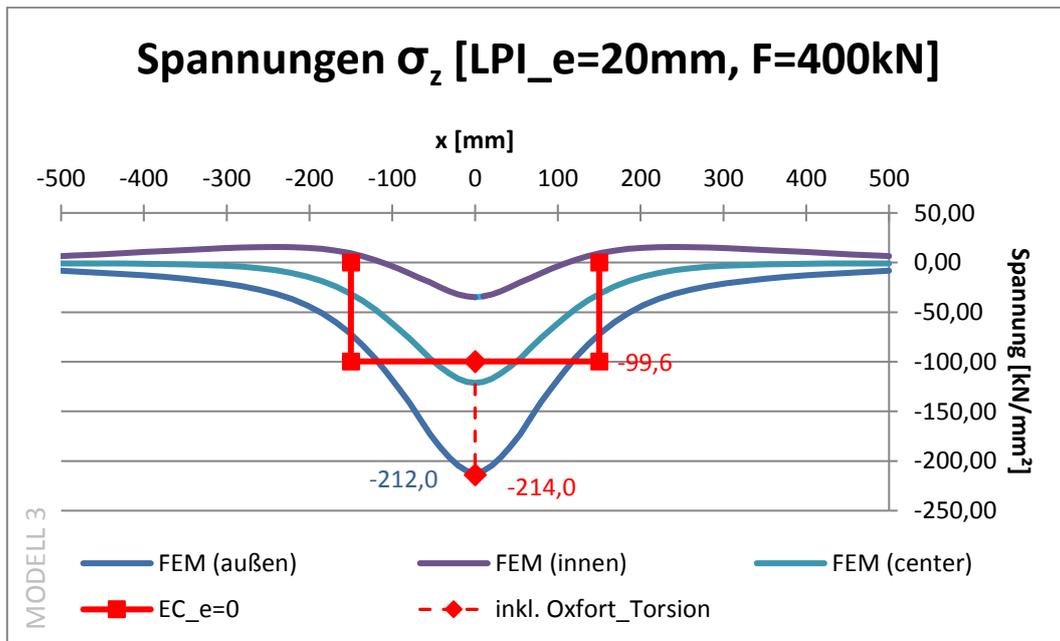


Abbildung 6.111: Spannungsdiagramm LP I, Exzentrizität +20 mm, Modell 3

6.7.1.4 System LP I – Lasteinleitung  $e=+30$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt.

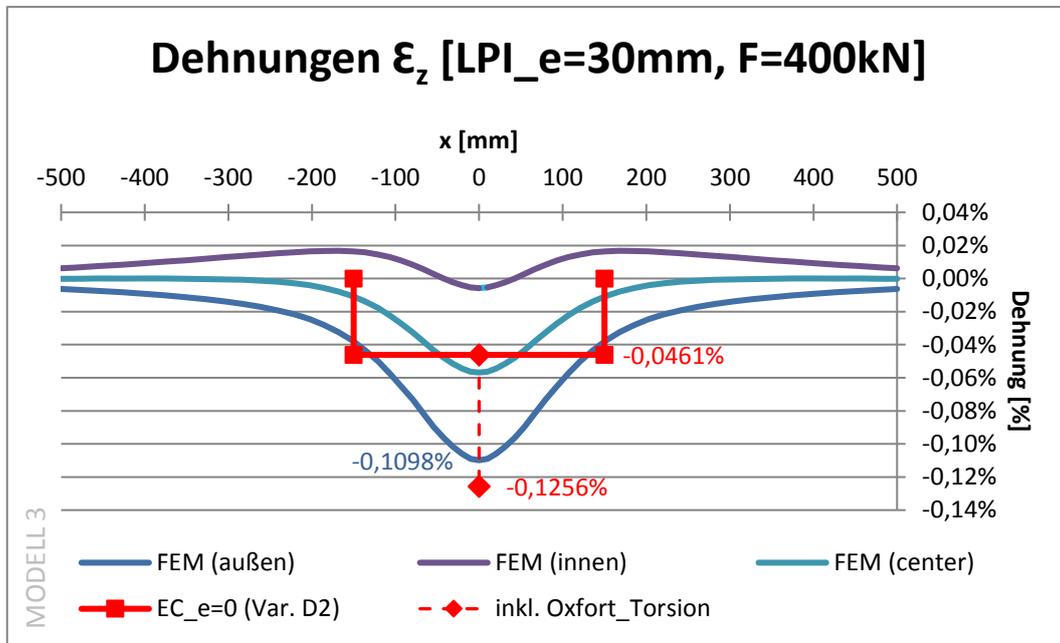


Abbildung 6.112: Dehnungsdiagramm LP I, Exzentrizität +30 mm, Modell 3

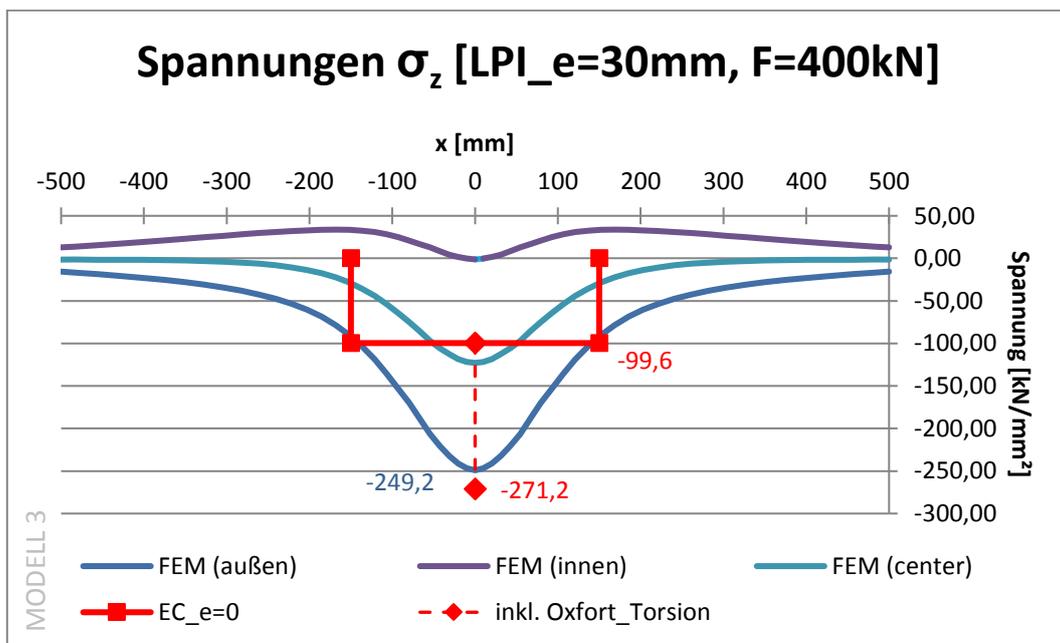


Abbildung 6.113: Spannungsdiagramm LP I, Exzentrizität +30 mm, Modell 3

6.7.1.5 System LP I – Lasteinleitung  $e=-10$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt.

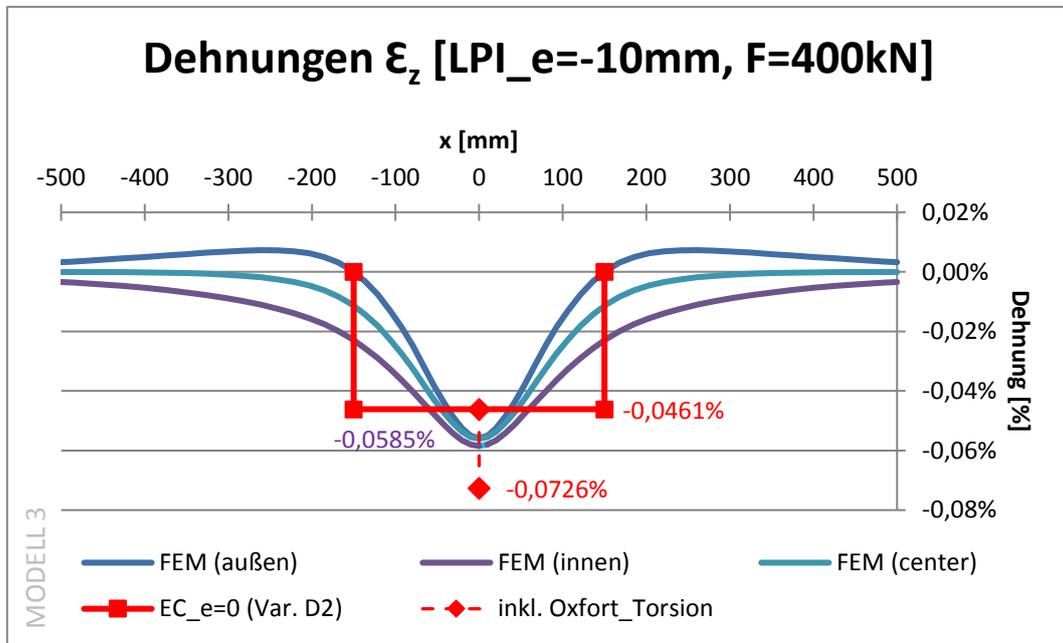


Abbildung 6.114: Dehnungsdiagramm LP I, Exzentrizität -10 mm, Modell 3

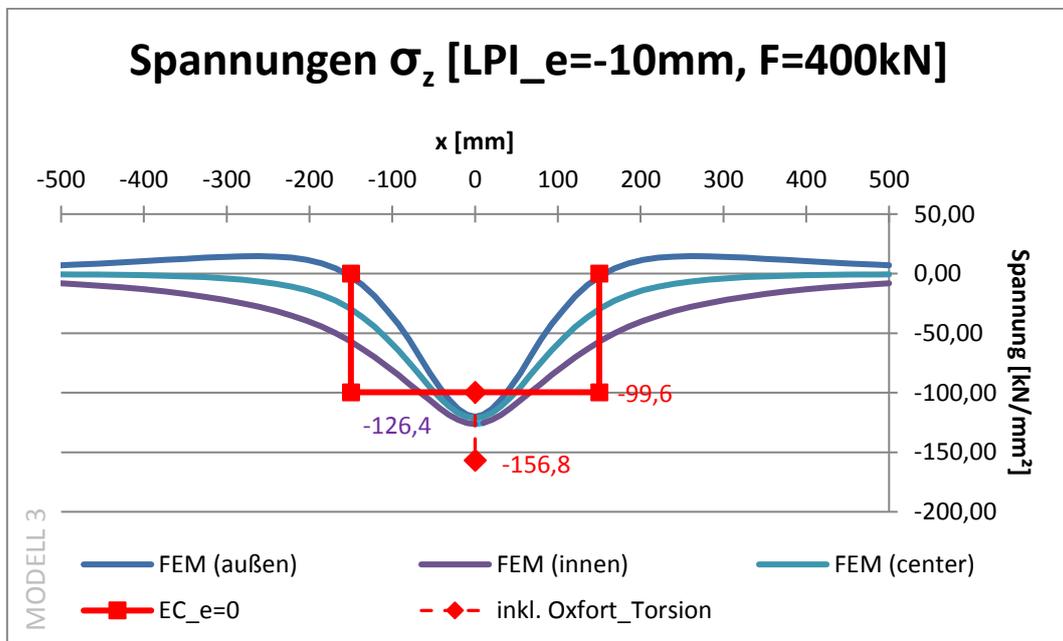


Abbildung 6.115: Spannungsdiagramm LP I, Exzentrizität -10 mm, Modell 3

Man erkennt, dass die maximalen Spannungen außen und innen in etwa gleich groß sind.

## 6.7.2 Ergebnisvergleich für System LP III

### 6.7.2.1 System LP III – zentrische Lasteinleitung (e=0)

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt.

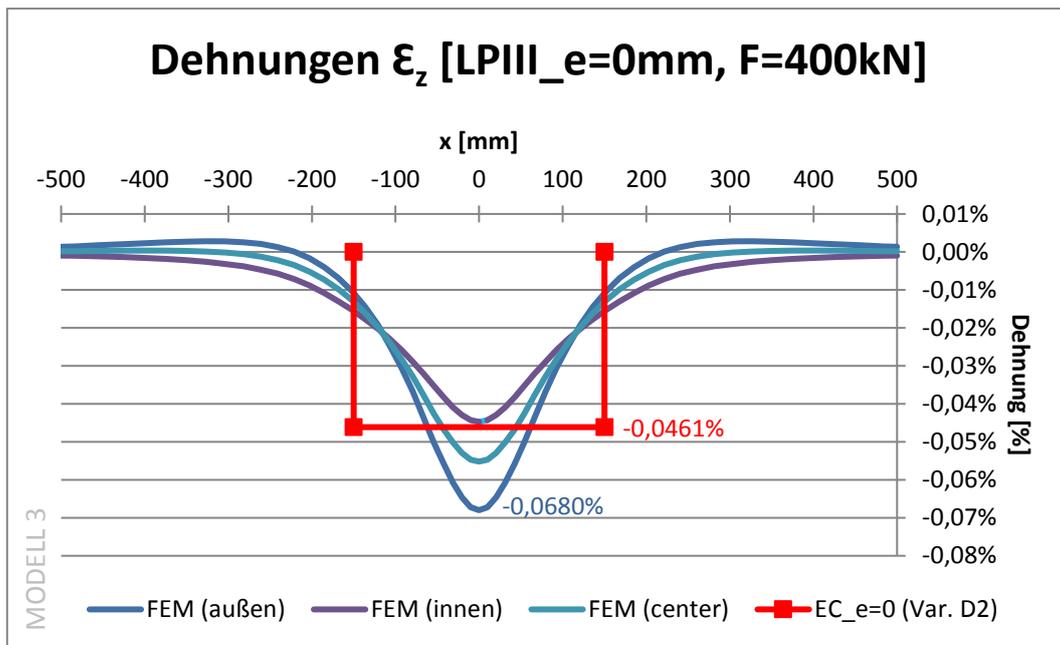


Abbildung 6.116: Dehnungsdiagramm LP III, ohne Exzentrizität, Modell 3

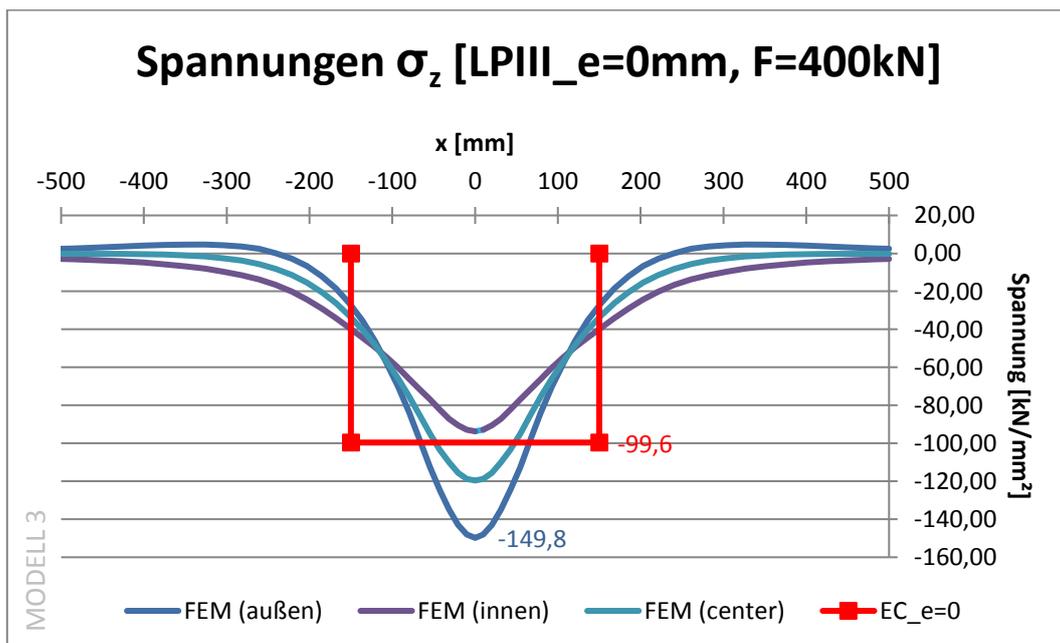


Abbildung 6.117: Spannungsdiagramm LP III, ohne Exzentrizität, Modell 3

6.7.2.2 System LP III – Lasteinleitung  $e=+10$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt.

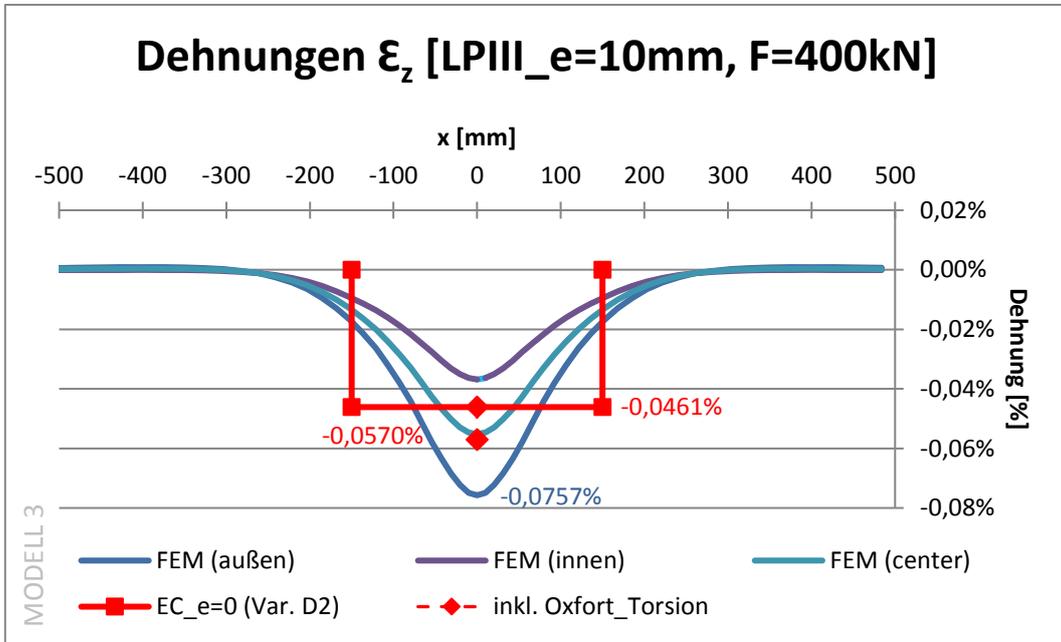


Abbildung 6.118: Dehnungsdiagramm LP III, Exzentrizität +10 mm, Modell 3

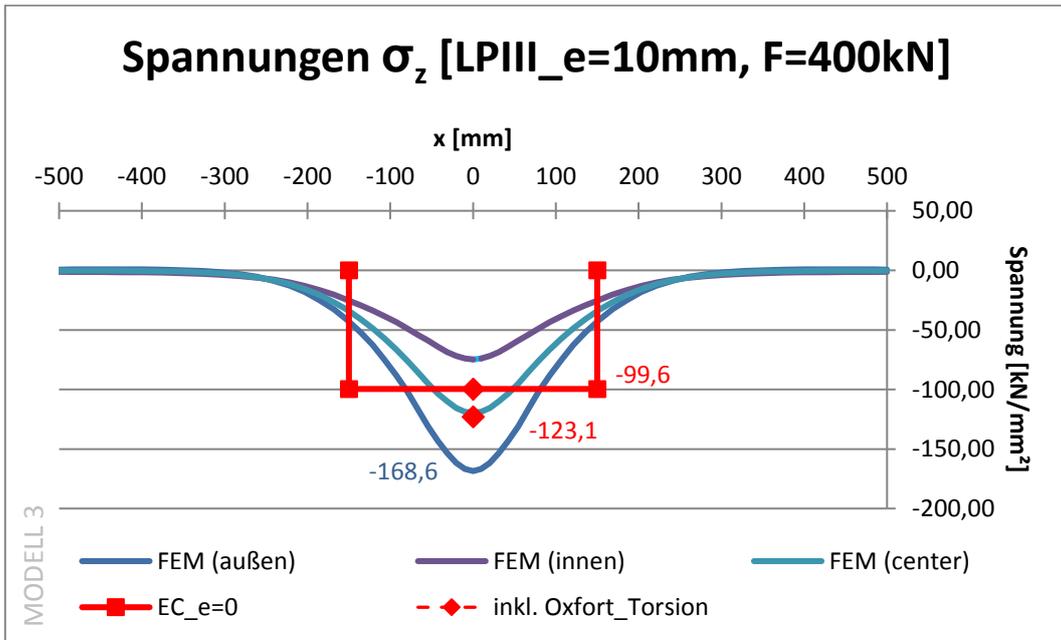


Abbildung 6.119: Spannungsdiagramm LP III, Exzentrizität +10 mm, Modell 3

6.7.2.3 System LP III – Lasteinleitung  $e=+20$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt.

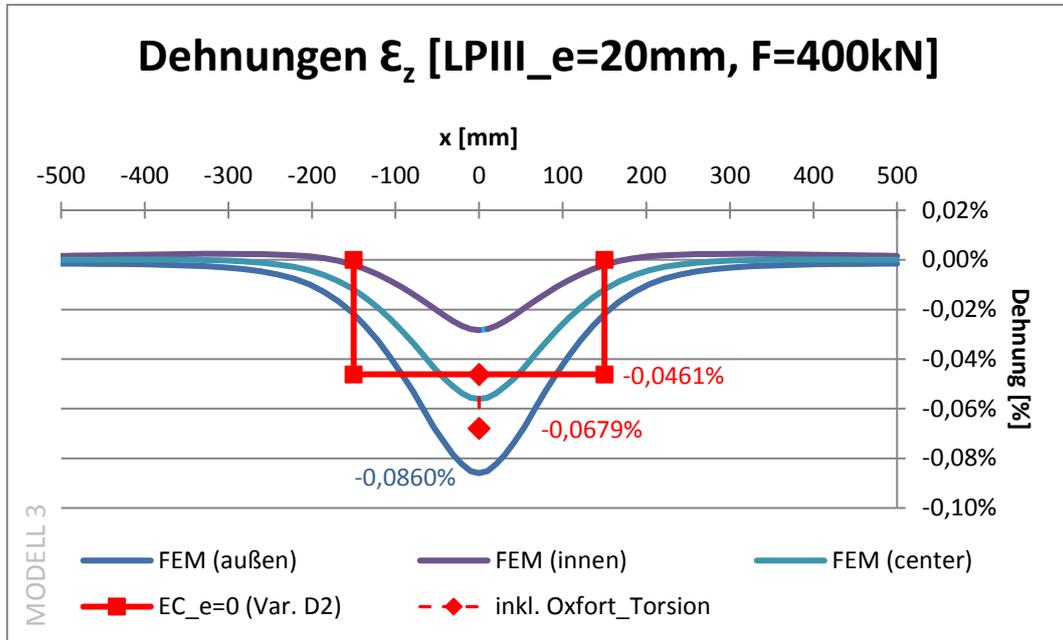


Abbildung 6.120: Dehnungsdiagramm LP III, Exzentrizität +20 mm, Modell 3

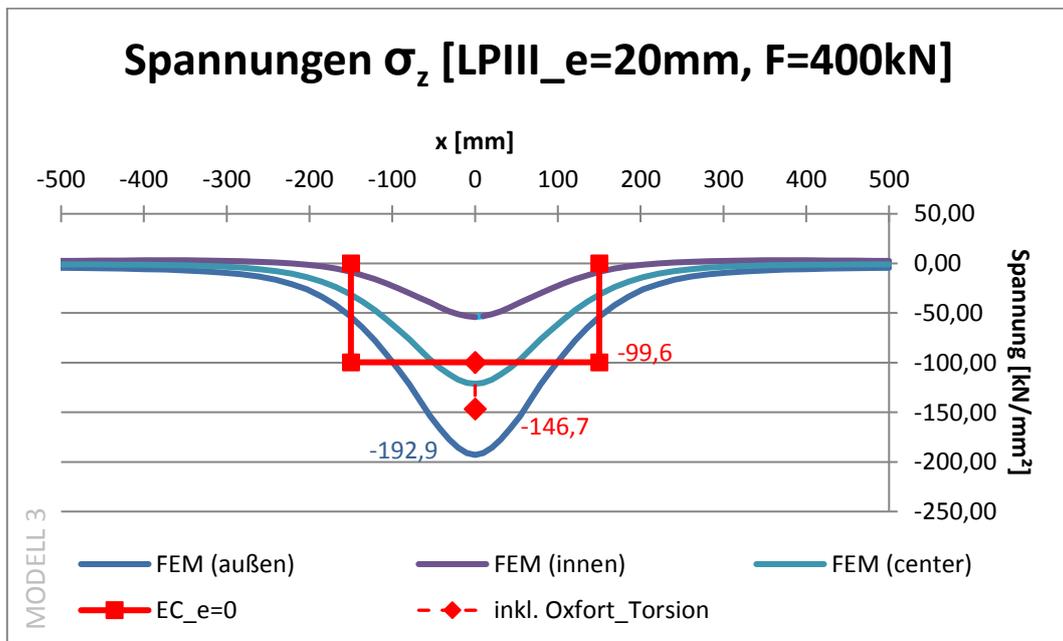


Abbildung 6.121: Spannungsdiagramm LP III, Exzentrizität +20 mm, Modell 3

6.7.2.4 System LP III – Lasteinleitung  $e=+30$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt.

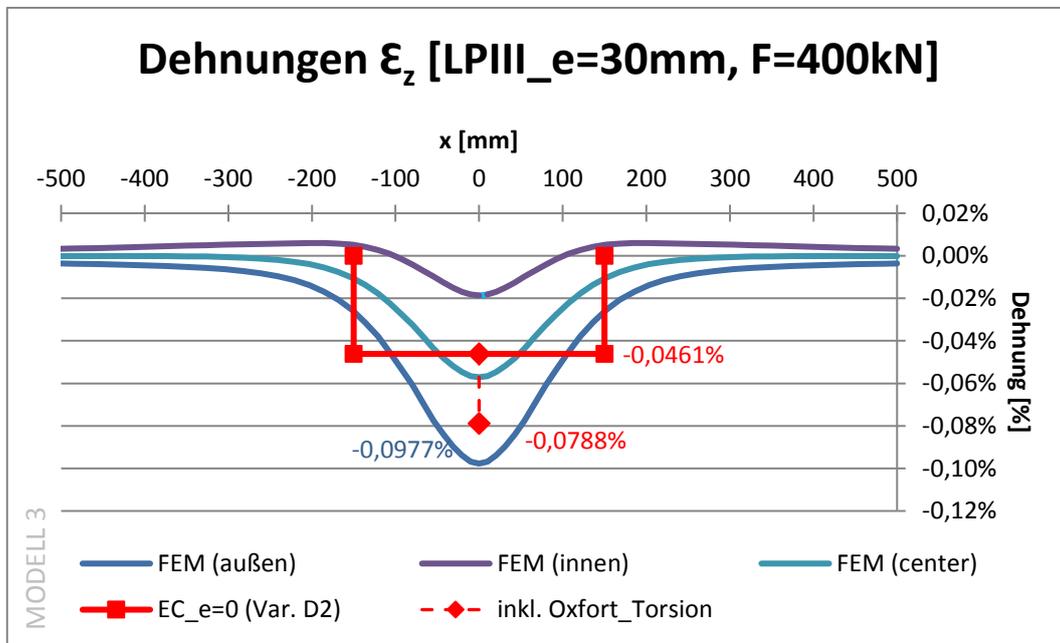


Abbildung 6.122: Dehnungsdiagramm LP III, Exzentrizität +30 mm, Modell 3

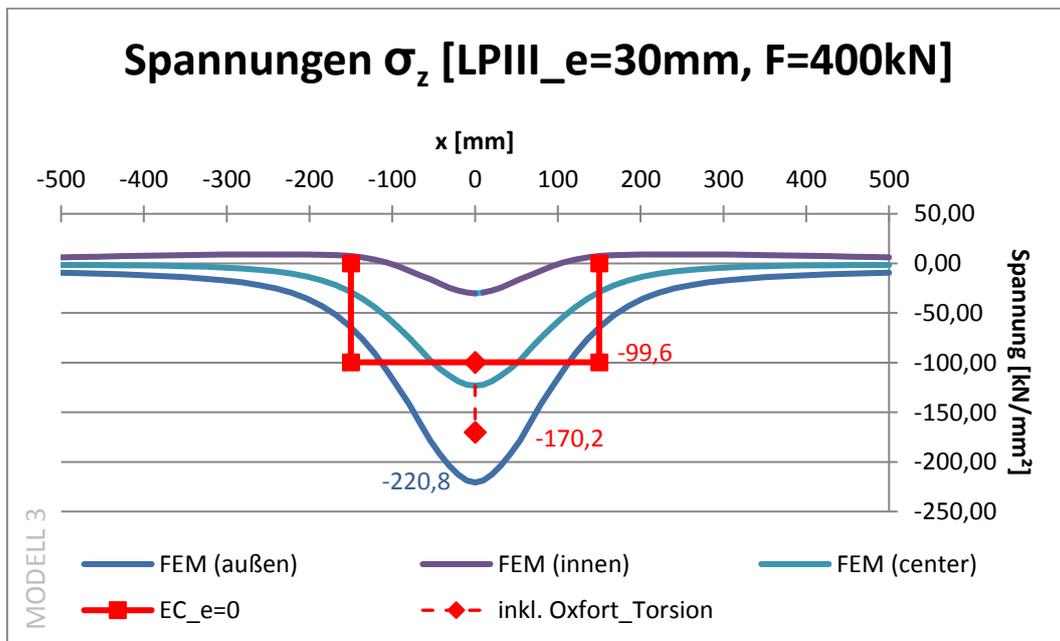


Abbildung 6.123: Spannungsdiagramm LP III, Exzentrizität +30 mm, Modell 3

6.7.2.5 System LP III – Lasteinleitung  $e=-10$  mm

Nachstehend werden die Spannungs- und Dehnungsdiagramme dargestellt. Es wurden jeweils alle drei Verläufe (außenseitig am Steg, zentrisch im Trägersteg und innenseitig am Steg) abgebildet. Die Normwerte sind in roter Farbe dargestellt.

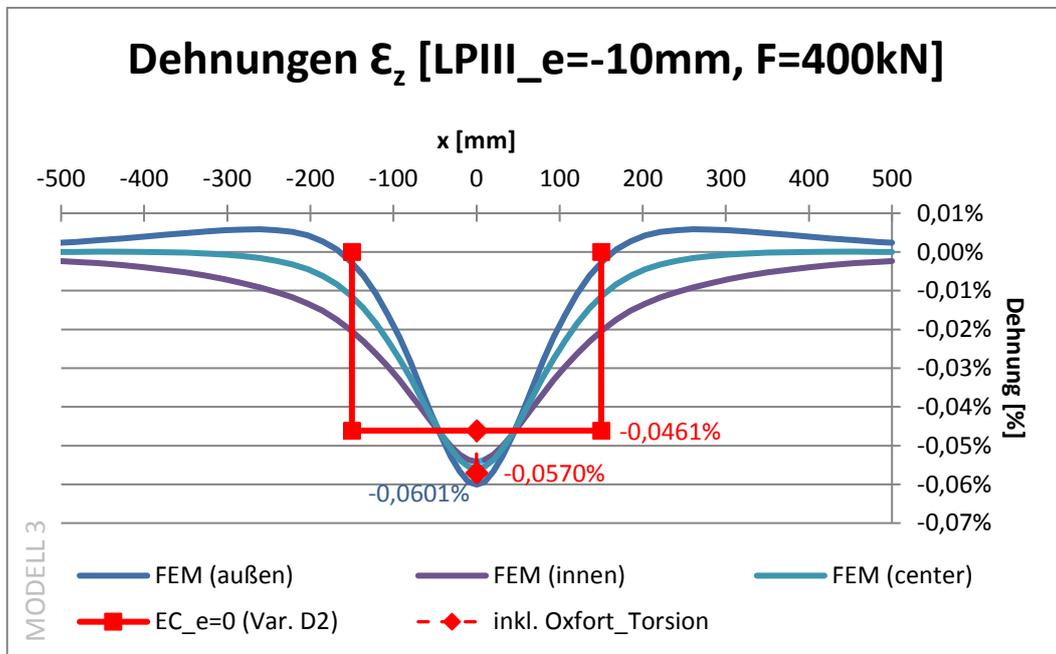


Abbildung 6.124: Dehnungsdiagramm LP III, Exzentrizität -10 mm, Modell 3

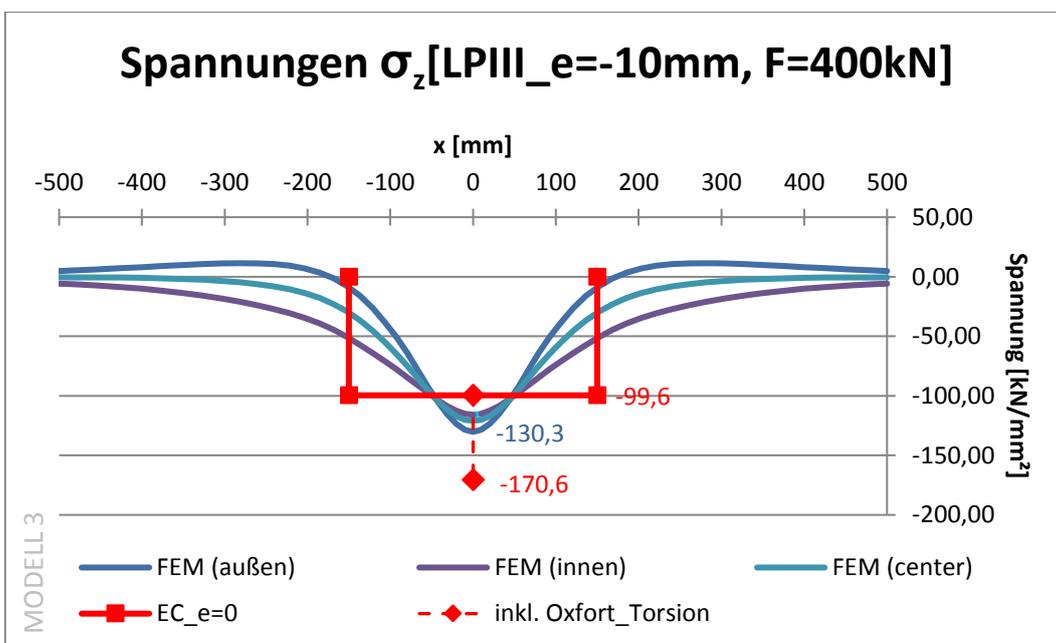


Abbildung 6.125: Spannungsdiagramm LP III, Exzentrizität -10 mm, Modell 3

## 7 Analyse der Ergebnisse – Versuch vs. Numerische Berechnung

In diesem Kapitel wird zuerst ein Vergleich zwischen der FEM-Modellierung und den Versuchsergebnissen gezogen. Dazu werden konkret die FE-Modelle 2 und 3 betrachtet. Des Weiteren werden die Ergebnisse der Systeme LP I und LP III verglichen. Hierbei werden Schlussfolgerungen zu den lokalen Beanspruchungen mit bzw. ohne Längssteife gezogen.

### 7.1 Vergleich zwischen den Versuchsergebnissen und der FEM-Studie

In diesem Unterkapitel werden die Modelle 2 und 3 näher betrachtet und die Kurven der Versuchsergebnisse in die Diagramme miteinbezogen. Somit sollen mit der grafischen Darstellung die Ergebnisse anschaulich gemacht werden.

#### 7.1.1 Modell 2 im Vergleich zum Versuch

##### 7.1.1.1 System LP I, ohne Exzentrizität

Das nachfolgende Diagramm in Abbildung 7.1 zeigt die Dehnungen des Laborversuchs für System LP I, ohne Exzentrizität bei einer Kraftaufbringung von 400 kN. Hierbei befinden sich die DMS 1-5 innenseitig am Steg und der DMS 6 außenseitig am Steg. Zusätzlich wird die Kurve aus der Mercury-Auswertung in grün angegeben, die zusätzlich die Ergebnisse an der Außenseite des Steges angibt. Des Weiteren sind die FEM-Kurven von Modell 2 eingezeichnet und der Vergleichswert der Norm.

Der Unterschied zwischen der Dehnung der FEM-Kurve und der Dehnung aus den Laborversuchen beträgt circa 0,023 % an der Stelle  $x=0$  mm (Zur Erklärung:  $-0,0581$  % (FEM-Wert innen) minus  $-0,035$  % (DMS) =  $0,0231$ ). Dies entspricht einer Abweichung zum Laborversuch von 66 % (Zur Erklärung:  $(\text{FEM-Wert innen} - \text{DMS}) / \text{DMS}$ ).

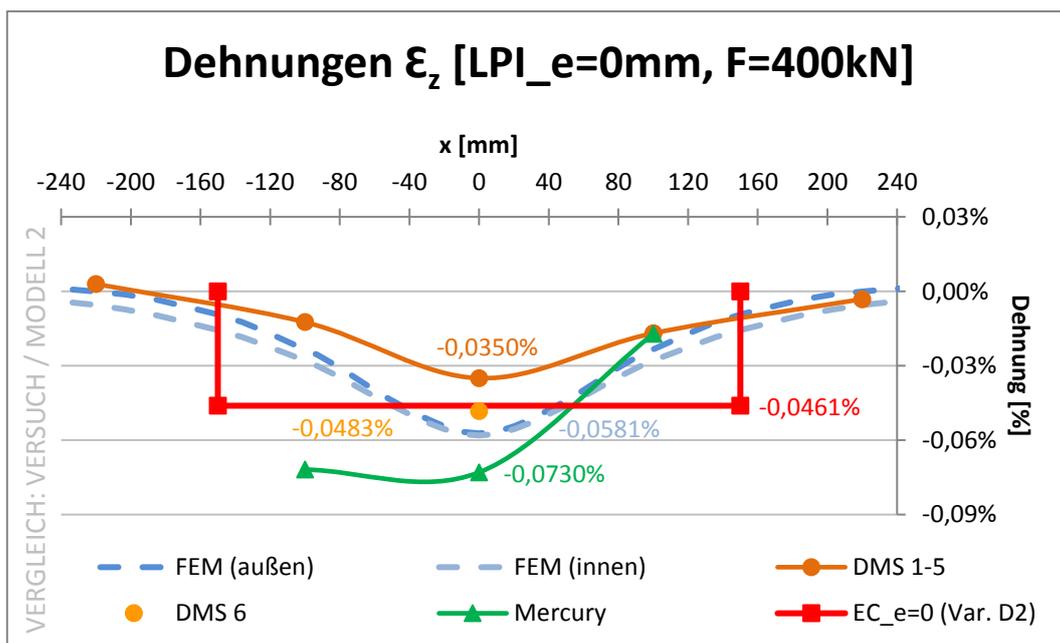


Abbildung 7.1: Dehnungsdiagramm LP I, ohne Exzentrizität

7.1.1.2 System LP I, mit Exzentrizität  $e=+10$  mm

Das nachfolgende Diagramm in Abbildung 7.2 zeigt die Dehnungen des Laborversuchs des Systems LP I, mit einer Exzentrizität von  $e=+10$  mm bei einer Kraftaufbringung von 400 kN. Hierbei befinden sich die DMS 1-5 innenseitig am Steg und der DMS 6 außenseitig am Steg. Zusätzlich wird die Kurve aus der Mercury-Auswertung in grün angegeben, die zusätzlich die Ergebnisse an der Außenseite des Steges angibt. Des Weiteren sind die FEM-Kurven von Modell 2 eingezeichnet und der Vergleichswert der Norm.

Der Unterschied zwischen der Dehnung der FEM-Kurve und der Dehnung aus den Laborversuchen beträgt circa 0,0063 % (an der Stelle  $x=0$  mm, außenseitig abgegriffen). Dies entspricht einer Abweichung zum Laborversuch von 1 %. Diese Übereinstimmung ist außenseitig relativ gut. Innenseitig weisen die Werte zwischen FEM-Berechnung und Laborversuch deutlich größere Abweichungen der Dehnungen auf. Man muss allerdings auch hier ergänzen, dass die Tendenz richtig ist. Des Weiteren stimmt der Wert aus der Norm, einschließlich Oxford-Torsions-Berechnung, gut mit dem maximalen Wert überein.

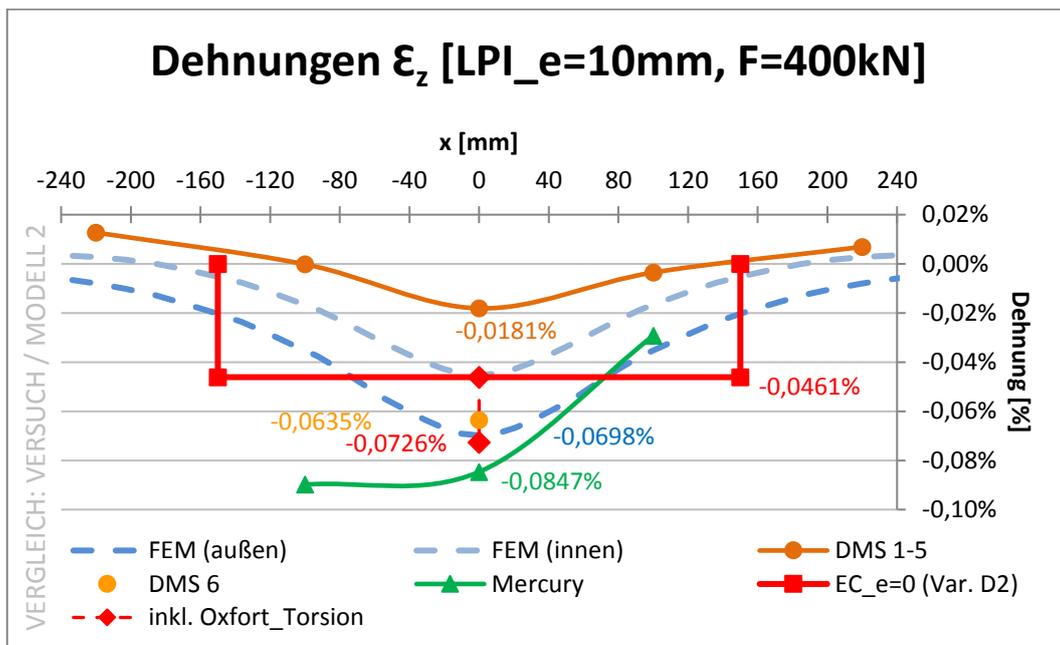


Abbildung 7.2: Dehnungsdiagramm LP I, mit Exzentrizität  $e=+10$  mm

### 7.1.1.3 System LP I, mit Exzentrizität $e=+20$ mm

Das nachfolgende Diagramm in Abbildung 7.3 zeigt die Dehnungen des Laborversuchs des Systems LP I, mit einer Exzentrizität von  $e=+20$  mm bei einer Kraftaufbringung von 400 kN. Hierbei befinden sich die DMS 1-5 innenseitig am Steg und der DMS 6 außenseitig am Steg. Zusätzlich wird die Kurve aus der Mercury-Auswertung in grün angegeben, die Ergebnisse an der Außenseite des Steges angibt. Des Weiteren sind die FEM-Kurven von Modell 2 eingezeichnet und der Vergleichswert der Norm.

Der Unterschied zwischen der Dehnung der FEM-Kurve und der Dehnung aus den Laborversuchen beträgt circa 0,0053 % (an der Stelle  $x=0$  mm, außenseitig abgegriffen). Dies entspricht einer Abweichung zum Laborversuch von 6 %. Diese Übereinstimmung ist außenseitig relativ gut. Innenseitig weisen die Werte zwischen FEM-Berechnung und Laborversuch deutlich größere Abweichungen der Dehnungen auf. Man muss allerdings auch hier ergänzen, dass die Tendenz richtig ist. Des Weiteren stimmt der Wert aus der Norm, einschließlich Oxfort-Torsions-Berechnung, gut mit dem maximalen Wert überein.

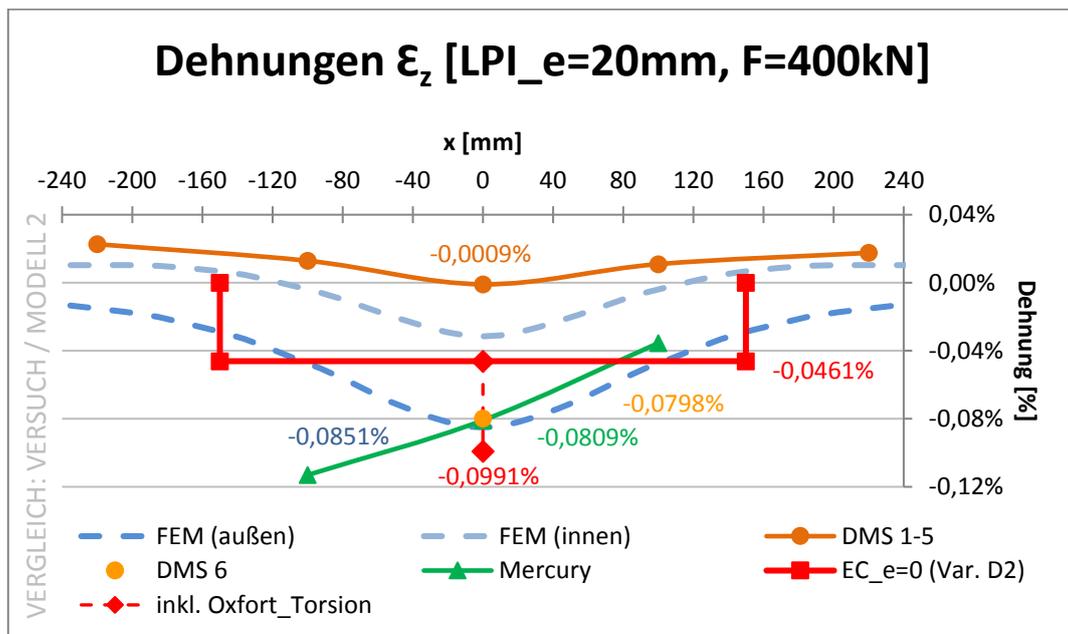


Abbildung 7.3: Dehnungsdiagramm LP I, mit Exzentrizität  $e=+20$  mm

#### 7.1.1.4 System LP I, mit Exzentrizität $e=+30$ mm

Das nachfolgende Diagramm in Abbildung 7.4 zeigt die Dehnungen des Laborversuchs für das System LP I, mit einer Exzentrizität von  $e=+30$  mm bei einer Kraftaufbringung von 300 kN. Hierbei befinden sich die DMS 1-5 innenseitig am Steg und der DMS 6 außenseitig am Steg. Zusätzlich wird die Kurve aus der Mercury-Auswertung in grün angegeben, die zusätzlich Ergebnisse an der Außenseite des Steges angibt. Des Weiteren sind die FEM-Kurven von Modell 2 eingezeichnet und der Vergleichswert der Norm.

Der Unterschied zwischen der Dehnung der FEM-Kurve und der Dehnung aus den Laborversuchen beträgt circa 0,0065 % (an der Stelle  $x=0$  mm, außenseitig abgegriffen). Dies entspricht einer Abweichung zum Laborversuch von 1 %. Diese Übereinstimmung ist außenseitig relativ gut. Innenseitig weisen die Werte zwischen FEM-Berechnung und Laborversuch mittig (an der Stelle  $x=0$  mm) größere Unterschiede der Dehnungen auf. Man muss allerdings auch hier ergänzen, dass die Tendenz richtig ist. Des Weiteren stimmt der Wert aus der Norm, einschließlich Oxfort-Torsions-Berechnung, gut mit dem maximalen Wert überein.

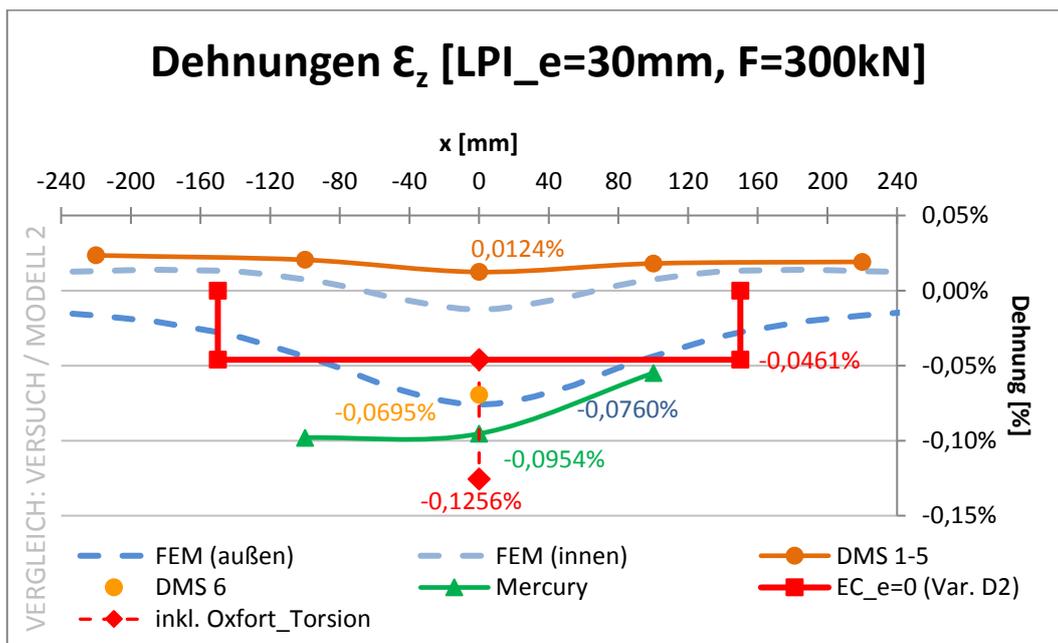


Abbildung 7.4: Dehnungsdiagramm LP I, mit Exzentrizität +30 mm

### 7.1.1.5 System LP I, mit Exzentrizität $e=-10$ mm

Das nachfolgende Diagramm in Abbildung 7.5 zeigt die Dehnungen des Laborversuchs für das System LP I, mit einer Exzentrizität von  $e=-10$  mm bei einer Kraftaufbringung von 400 kN. Hierbei befinden sich die DMS 1-5 innenseitig am Steg und der DMS 6 außenseitig am Steg. Zusätzlich wird die Kurve aus der Mercury-Auswertung in grün angegeben, die zusätzlich Ergebnisse an der Außenseite des Steges angibt. Des Weiteren sind die FEM-Kurven von Modell 2 eingezeichnet und der Vergleichswert der Norm.

Der Unterschied zwischen der Dehnung der FEM-Kurve und der Dehnung aus den Laborversuchen beträgt circa 0,0243 % (an der Stelle  $x=0$  mm, innenseitig abgegriffen). Dies entspricht einer Abweichung zum Laborversuch von 50 %. Außenseitig liegen die Werte der FEM-Berechnung und des Laborversuchs in einem ähnlichen Abstand zueinander. Man muss allerdings auch hier ergänzen, dass die Tendenz richtig ist. Des Weiteren stimmt der Wert aus der Norm, einschließlich Oxford-Torsions-Berechnung, gut mit dem maximalen Wert überein.

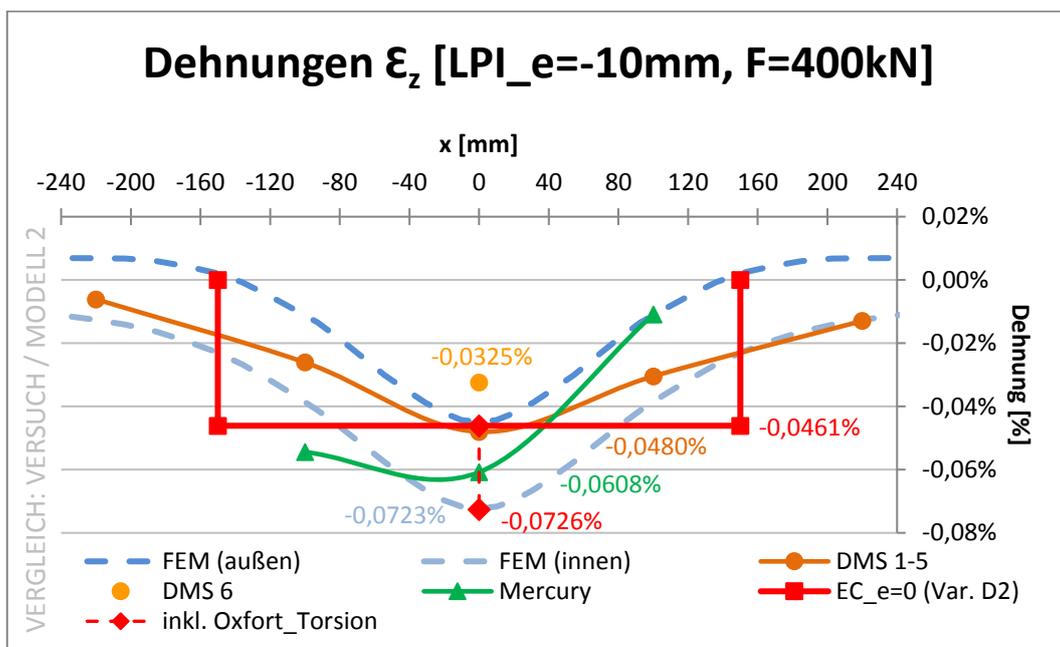


Abbildung 7.5: Dehnungsdiagramm LP I, mit Exzentrizität -10 mm

### 7.1.1.6 System LP III, ohne Exzentrizität

Das nachfolgende Diagramm in Abbildung 7.6 zeigt die Dehnungen des Laborversuchs für das System LP III, ohne Exzentrizität bei einer Kraftaufbringung von 400 kN. Hierbei befinden sich die DMS 1-5 innenseitig am Steg und der DMS 6 außenseitig am Steg. Zusätzlich wird die Kurve aus der Mercury-Auswertung in grün angegeben, die zusätzlich Ergebnisse an der Außenseite des Steges angibt. Des Weiteren sind die FEM-Kurven von Modell 2 eingezeichnet und der Vergleichswert der Norm.

Der Unterschied zwischen der Dehnung der FEM-Kurve und der Dehnung aus den Laborversuchen beträgt circa 0,0043 % (an der Stelle  $x=0$  mm, außenseitig abgegriffen). Dies entspricht einer Abweichung zum Laborversuch von 8 %. Diese Übereinstimmung ist außenseitig relativ gut. Innenseitig weisen die Werte zwischen FEM-Berechnung und Laborversuch deutlich größere Abweichungen auf. Man muss allerdings auch hier ergänzen, dass die Tendenz richtig ist.

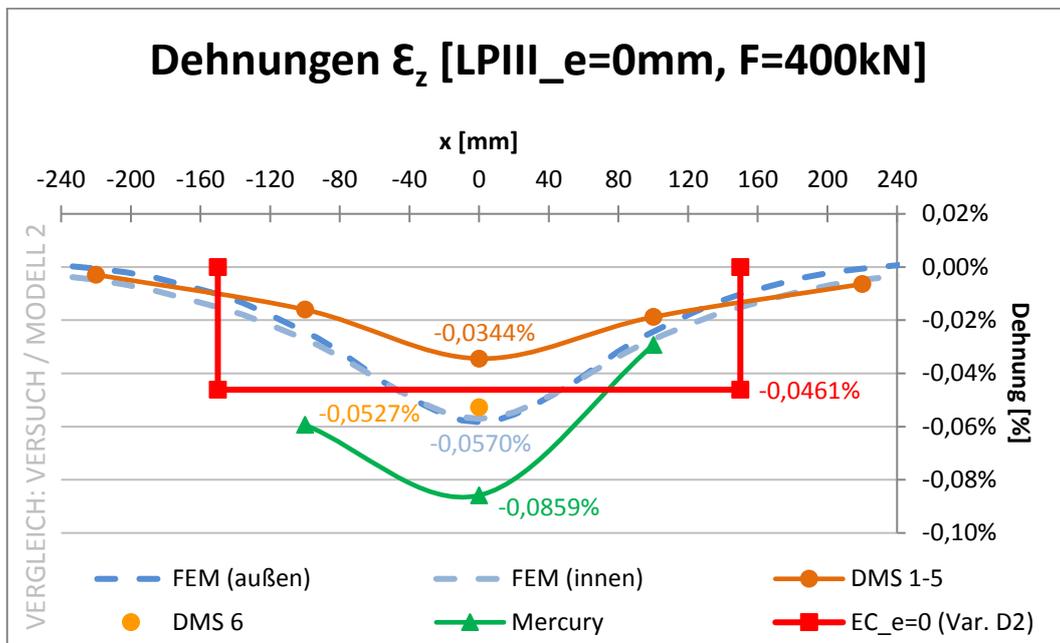


Abbildung 7.6: Dehnungsdiagramm LP III, ohne Exzentrizität

7.1.1.7 System LP III, mit Exzentrizität  $e=+10$  mm

Das nachfolgende Diagramm in Abbildung 7.7 zeigt die Dehnungen des Laborversuchs für das System LP III, mit einer Exzentrizität von  $e=+10$  mm bei einer Kraftaufbringung von 400 kN. Hierbei befinden sich die DMS 1-5 innenseitig am Steg und der DMS 6 außenseitig am Steg. Zusätzlich wird die Kurve aus der Mercury-Auswertung in grün angegeben, die zusätzlich Ergebnisse an der Außenseite des Steges angibt. Des Weiteren sind die FEM-Kurven von Modell 2 eingezeichnet und der Vergleichswert der Norm.

Der Unterschied zwischen der Dehnung der FEM-Kurve und der Dehnung aus den Laborversuchen beträgt circa 0,0035 % (an der Stelle  $x=0$  mm, außenseitig abgegriffen). Dies entspricht einer Abweichung zum Laborversuch von 6 %. Diese Übereinstimmung ist außenseitig relativ gut. Innenseitig weisen die Werte zwischen FEM-Berechnung und Laborversuch deutlich größere Abweichungen der Dehnungen auf. Man muss allerdings auch hier ergänzen, dass die Tendenz richtig ist. Der Wert aus der Norm, einschließlich der Oxfort-Torsions-Berechnung, liegt bei System LP III unter dem maximalen Wert.

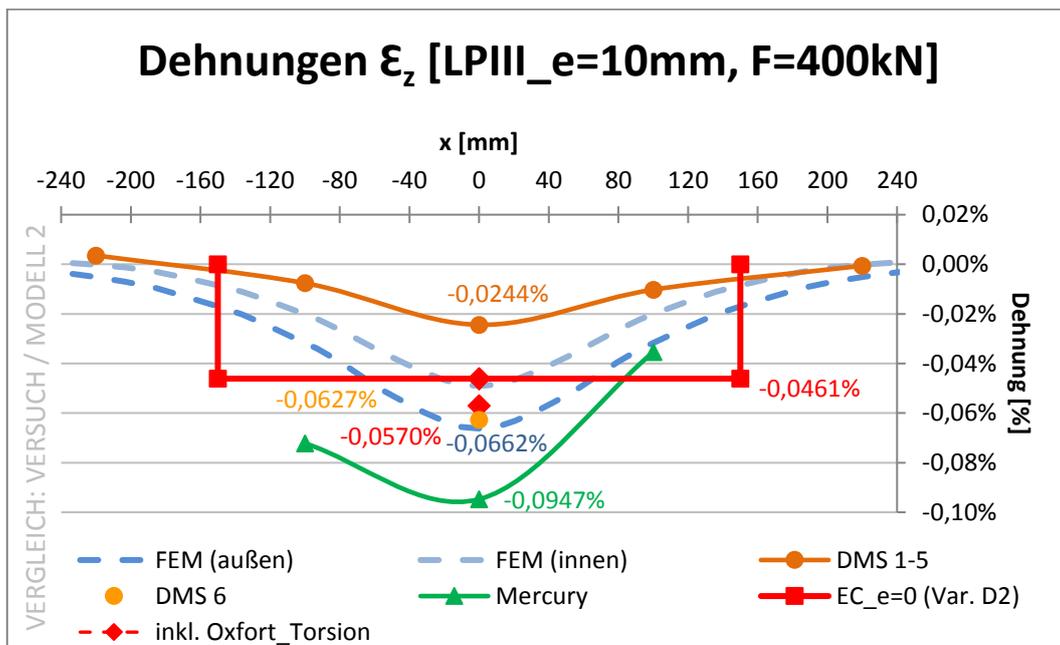


Abbildung 7.7: Dehnungsdiagramm LP III, mit Exzentrizität  $e=+10$  mm

### 7.1.1.8 System LP III, mit Exzentrizität $e=+20$ mm

Das nachfolgende Diagramm in Abbildung 7.8 zeigt die Dehnungen des Laborversuchs für das System LP III, mit einer Exzentrizität von  $e=+20$  mm bei einer Kraftaufbringung von 400 kN. Hierbei befinden sich die DMS 1-5 innenseitig am Steg und der DMS 6 außenseitig am Steg. Zusätzlich wird die Kurve aus der Mercury-Auswertung in grün angegeben, die zusätzlich Ergebnisse an der Außenseite des Steges angibt. Des Weiteren sind die FEM-Kurven von Modell 2 eingezeichnet und der Vergleichswert der Norm.

Der Unterschied zwischen der Dehnung der FEM-Kurve und der Dehnung aus den Laborversuchen beträgt circa 0,0034 % (an der Stelle  $x=0$  mm, außenseitig abgegriffen). Dies entspricht einer Abweichung zum Laborversuch von 5 %. Diese Übereinstimmung ist außenseitig relativ gut. Innenseitig weisen die Werte zwischen FEM-Berechnung und Laborversuch deutlich größere Abweichungen der Dehnungen auf. Man muss allerdings auch hier ergänzen, dass die Tendenz richtig ist. Der Wert aus der Norm, einschließlich der Oxford-Torsions-Berechnung, liegt bei System LP III unter dem maximalen Wert.

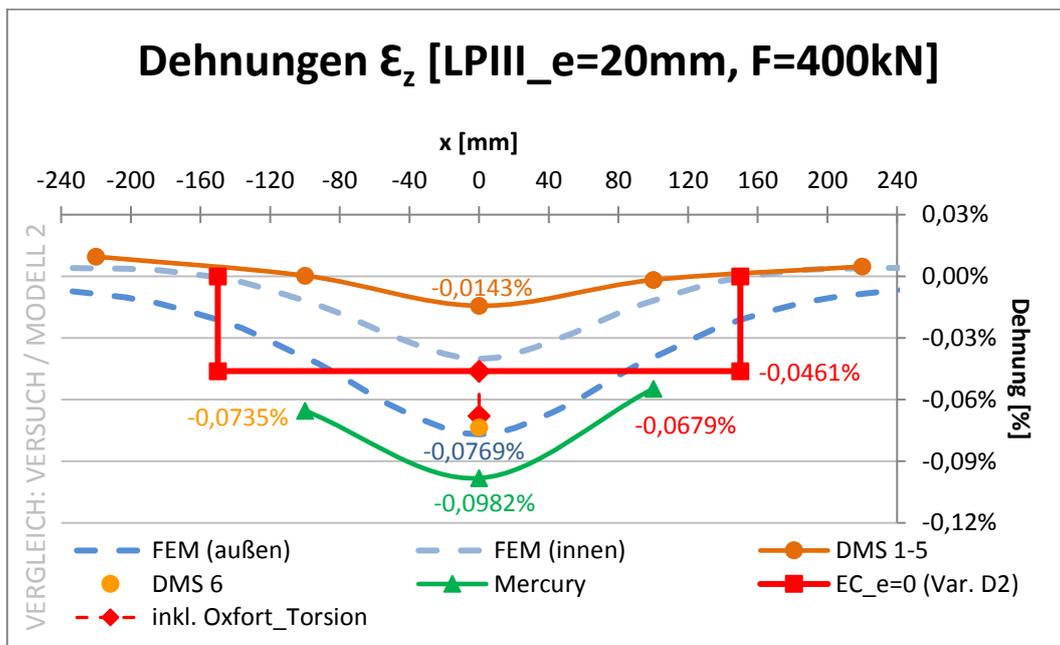


Abbildung 7.8: Dehnungsdiagramm LP III, mit Exzentrizität  $e=+20$  mm

### 7.1.1.9 System LP III, mit Exzentrizität $e=+30$ mm

Das nachfolgende Diagramm in Abbildung 7.9 zeigt die Dehnungen des Laborversuchs für System LP III, mit einer Exzentrizität von  $e=+30$  mm bei einer Kraftaufbringung von 400 kN. Hierbei befinden sich die DMS 1-5 innenseitig am Steg und der DMS 6 außenseitig am Steg. Zusätzlich wird die Kurve aus der Mercury-Auswertung in grün angegeben, die zusätzlich Ergebnisse an der Außenseite des Steges angibt. Des Weiteren sind die FEM-Kurven von Modell 2 eingezeichnet und der Vergleichswert der Norm.

Der Unterschied zwischen der Dehnung der FEM-Kurve und der Dehnung aus den Laborversuchen beträgt circa 0,0047 % (an der Stelle  $x=0$  mm, außenseitig abgegriffen). Dies entspricht einer Abweichung zum Laborversuch von 6 %. Diese Übereinstimmung ist außenseitig relativ gut. Innenseitig weisen die Werte zwischen FEM-Berechnung und Laborversuch deutlich größere Abweichungen der Dehnungen auf. Man muss allerdings auch hier ergänzen, dass die Tendenz richtig ist. Der Wert aus der Norm, einschließlich der Oxfort-Torsions-Berechnung, liegt bei System LP III unter dem maximalen Wert.

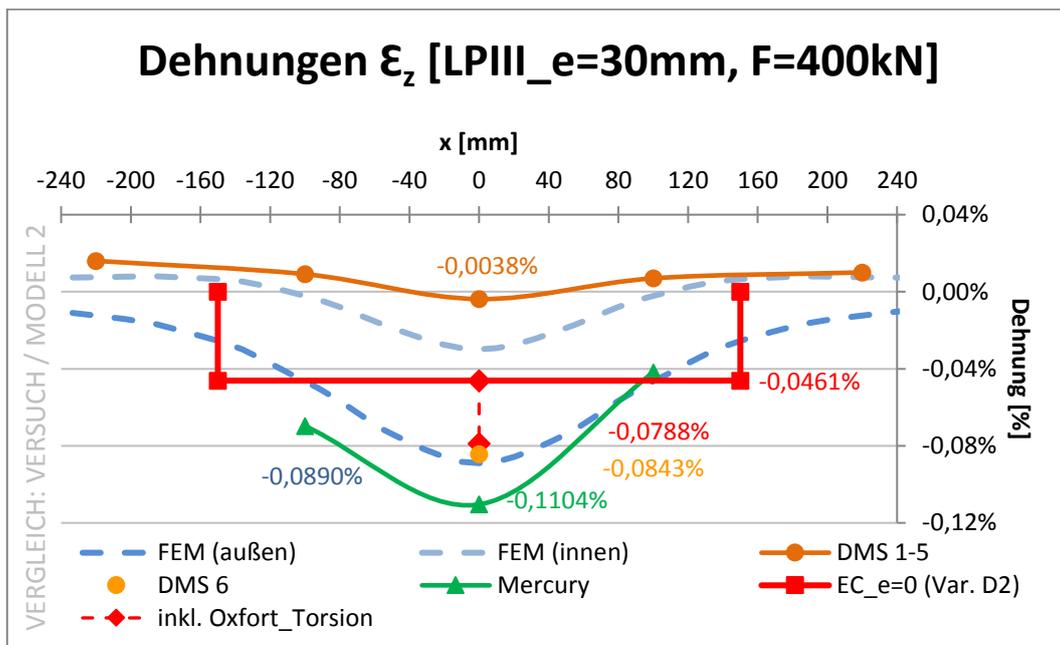


Abbildung 7.9: Dehnungsdiagramm LP III, mit Exzentrizität  $e=+30$  mm

### 7.1.1.10 System LP III, mit Exzentrizität $e=-10$ mm

Das nachfolgende Diagramm in Abbildung 7.10 zeigt die Dehnungen des Laborversuchs für System LP III und mit einer Exzentrizität von  $e=-10$  mm bei einer Kraftaufbringung von 400 kN. Hierbei befinden sich die DMS 1-5 innenseitig am Steg und der DMS 6 außenseitig am Steg. Zusätzlich wird die Kurve aus der Mercury-Auswertung in grün angegeben, die zusätzlich Ergebnisse an der Außenseite des Steges angibt. Des Weiteren sind die FEM-Kurven von Modell 2 eingezeichnet und der Vergleichswert der Norm.

Der Unterschied zwischen der Dehnung der FEM-Kurve und der Dehnung aus den Laborversuchen beträgt circa 0,023 % (an der Stelle  $x=0$  mm, innenseitig abgegriffen). Dies entspricht einer Abweichung zum Laborversuch von 54 %. Außenseitig weisen die Werte zwischen FEM-Berechnung und Laborversuch deutlich kleinere Abweichungen der Dehnungen auf. Man muss allerdings auch hier ergänzen, dass die Tendenz richtig ist. Die Werte der Laborversuche liegen bei diesem Versuch sehr eng nebeneinander. Die Mercury-Kurve zeigt deutliche Übereinstimmungen mit dem Wert, der außenseitig am Steg abgegriffen wurde. Der Wert aus der Norm, einschließlich der Oxford-Torsions-Berechnung, liegt bei System LP III unter dem maximalen Wert.

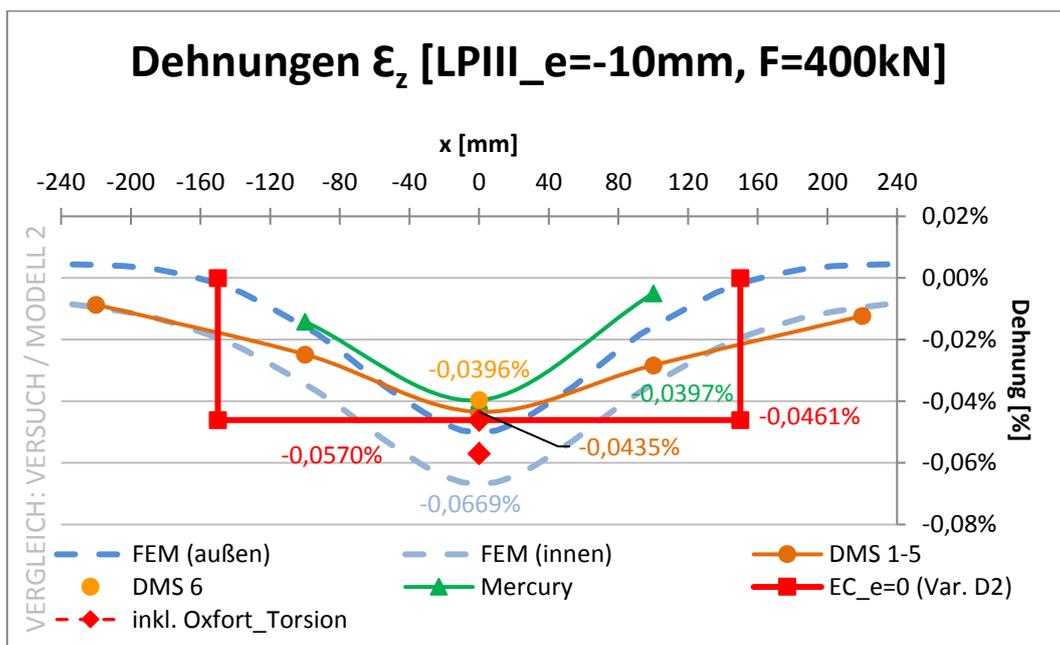


Abbildung 7.10: Dehnungsdiagramm LP III, mit Exzentrizität  $e=-10$  mm

## 7.1.2 Modell 3 im Vergleich zum Versuch

### 7.1.2.1 System LP I, ohne Exzentrizität

Das nachfolgende Diagramm in Abbildung 7.11 zeigt die Dehnungen des Laborversuchs für System LP I, ohne Exzentrizität bei einer Kraftaufbringung von 400 kN. Hierbei befinden sich die DMS 1-5 innenseitig am Steg und der DMS 6 außenseitig am Steg. Zusätzlich wird die Kurve aus der Mercury-Auswertung in grün angegeben, die zusätzlich Ergebnisse an der Außenseite des Steges angibt. Des Weiteren sind die FEM-Kurven von Modell 3 eingezeichnet und der Vergleichswert der Norm.

Der Unterschied zwischen der Dehnung der FEM-Kurve und der Dehnung aus den Laborversuchen beträgt circa 0,0197 % (an der Stelle  $x=0$  mm, außenseitig abgegriffen). Dies entspricht einer Abweichung zum Laborversuch von 41 %. Der Wert, der bei den Laborversuchen mit der Mercury-Methode gemessen wurde, ist allerdings deutlich ähnlicher zu dem Wert der mit FEM ermittelt wurde. Innenseitig weisen die Werte zwischen FEM-Berechnung und Laborversuch ähnliche Abweichungen der Dehnungen auf. Man muss allerdings auch hier ergänzen, dass die Tendenz richtig ist.

Als Änderung zu Modell 2 kann man hier deutlich erkennen, dass die FEM-Kurven an der Stelle  $x=0$  mm einen größeren Abstand zu den Versuchsergebnissen aufweisen. Im Modell 2 waren die Kurven sehr eng beieinander, hier weisen sie einen maximalen Unterschied von circa 0,022 % auf. Zusätzlich hat sich die FEM-Kurve außenseitig am Steg der Mercury-Kurve angenähert.

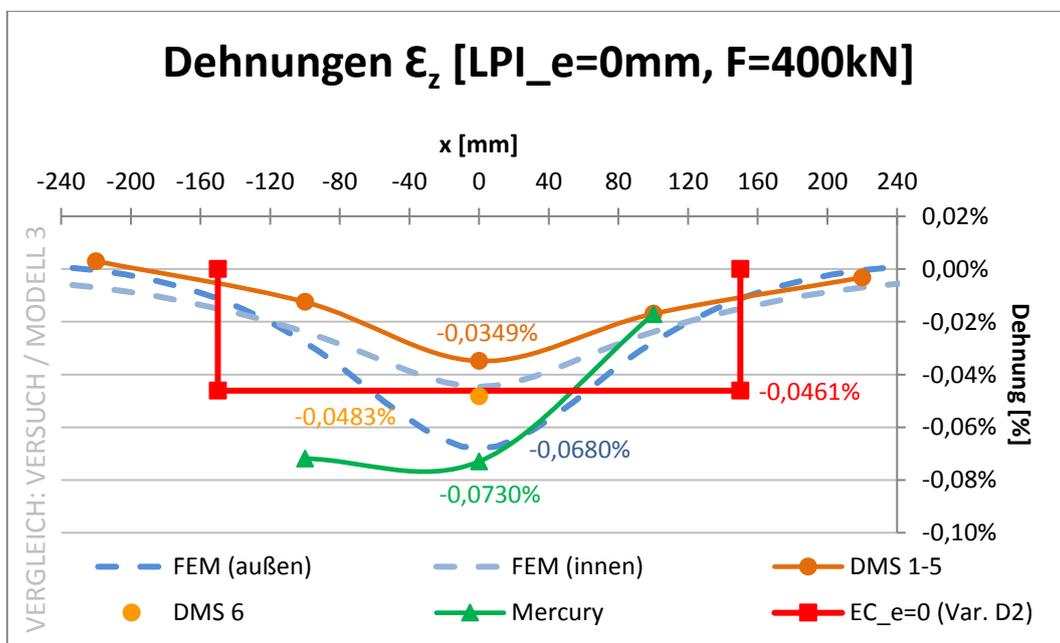


Abbildung 7.11: Dehnungsdiagramm LP I, ohne Exzentrizität

### 7.1.2.2 System LP I, mit Exzentrizität $e=+10$ mm

Das nachfolgende Diagramm in Abbildung 7.12 zeigt die Dehnungen des Laborversuchs für System LP I, mit einer Exzentrizität  $e=+10$  mm bei einer Kraftaufbringung von 400 kN. Hierbei befinden sich die DMS 1-5 innenseitig am Steg und der DMS 6 außenseitig am Steg. Zusätzlich wird die Kurve aus der Mercury-Auswertung in grün angegeben, die zusätzlich Ergebnisse an der Außenseite des Steges angibt. Des Weiteren sind die FEM-Kurven von Modell 3 eingezeichnet und der Vergleichswert der Norm.

Der Unterschied zwischen der Dehnung der FEM-Kurve und der Dehnung aus den Laborversuchen beträgt circa 0,0165 % (an der Stelle  $x=0$  mm, außenseitig abgegriffen). Dies entspricht einer Abweichung zum Laborversuch von 26 %. Der Wert, der bei den Laborversuchen mit der Mercury-Methode gemessen wurde, ist allerdings deutlich ähnlicher zu dem Wert der mit FEM ermittelt wurde. Innenseitig weisen die Werte zwischen FEM-Berechnung und Laborversuch ähnliche Abweichungen der Dehnungen auf. Man muss allerdings auch hier ergänzen, dass die Tendenz richtig ist.

Als Änderung zu Modell 2 kann man hier deutlich erkennen, dass die FEM-Kurven an der Stelle  $x=0$  mm einen größeren Abstand zu den Versuchsergebnissen aufweisen. Im Modell 2 waren die Kurven sehr eng beieinander, hier weisen sie einen maximalen Unterschied von circa 0,048 % auf. Zusätzlich hat sich die FEM-Kurve außenseitig am Steg der Mercury-Kurve angenähert.

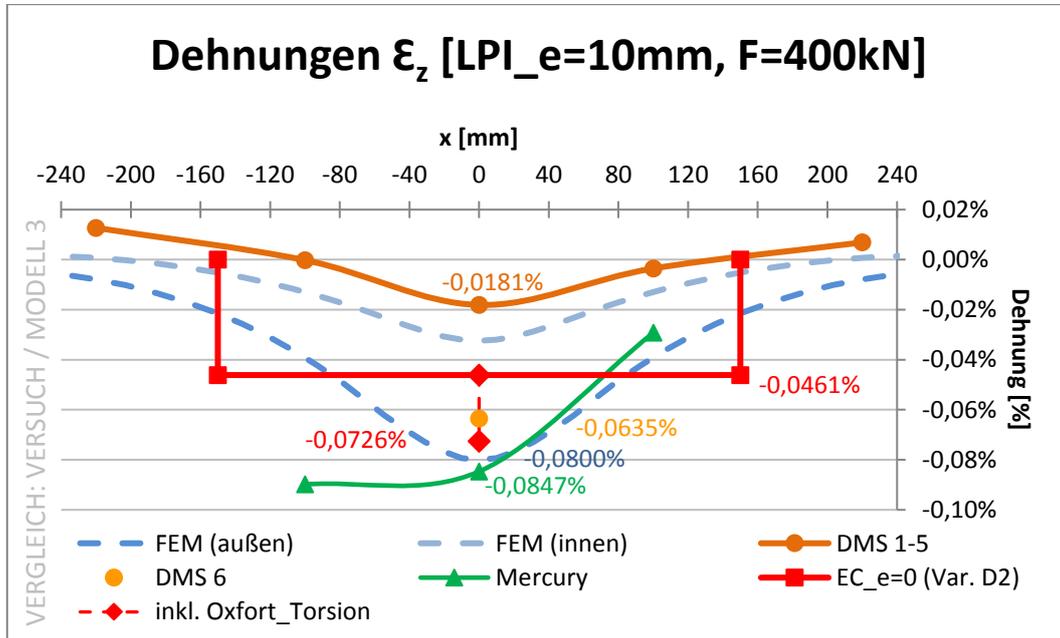


Abbildung 7.12: Dehnungsdiagramm LP I, mit Exzentrizität  $e=+10$  mm

### 7.1.2.3 System LP I, mit Exzentrizität $e=+20$ mm

Das nachfolgende Diagramm in Abbildung 7.13 zeigt die Dehnungen des Laborversuchs für System LP I, mit einer Exzentrizität  $e=+20$  mm bei einer Kraftaufbringung von 400 kN. Hierbei befinden sich die DMS 1-5 innenseitig am Steg und der DMS 6 außenseitig am Steg. Zusätzlich wird die Kurve aus der Mercury-Auswertung in grün angegeben, die zusätzlich Ergebnisse an der Außenseite des Steges angibt. Des Weiteren sind die FEM-Kurven von Modell 3 eingezeichnet und der Vergleichswert der Norm.

Der Unterschied zwischen der Dehnung der FEM-Kurve und der Dehnung aus den Laborversuchen beträgt circa 0,0143 % (an der Stelle  $x=0$  mm, außenseitig abgegriffen). Dies entspricht einer Abweichung zum Laborversuch von 18 %. Der Wert, der bei den Laborversuchen mit der Mercury-Methode gemessen wurde, ist allerdings beinahe gleich zu dem Wert der mit DMS ermittelt wurde. Innenseitig weisen die Werte zwischen FEM-Berechnung und Laborversuch ähnliche Abweichungen der Dehnungen auf. Man muss allerdings auch hier ergänzen, dass die Tendenz richtig ist. Der Wert der Norm, einschließlich der Oxfort-Torsion, liegt außerhalb der maximalen Ergebnisse, sowohl der FEM-, als auch der Versuchsergebnisse.

Als Änderung zu Modell 2 kann man hier deutlich erkennen, dass die FEM-Kurven an der Stelle  $x=0$  mm einen größeren Abstand aufweisen. Im Modell 2 waren die Kurven sehr eng beieinander, hier weisen sie einen maximalen Unterschied von circa 0,074 % auf. Zusätzlich liegen die Mercury-Kurve und der Wert des DMS 6 sehr knapp zusammen.

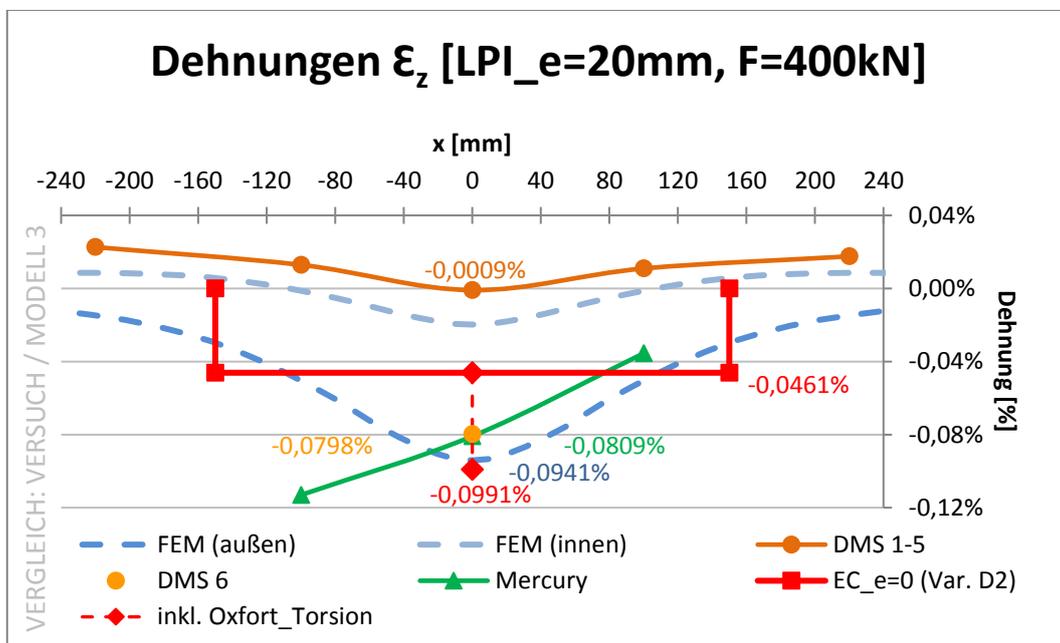


Abbildung 7.13: Dehnungsdiagramm LP I, Exzentrizität  $e=+20$  mm

#### 7.1.2.4 System LP I, mit Exzentrizität $e=+30$ mm

Das nachfolgende Diagramm in Abbildung 7.14 zeigt die Dehnungen des Laborversuchs für das System LP I, mit einer Exzentrizität  $e=+30$  mm bei einer Kraftaufbringung von 300 kN. Hierbei befinden sich die DMS 1-5 innenseitig am Steg und der DMS 6 außenseitig am Steg. Zusätzlich wird die Kurve aus der Mercury-Auswertung in grün angegeben, die zusätzlich Ergebnisse an der Außenseite des Steges angibt. Des Weiteren sind die FEM-Kurven von Modell 3 eingezeichnet und der Vergleichswert der Norm.

Der Unterschied zwischen der Dehnung der FEM-Kurve und der Dehnung aus den Laborversuchen beträgt circa 0,0129 % (an der Stelle  $x=0$  mm, außenseitig abgegriffen). Dies entspricht einer Abweichung zum Laborversuch von 19 %. Innenseitig weisen die Werte zwischen FEM-Berechnung und Laborversuch ähnliche Abweichungen der Dehnungen auf. Man muss allerdings auch hier ergänzen, dass die Tendenz richtig ist. Der Wert der Norm, einschließlich der Oxford-Torsion, liegt außerhalb der maximalen Ergebnisse, sowohl der FEM-, als auch der Versuchsergebnisse.

Als Änderung zu Modell 2 kann man hier deutlich erkennen, dass die FEM-Kurven an der Stelle  $x=0$  mm einen größeren Abstand aufweisen. Im Modell 2 waren die Kurven sehr eng beieinander, hier weisen sie einen maximalen Unterschied von circa 0,075 % auf. Zusätzlich liegen die Mercury-Kurve und der Wert des DMS 6 sehr knapp zusammen.

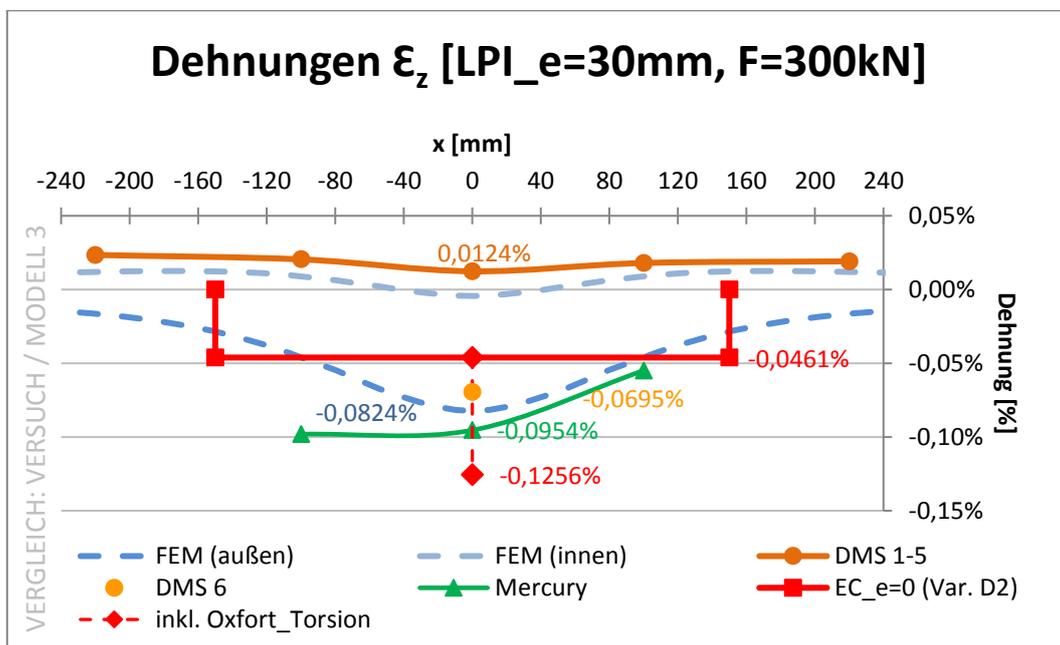


Abbildung 7.14: Dehnungsdiagramm LP I, Exzentrizität  $e=+30$  mm

### 7.1.2.5 System LP I, mit Exzentrizität $e=-10$ mm

Das nachfolgende Diagramm in Abbildung 7.15 zeigt die Dehnungen des Laborversuchs des Systems LP I, mit einer Exzentrizität  $e=-10$  mm bei einer Kraftaufbringung von 400 kN. Hierbei befinden sich die DMS 1-5 innenseitig am Steg und der DMS 6 außenseitig am Steg. Zusätzlich wird die Kurve aus der Mercury-Auswertung in grün angegeben, die zusätzlich Ergebnisse an der Außenseite des Steges angibt. Des Weiteren sind die FEM-Kurven von Modell 3 eingezeichnet und der Vergleichswert der Norm.

Der Unterschied zwischen der Dehnung der FEM-Kurve und der Dehnung aus den Laborversuchen beträgt circa 0,0105 % (an der Stelle  $x=0$  mm, innenseitig abgegriffen). Dies entspricht einer Abweichung zum Laborversuch von 22 %. Außenseitig weisen die Werte zwischen FEM-Berechnung und Laborversuch ähnliche Abweichungen der Dehnungen auf. Der Wert, der bei den Laborversuchen mit der Mercury-Methode gemessen wurde, ist allerdings deutlich ähnlicher zu dem Wert der mit FEM ermittelt wurde. Man muss allerdings auch hier ergänzen, dass die Tendenz richtig ist. Der Wert der Norm, einschließlich der Oxford-Torsion, liegt außerhalb der maximalen Ergebnisse, sowohl der FEM-, als auch der Versuchsergebnisse.

Als Änderung zu Modell 2 kann man hier deutlich erkennen, dass die FEM-Kurven an der Stelle  $x=0$  mm einen kleineren Abstand aufweisen. Im Modell 2 waren die Kurven weiter auseinander, hier weisen sie einen maximalen Unterschied von circa 0,0001 % auf. Zusätzlich erwähnenswert ist, dass die Mercury-Kurve und der Wert des DMS 6 sehr weit auseinander liegen.

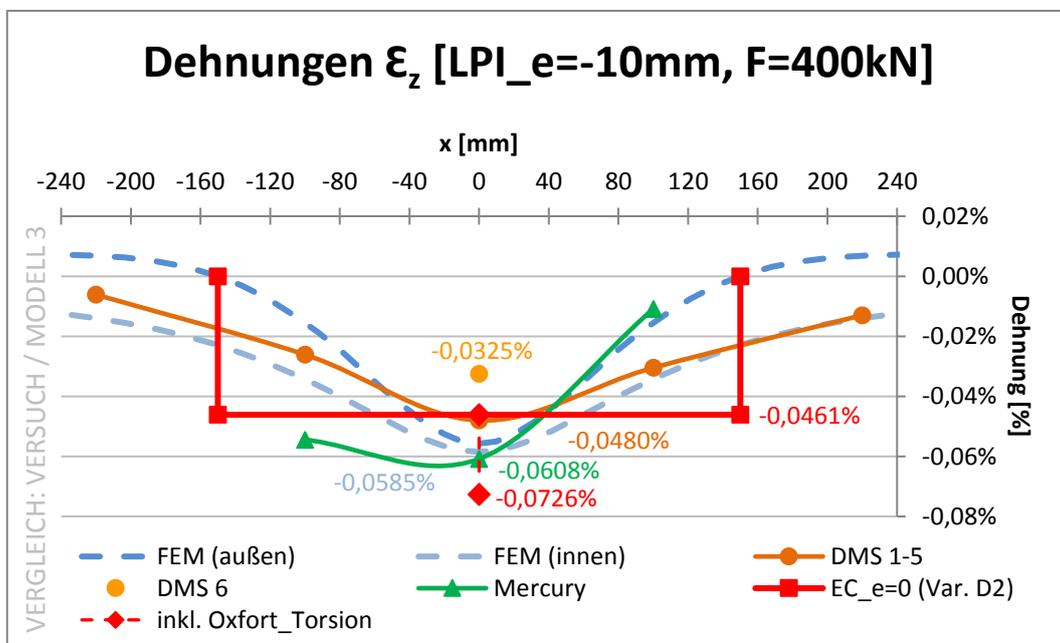


Abbildung 7.15: Dehnungsdiagramm LP I, Exzentrizität  $e=-10$  mm

### 7.1.2.6 System LP III, ohne Exzentrizität

Das nachfolgende Diagramm in Abbildung 7.16 zeigt die Dehnungen des Laborversuchs für System LP III, ohne Exzentrizität bei einer Kraftaufbringung von 400 kN. Hierbei befinden sich die DMS 1-5 innenseitig am Steg und der DMS 6 außenseitig am Steg. Zusätzlich wird die Kurve aus der Mercury-Auswertung in grün angegeben, die zusätzlich Ergebnisse an der Außenseite des Steges angibt. Des Weiteren sind die FEM-Kurven von Modell 3 eingezeichnet und der Vergleichswert der Norm.

Man kann erkennen, dass die FEM-Kurve und die Ergebnisse aus den Laborversuchen Abweichungen um circa 0,0153 % (an der Stelle  $x=0$  mm, außenseitig abgegriffen) aufweisen. Dies entspricht einer Abweichung zum Laborversuch von 29 %. Der Wert, der bei den Laborversuchen mit der Mercury-Methode gemessen wurde, ist allerdings noch weiter entfernt von dem Wert, der mit FEM ermittelt wurde. Innenseitig weisen die Werte zwischen FEM-Berechnung und Laborversuch ähnliche Abweichungen auf. Man muss allerdings auch hier ergänzen, dass die Tendenz richtig ist.

Als Änderung zu Modell 2 kann man hier deutlich erkennen, dass die FEM-Kurven an der Stelle  $x=0$  mm einen größeren Abstand aufweisen. Im Modell 2 waren die Kurven sehr eng beieinander, hier weisen sie einen maximalen Unterschied von circa 0,023 % auf.

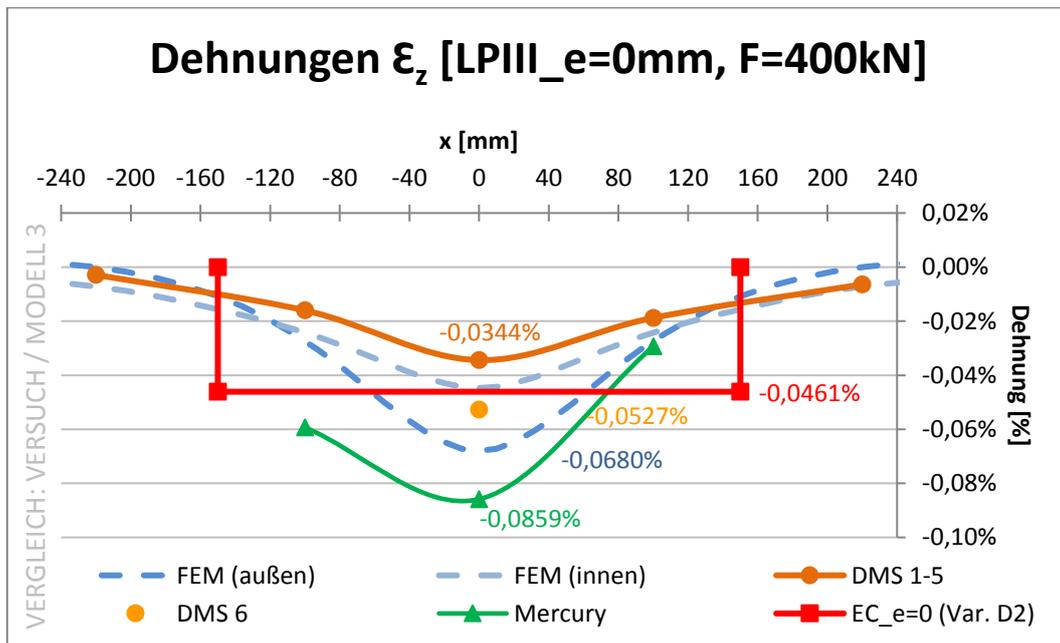


Abbildung 7.16: Dehnungsdiagramm LP III, ohne Exzentrizität

### 7.1.2.7 System LP III, mit Exzentrizität $e=+10$ mm

Das nachfolgende Diagramm in Abbildung 7.17 zeigt die Dehnungen des Laborversuchs für das System LP III, mit einer Exzentrizität  $e=+10$  mm bei einer Kraftaufbringung von 400 kN. Hierbei befinden sich die DMS 1-5 innenseitig am Steg und der DMS 6 außenseitig am Steg. Zusätzlich wird die Kurve aus der Mercury-Auswertung in grün angegeben, die zusätzlich Ergebnisse an der Außenseite des Steges angibt. Des Weiteren sind die FEM-Kurven von Modell 3 eingezeichnet und der Vergleichswert der Norm.

Der Unterschied zwischen der Dehnung der FEM-Kurve und der Dehnung aus den Laborversuchen beträgt circa 0,013 % (an der Stelle  $x=0$  mm, außenseitig abgegriffen). Dies entspricht einer Abweichung zum Laborversuch von 21 %. Der Wert, der bei den Laborversuchen mit der Mercury-Methode gemessen wurde, ist allerdings niedriger als der Wert, der mit FEM ermittelt wurde. Der Unterschied der Dehnungen beläuft sich hier auf circa 0,019 %. Innenseitig weisen die Werte zwischen FEM-Berechnung und Laborversuch ähnliche Abweichungen der Dehnungen auf. Man muss allerdings auch hier ergänzen, dass die Tendenz richtig ist.

Als Änderung zu Modell 2 kann man hier deutlich erkennen, dass die FEM-Kurven an der Stelle  $x=0$  mm einen größeren Abstand aufweisen. Im Modell 2 waren die Kurven sehr eng beieinander, hier weisen sie einen maximalen Unterschied von circa 0,039 % auf. Der Wert der Norm, einschließlich der Oxford-Torsion, liegt oberhalb der minimalen Kurven.

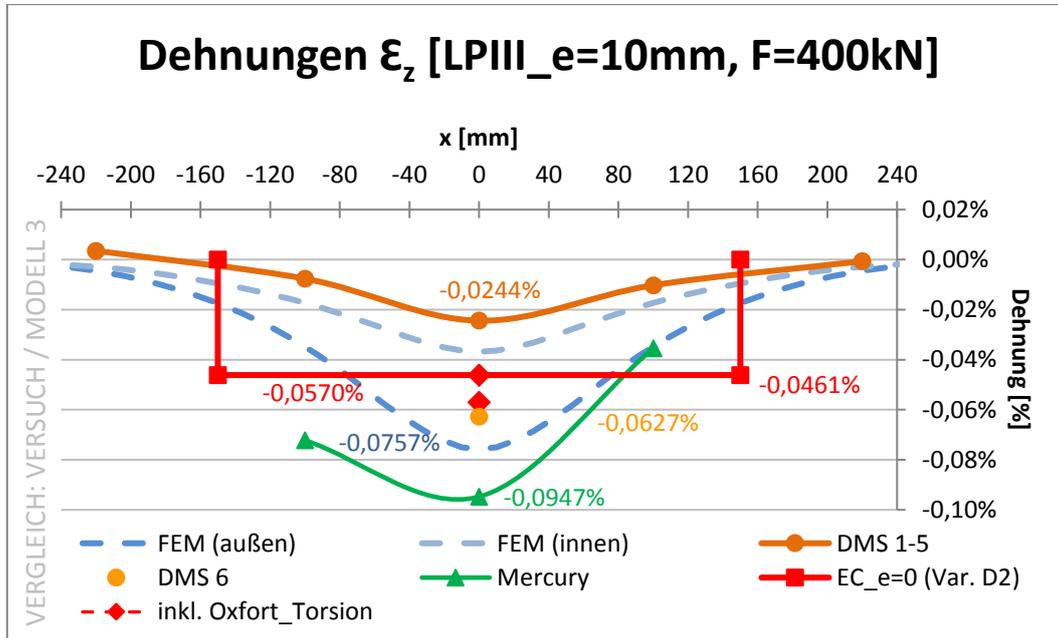


Abbildung 7.17: Dehnungsdiagramm LP III, Exzentrizität  $e=+10$  mm

### 7.1.2.8 System LP III, mit Exzentrizität $e=+20$ mm

Das nachfolgende Diagramm in Abbildung 7.18 zeigt die Dehnungen des Laborversuchs des Systems LP III, mit einer Exzentrizität  $e=+20$  mm bei einer Kraftaufbringung von 400 kN. Hierbei befinden sich die DMS 1-5 innenseitig am Steg und der DMS 6 außenseitig am Steg. Zusätzlich wird die Kurve aus der Mercury-Auswertung in grün angegeben, die zusätzlich Ergebnisse an der Außenseite des Steges angibt. Des Weiteren sind die FEM-Kurven von Modell 3 eingezeichnet und der Vergleichswert der Norm.

Der Unterschied zwischen der Dehnung der FEM-Kurve und der Dehnung aus den Laborversuchen beträgt circa 0,0125 % (an der Stelle  $x=0$  mm, außenseitig abgegriffen). Dies entspricht einer Abweichung zum Laborversuch von 17 %. Der Wert, der bei den Laborversuchen mit der Mercury-Methode gemessen wurde, ist allerdings niedriger als der Wert, der mit FEM ermittelt wurde. Der Unterschied beläuft sich hier auf circa 0,0122 %. Innen-seitig weisen die Werte zwischen FEM-Berechnung und Laborversuch ähnliche Abweichungen der Dehnungen auf. Man muss allerdings auch hier ergänzen, dass die Tendenz richtig ist.

Als Änderung zu Modell 2 kann man hier deutlich erkennen, dass die FEM-Kurven an der Stelle  $x=0$  mm einen größeren Abstand aufweisen. Im Modell 2 waren die Kurven sehr eng beieinander, hier weisen sie einen maximalen Unterschied von circa 0,058 % auf. Der Wert der Norm, einschließlich der Oxford-Torsion, liegt oberhalb der minimalen Kurven.

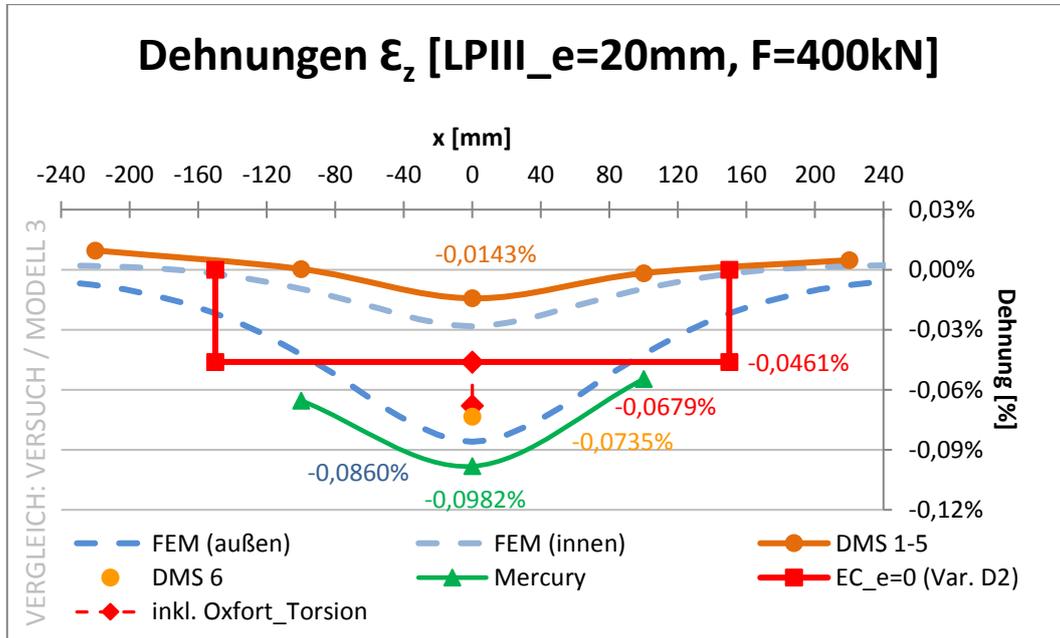


Abbildung 7.18: Dehnungsdiagramm LP III, Exzentrizität  $e=+20$  mm

### 7.1.2.9 System LP III, mit Exzentrizität $e=+30$ mm

Das nachfolgende Diagramm in Abbildung 7.19 zeigt die Dehnungen des Laborversuchs für das System LP III, mit einer Exzentrizität  $e=+30$  mm bei einer Kraftaufbringung von 400 kN. Hierbei befinden sich die DMS 1-5 innenseitig am Steg und der DMS 6 außenseitig am Steg. Zusätzlich wird die Kurve aus der Mercury-Auswertung in grün angegeben, die zusätzlich Ergebnisse an der Außenseite des Steges angibt. Des Weiteren sind die FEM-Kurven von Modell 3 eingezeichnet und der Vergleichswert der Norm.

Der Unterschied zwischen der Dehnung der FEM-Kurve und der Dehnung aus den Laborversuchen beträgt circa 0,013 % (an der Stelle  $x=0$  mm, außenseitig abgegriffen). Dies entspricht einer Abweichung zum Laborversuch von 16 %. Der Wert, der bei den Laborversuchen mit der Mercury-Methode gemessen wurde, ist allerdings niedriger als der Wert, der mit FEM ermittelt wurde. Der Unterschied beläuft sich hier auf circa 0,0127 %. Innen-seitig weisen die Werte zwischen FEM-Berechnung und Laborversuch ähnliche Abweichungen der Dehnungen auf. Man muss allerdings auch hier ergänzen, dass die Tendenz richtig ist.

Als Änderung zu Modell 2 kann man hier deutlich erkennen, dass die FEM-Kurven an der Stelle  $x=0$  mm einen größeren Abstand aufweisen. Im Modell 2 waren die Kurven sehr eng beieinander, hier weisen sie einen maximalen Unterschied von circa 0,079 % auf. Der Wert der Norm, einschließlich der Oxford-Torsion, liegt oberhalb der minimalen Kurven.

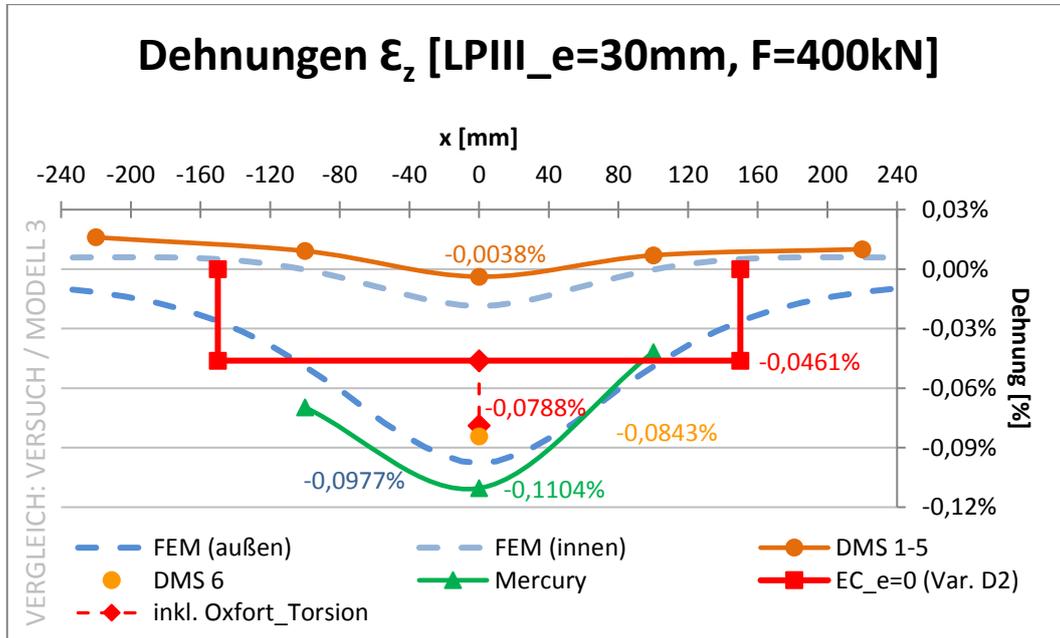


Abbildung 7.19: Dehnungsdiagramm LP III, Exzentrizität  $e=+30$  mm

### 7.1.2.10 System LP III, mit Exzentrizität $e=-10$ mm

Das nachfolgende Diagramm in Abbildung 7.20 zeigt die Dehnungen des Laborversuchs für das System LP III, mit einer Exzentrizität  $e=-10$  mm bei einer Kraftaufbringung von 400 kN. Hierbei befinden sich die DMS 1-5 innenseitig am Steg und der DMS 6 außenseitig am Steg. Zusätzlich wird die Kurve aus der Mercury-Auswertung in grün angegeben, die zusätzlich Ergebnisse an der Außenseite des Steges angibt. Des Weiteren sind die FEM-Kurven von Modell 3 eingezeichnet und der Vergleichswert der Norm.

Der Unterschied zwischen der Dehnung der FEM-Kurve und der Dehnung aus den Laborversuchen beträgt circa 0,0205 % (an der Stelle  $x=0$  mm, außenseitig abgegriffen). Dies entspricht einer Abweichung zum Laborversuch von 52 %. Innenseitig weisen die Werte zwischen FEM-Berechnung und Laborversuch geringere Abweichungen auf. Der Wert, der bei den Laborversuchen mit der Mercury-Methode gemessen wurde, ist allerdings deutlich ähnlicher zu dem Wert der mit FEM ermittelt wurde. Man muss allerdings auch hier ergänzen, dass die Tendenz richtig ist. Der Wert der Norm, einschließlich der Oxfort-Torsion, liegt außerhalb der maximalen Ergebnisse, sowohl der FEM-, als auch der Versuchsergebnisse.

Als Änderung zu Modell 2 kann man hier deutlich erkennen, dass die FEM-Kurven an der Stelle  $x=0$  mm einen kleineren Abstand aufweisen. Im Modell 2 waren die Kurven weiter auseinander, hier weisen sie einen maximalen Unterschied von circa 0,0001 % auf. Zusätzlich erwähnenswert ist, dass die Mercury-Kurve und der Wert des DMS 6 verhältnismäßig weit auseinander liegen.

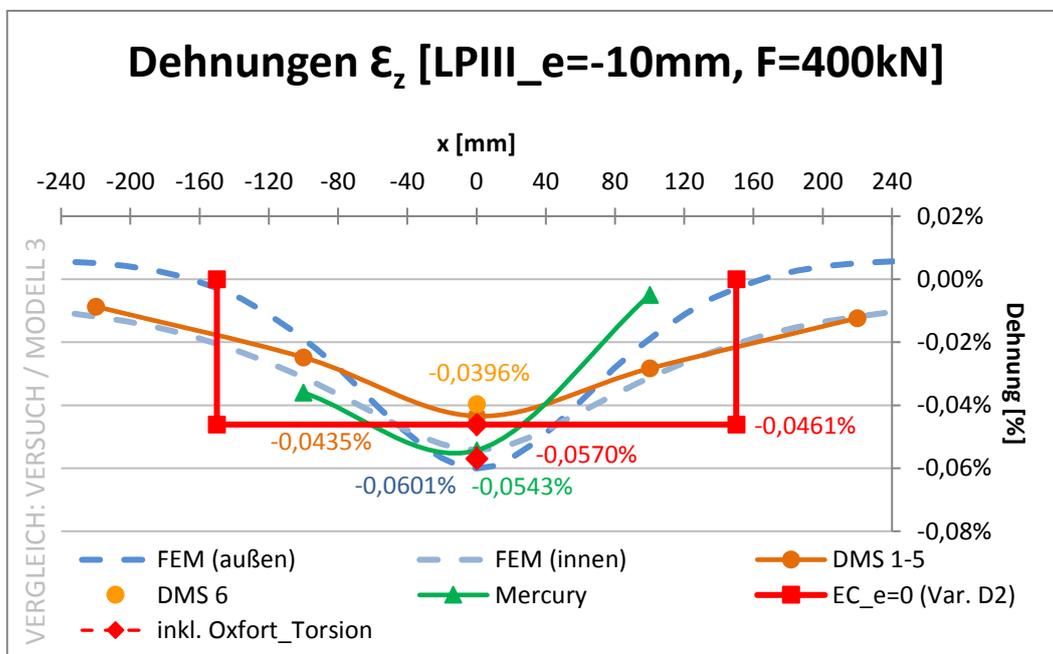


Abbildung 7.20: Dehnungsdiagramm LP III, Exzentrizität  $e=-10$  mm

## 7.2 Ergebnisvergleich aus den einzelnen Modellen anhand von LP I e=+20 mm

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den jeweiligen Modellen miteinander verglichen. Dazu wird das System LP I, mit einer Lasteinleitungsexzentrizität von e=+20 mm, herangezogen.

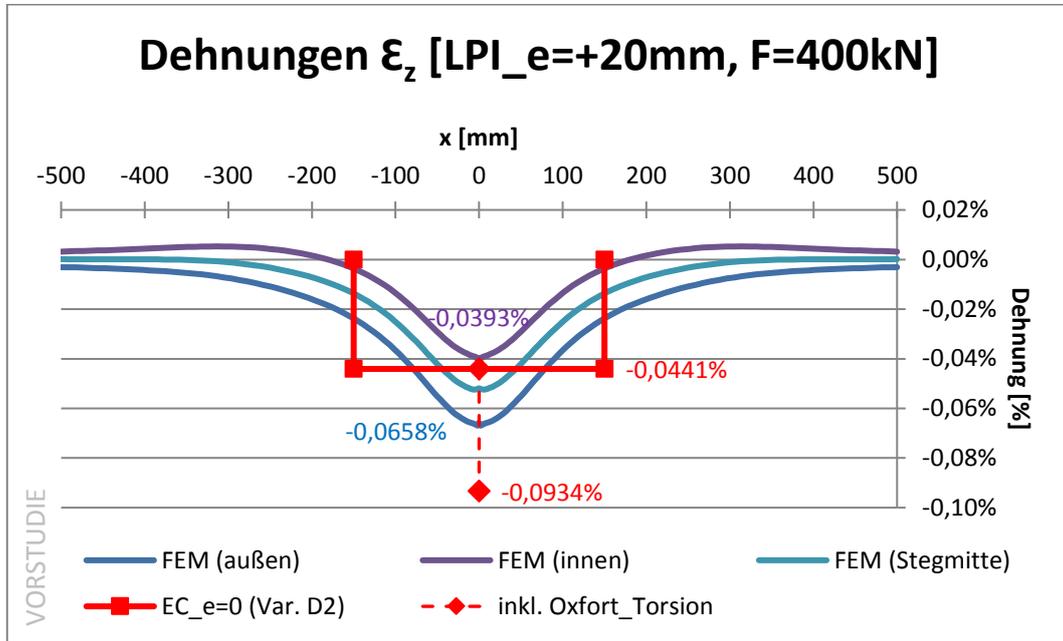


Abbildung 7.21: Dehnungsdiagramm Vorstudie (LP I, e=+20 mm)

In der Vorstudie wurden die Normergebnisse mit der Schiene A 75 berechnet. Dies ändert sich zu Modell 0 (nachfolgend gezeigt in Abbildung 7.22), indem der Betrag der Dehnungen der FEM-Kurven größer wird. Es ändert sich sowohl der zentrische, als auch der exzentrische Anteil.

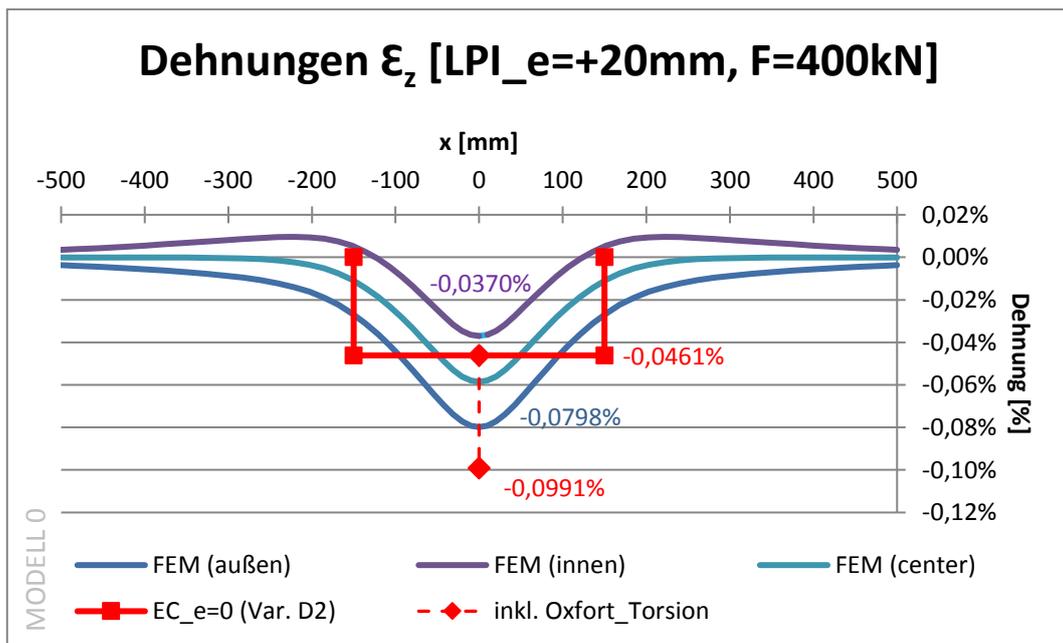


Abbildung 7.22: Dehnungsdiagramm Modell 0 (LP I, e=+20 mm)

Zwischen Modell 0 und Modell 1 ändert sich die Lage der Schiene. Dies hat einen sehr geringen Einfluss auf die Ergebnisse, allerdings wird der Betrag der Werte wieder minimal größer. Hier ändert sich offenbar nur der Biegeanteil.

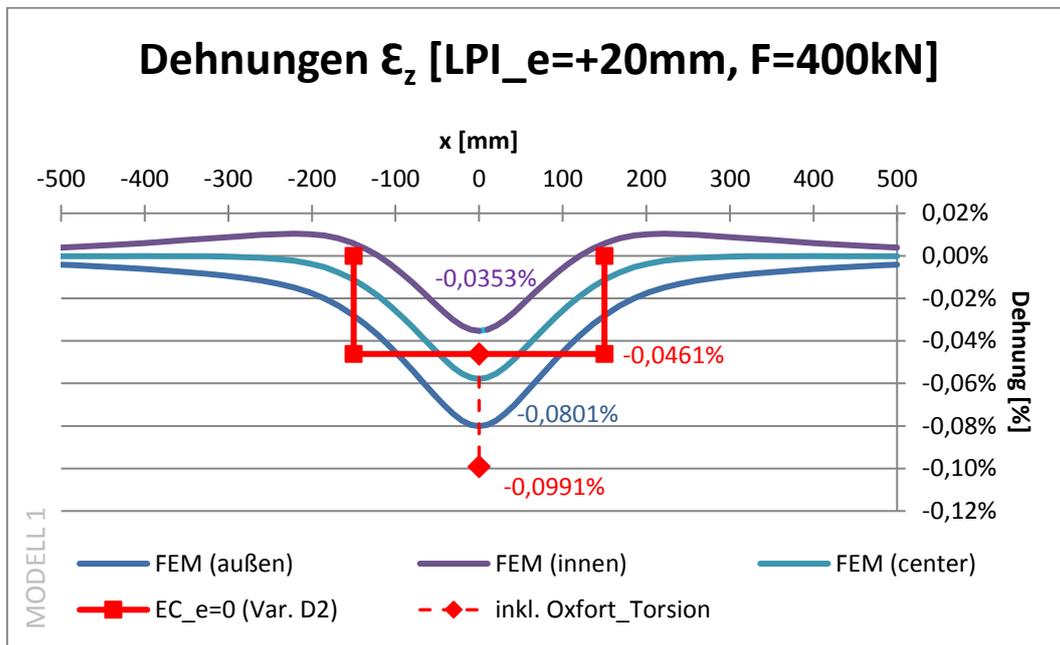


Abbildung 7.23: Dehnungsdiagramm Modell 1 (LP I, e=+20 mm)

Bei Modell 2 kommt außenseitig an der Stegunterkante eine Schweißnaht hinzu. Dies ändert die Ergebnisse, indem die Dehnungen, die außenseitig am Steg abgegriffen werden, betragsmäßig größer werden und die Dehnungen innenseitig am Steg kleiner werden.

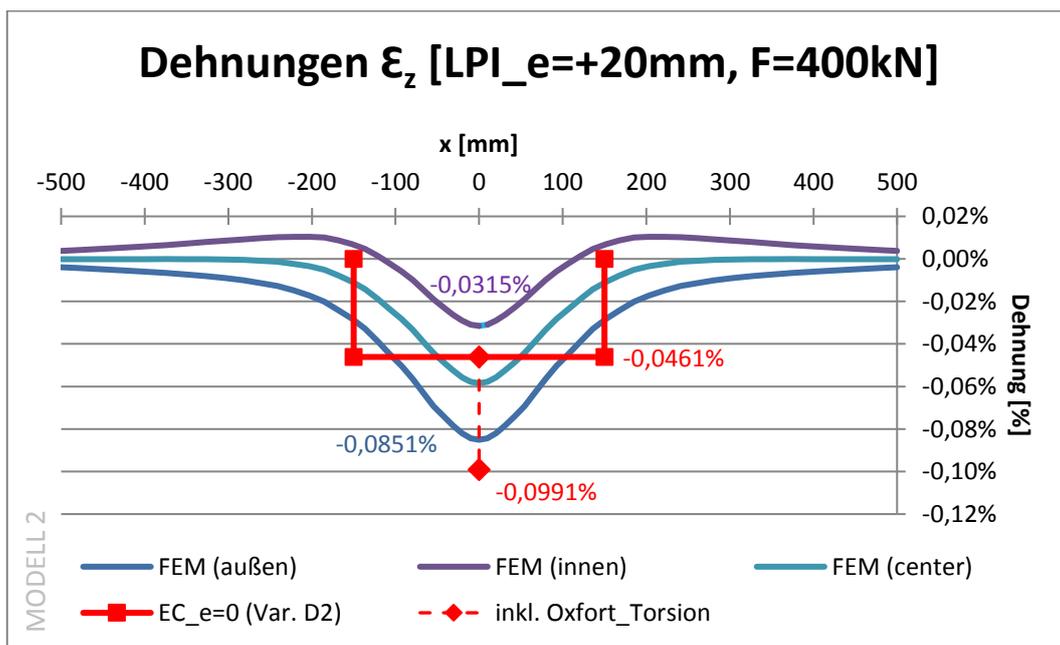


Abbildung 7.24: Dehnungsdiagramm Modell 2 (LP I, e=+20 mm)

Bei Modell 3 kommt zusätzlich noch ein Spalt innenseitig hinzu. Dies hat zur Folge, dass der Unterschied zwischen den Dehnungen innen- und außenseitig am Steg noch deutlicher wird und die Dehnungen außenseitig am Steg betragsmäßig größer und die innenseitig am Steg betragsmäßig kleiner werden.

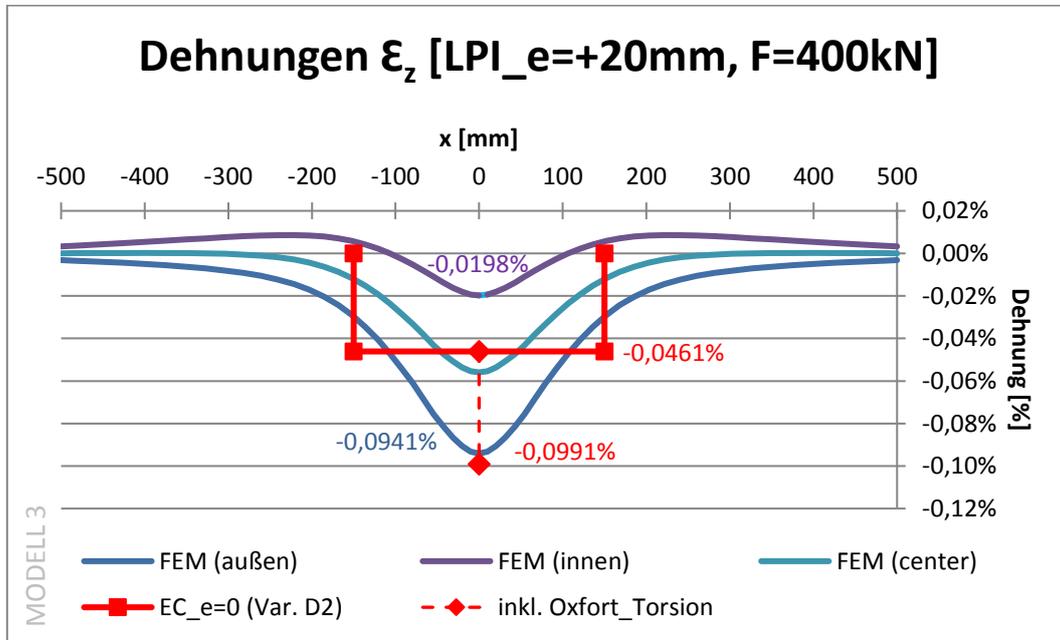


Abbildung 7.25: Dehnungsdiagramm Modell 3 (LP I,  $e=+20\text{ mm}$ )

Nachfolgend zeigt eine Übersichtstabelle die genauen Werte im Vergleich:

Tabelle 7.1: Übersicht über die minimalen Dehnungswerte der einzelnen Modelle, System LP I,  $F_z = 400\text{ kN}$

|       | VORSTUDIE | MODELL 0  | MODELL 1  | MODELL 2  | MODELL 3  |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| außen | -0,0658 % | -0,0798 % | -0,0801 % | -0,0851 % | -0,0941 % |
| innen | -0,0393 % | -0,0370 % | -0,0353 % | -0,0315 % | -0,0198 % |

Besonders zwischen der Vorstudie und dem Modell 0 erkennt man deutliche Unterschiede. Die Ergebnisse von Modell 0, Modell 1 und Modell 2 liegen eng beieinander. Zwischen Modell 2 und Modell 3 gibt es wieder große Abweichungen, was auf die Implementierung des Spalts zurückzuführen ist. Dieser Spalt innenseitig im Steg hat den Einfluss, dass die Last eher außenseitig eingebracht wird und dadurch außenseitig am Steg größere Dehnungen hervorruft. Die Innenseite des Stegs bekommt dadurch weniger hohe Spannungen und in Folge geringere Dehnungen.

Nachstehend sind die beiden Dehnungsdiagramme in Abbildung 7.26 und Abbildung 7.27 für den Vergleich zwischen FEM, Mercury, Dehnmessstreifen und der Norm dargestellt.

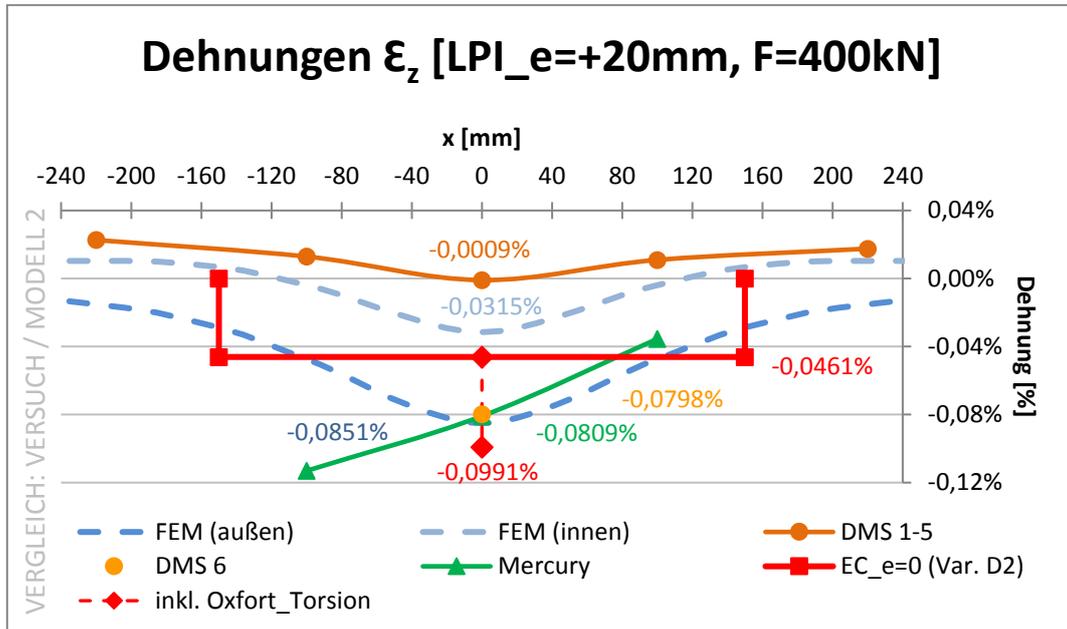


Abbildung 7.26: Dehnungsdiagramm LP I (e=+20 mm) Vergleich Versuch zu Modell 2

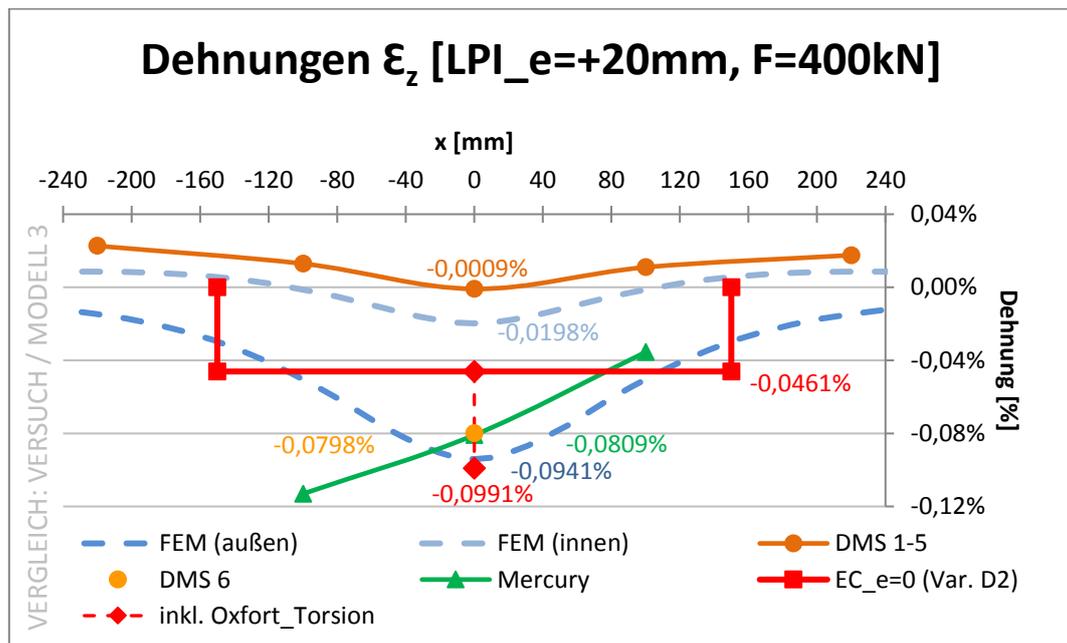


Abbildung 7.27: Dehnungsdiagramm LP I (e=+20 mm) Vergleich Versuch zu Modell 3

Bei beiden Diagrammen stimmen die FEM-Werte mit den Werten aus den Versuchen nicht deutlich überein. Die Tendenz stimmt jedoch in beiden Fällen. Allerdings kann man klar erkennen, dass die Übereinstimmung bei Modell 2 außenseitig am Steg größer ist und bei Modell 3 innenseitig am Steg. Dies rührt daher, dass durch die Schweißnaht, die das Modell 2 beinhaltet, eine Steifigkeit an der Außenseite des Stegs in das Modell eingebracht

wird. Bei Modell 3 wird durch die Modellierung des Spalts eine Weichheit eingebracht. Dies hat den soeben genannten Einfluss auf die Ergebniswerte.

Nachfolgende Tabelle 7.2 zeigt noch einmal im Überblick die Dehnungswerte von Modell 2, Modell 3, den Dehnmessstreifen und dem Mercury-System.

Tabelle 7.2: Vergleich der minimalen Dehnungswerte FEM, DMS und Mercury

|       | <b>MODELL 2</b> | <b>MODELL 3</b> | <b>DMS</b> | <b>MERCURY</b> |
|-------|-----------------|-----------------|------------|----------------|
| außen | -0,0851 %       | -0,0941 %       | -0,0798 %  | -0,0809 %      |
| innen | -0,0315 %       | -0,0198 %       | -0,0009 %  |                |

### 7.3 Vergleich von System LP I zu System LP III

In diesem Kapitel wird ein Vergleich zwischen den Systemen LP I und LP III angestellt. Die besagten Systeme besitzen dieselben Abmessungen und Lagerungsbedingungen, allerdings befinden sich bei System LP I zwei Längssteifen je Seite im Kastenhohlraum. Der Vergleich wird anhand der FEM-Ergebnisse von Modell 3 durchgeführt.

#### 7.3.1 Ergebnisse ohne Exzentrizität

Nachfolgendes Diagramm in Abbildung 7.28 zeigt die Dehnungen für die Lastaufbringung ohne Exzentrizität für die Systeme LP I und LP III bei 400 kN. Wie man hier erkennen kann, überlappen sich die Kurven, das heißt die beiden Lastpositionen liefern nahezu idente Ergebnisse.

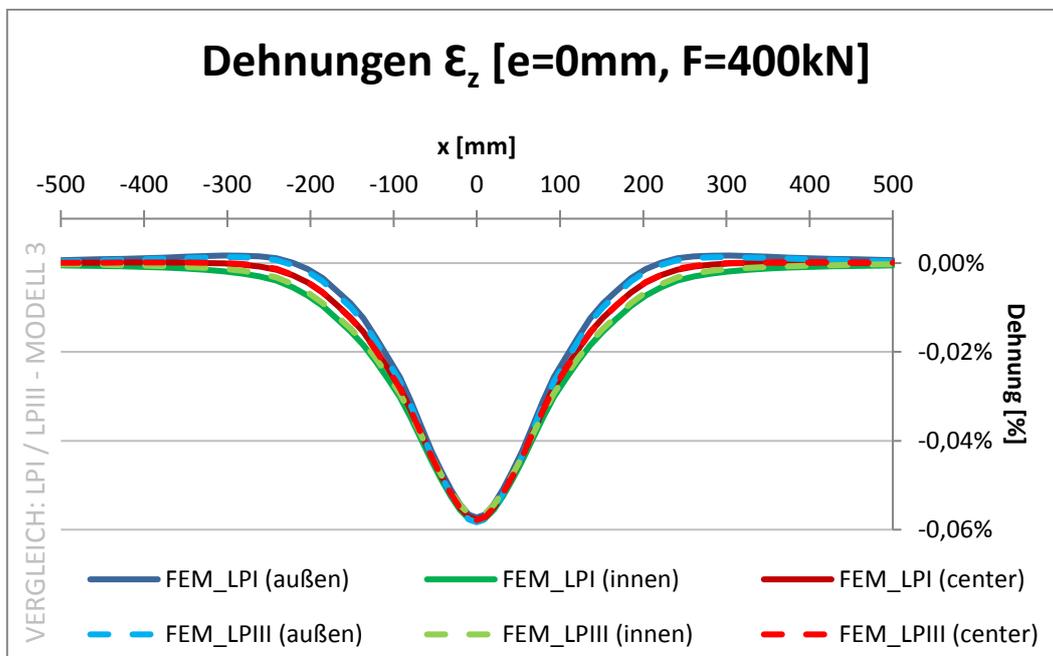


Abbildung 7.28: Dehnungsdiagramm; Vergleich LP I und LP III (e=0 mm)

Zusätzlich wurden für den Fall ohne Exzentrizität auch noch Berechnungen mit unendlich steifen Längssteifen durchgeführt. Damit dies realistisch mit der Software Abaqus implementiert werden konnte, wurden neue Randbedingungen eingefügt. Es wurden Linienlager entlang der Steifen eingegeben, die die Bedingung  $u_y = 0$  erfüllten. Hierbei ist y die Achse, die horizontal und in Richtung der Gurtebene liegt.

Das Ergebnis ist in den nachstehenden Diagrammen ersichtlich. Man erkennt deutlich, dass die Ergebniswerte für System LP I und System LP III sehr ähnlich verlaufen (siehe auch Diagramm in Abbildung 7.29). Die Kurven mittig im Steg sind für alle drei Berechnungen ident. Einen geringen Unterschied erkennt man allerdings, wenn man die Verläufe für außen- und innen-seitig am Steg und für innenseitig am Steg separat betrachtet.

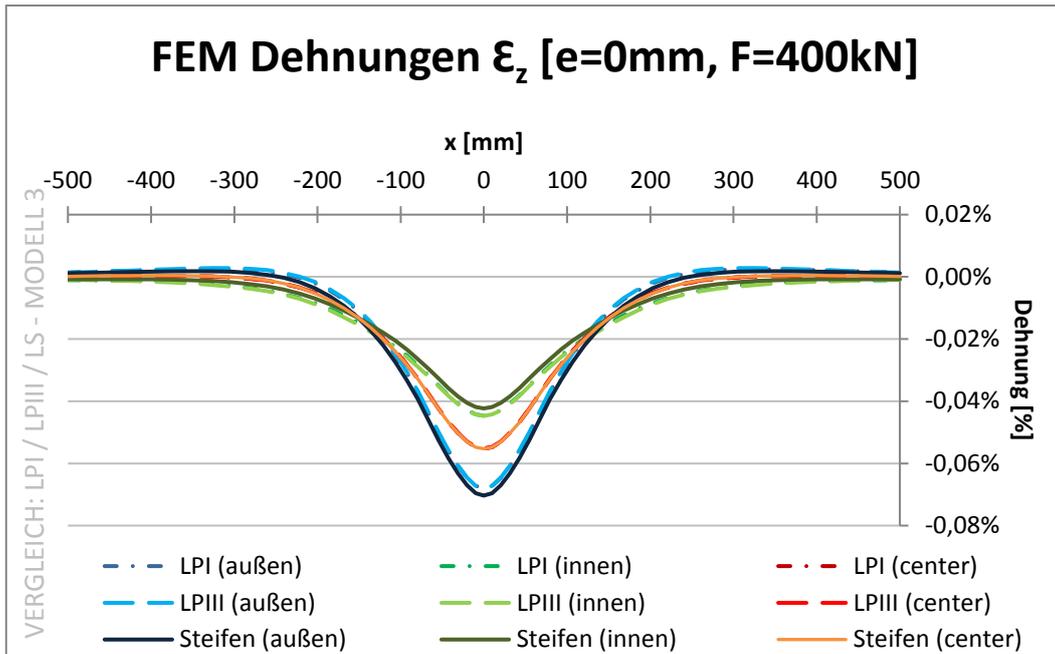


Abbildung 7.29: Dehnungsdiagramm; Vergleich mit unendlich steifen Längssteifen (e=0 mm)

Durch die FEM-Berechnung mit den unendlich steifen Längssteifen wurde der Ergebnisverlauf nicht grundlegend verändert. Selbst mit dieser zusätzlichen Randbedingung ändern sich die Dehnungen nur geringfügig. Zu beachten ist, dass sich die Dehnungen an der Stegaußenseite betragsmäßig vergrößern (siehe Abbildung 7.31) und an der Steginnen-seite betragsmäßig verkleinern (siehe Abbildung 7.30).

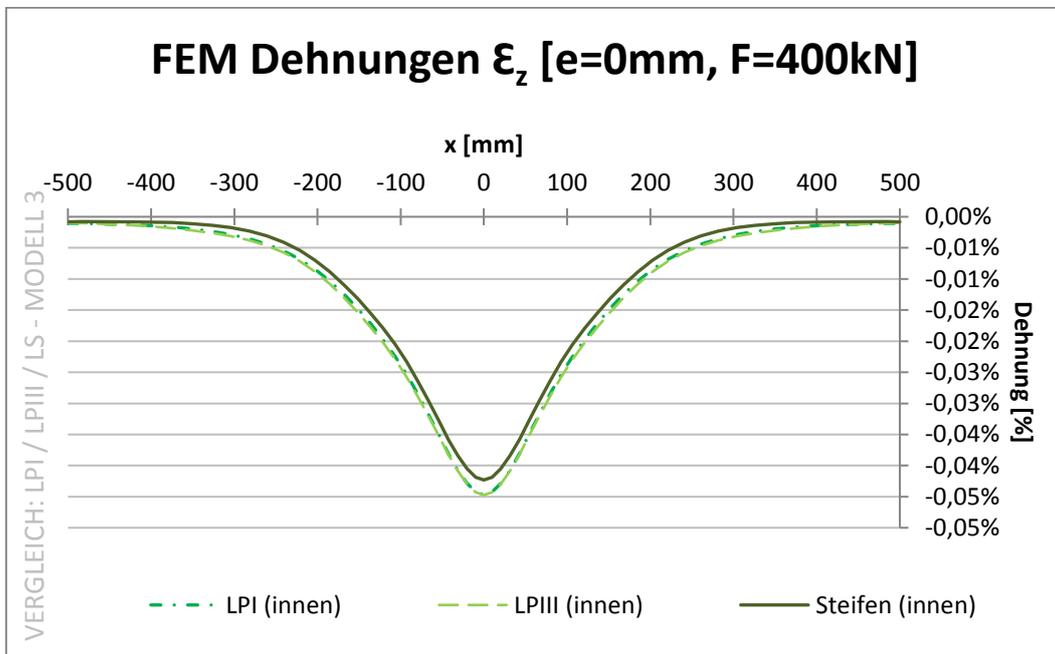


Abbildung 7.30: Dehnungsdiagramm; Vergleich innenseitig am Steg (e=0 mm)

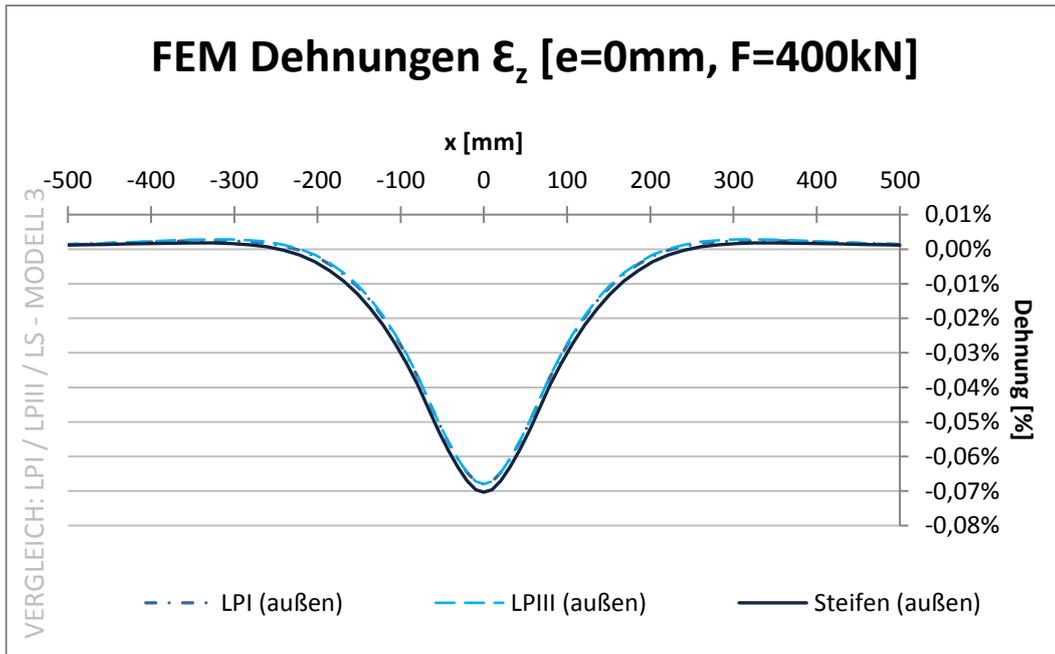


Abbildung 7.31: Dehnungsdiagramm; Vergleich außenseitig am Steg (e=0 mm)

Nachfolgend befindet sich ein Diagramm in Abbildung 7.32 mit dem Vergleich zwischen der Norm, der FEM-Aufbereitung (Modell 3) und der Versuchsauswertung. Erkennbar ist, dass die Systeme LP I und LP III kaum Unterschiede aufweisen und die Steifen demnach für den Fall ohne Exzentrizität keine Bedeutung haben. In dem nachfolgenden Diagramm liegen die Kurven FEM\_LPI (außen) und FEM\_LPIII (außen) deckungsgleich übereinander. Dasselbe gilt auch für die Kurven, die innenseitig am Steg abgegriffen wurden.

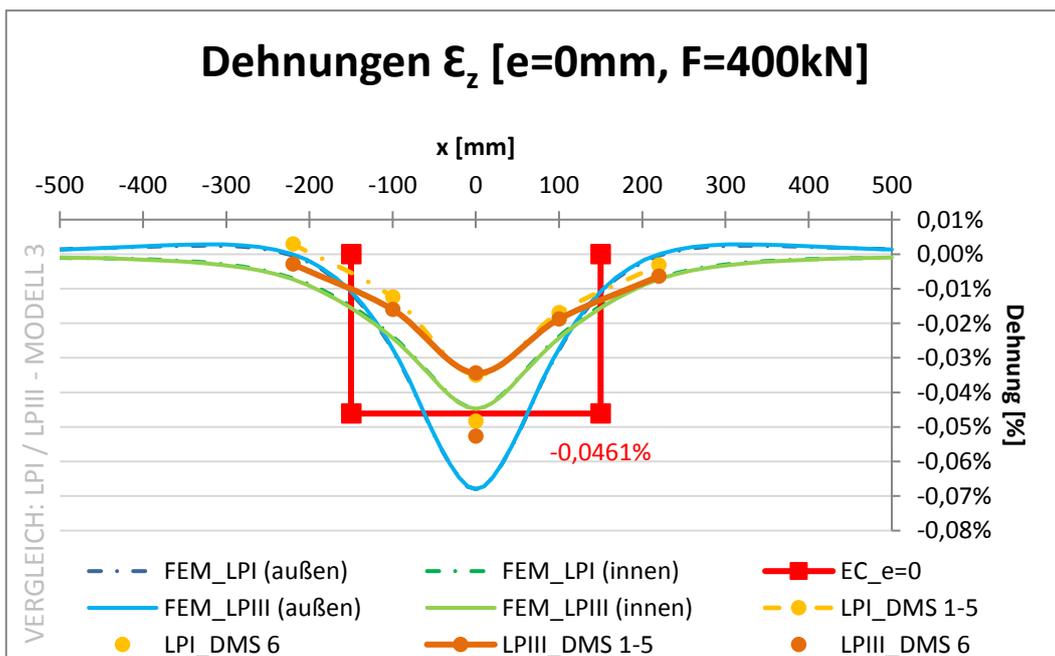


Abbildung 7.32: Vergleich Norm, FEM und Laborversuche für LP I und LP III (e=0 mm)

### 7.3.2 Ergebnisvergleich der Systeme LP I zu LP III mit Exzentrizität $e=+20$ mm

Abbildung 7.33 zeigt die Dehnungen für die Lastaufbringung mit einer Exzentrizität von  $e=+20$  mm für die Systeme LP I und LP III bei 400 kN. Man erkennt, dass sich die Kurven für die zentrisch im Steg abgegriffenen Werte überlappen. Die Kurven außenseitig und innenseitig am Steg verlaufen jeweils in einem ähnlichen Abstand zueinander.

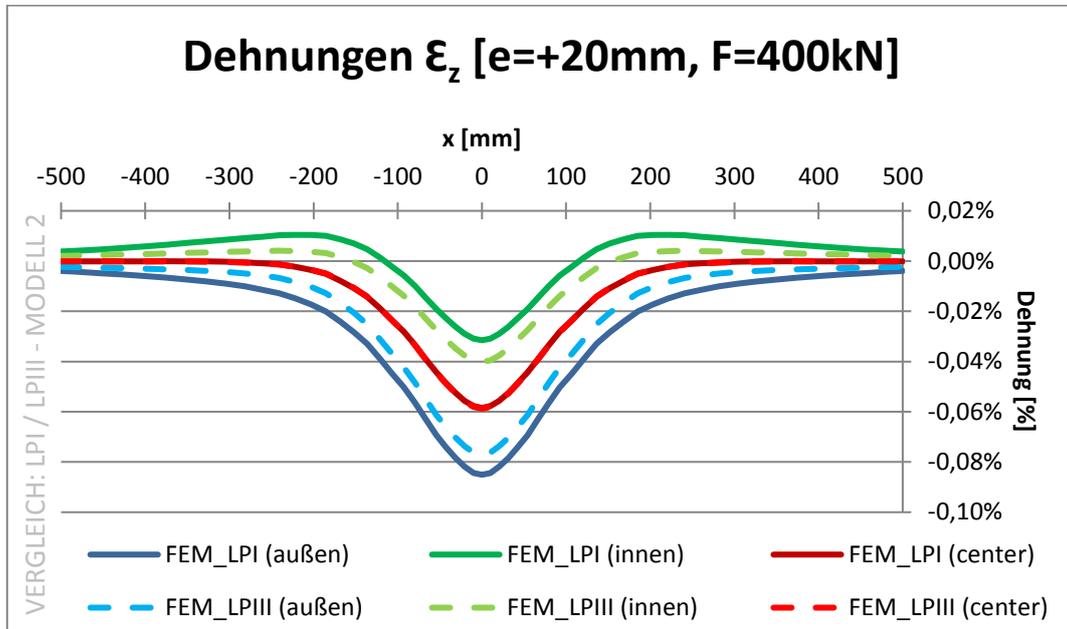


Abbildung 7.33: Dehnungsdiagramm; Vergleich LP I und LP III ( $e=+20$  mm)

Zusätzlich wurden auch Berechnungen mit unendlich steifen Längssteifen durchgeführt, was auch in den nachstehenden Diagrammen abgebildet ist. Man erkennt, dass die Werte für Stegaußen- und Steginnenseite beide zwischen den Werten von LP I und LP III liegen (Bereich zwischen  $x=\pm 100$  mm).

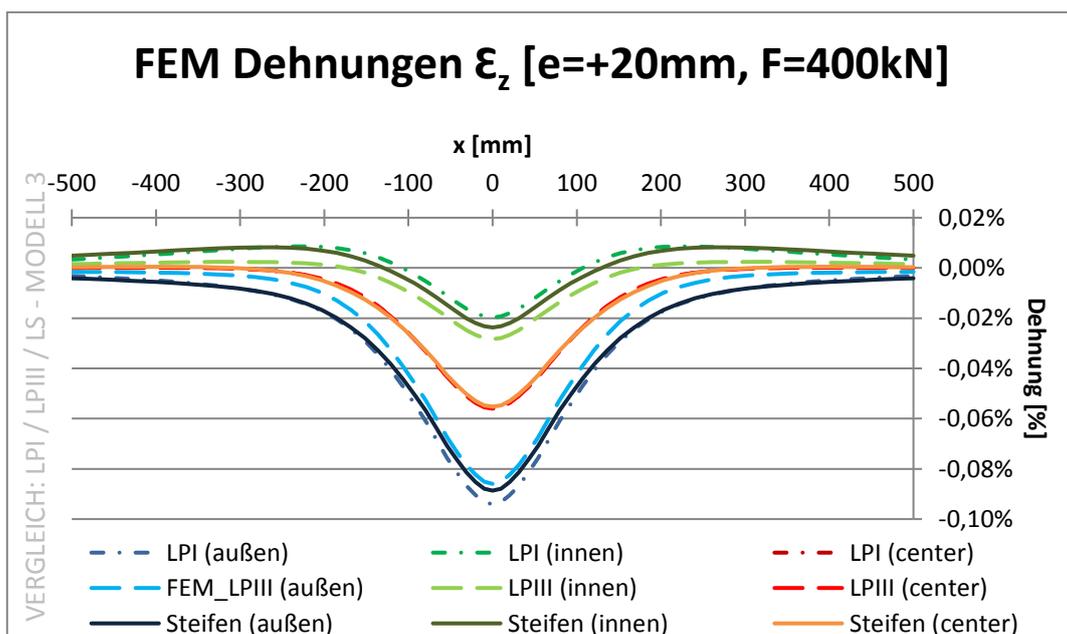


Abbildung 7.34: Dehnungsdiagramm; Vergleich LP I und LP III ( $e=+20$  mm)

Nachstehend werden die Verläufe für außenseitig am Steg (Abbildung 7.35) und innenseitig am Steg (Abbildung 7.36) noch einmal einzeln gezeigt, um die Darstellung zu verdeutlichen.

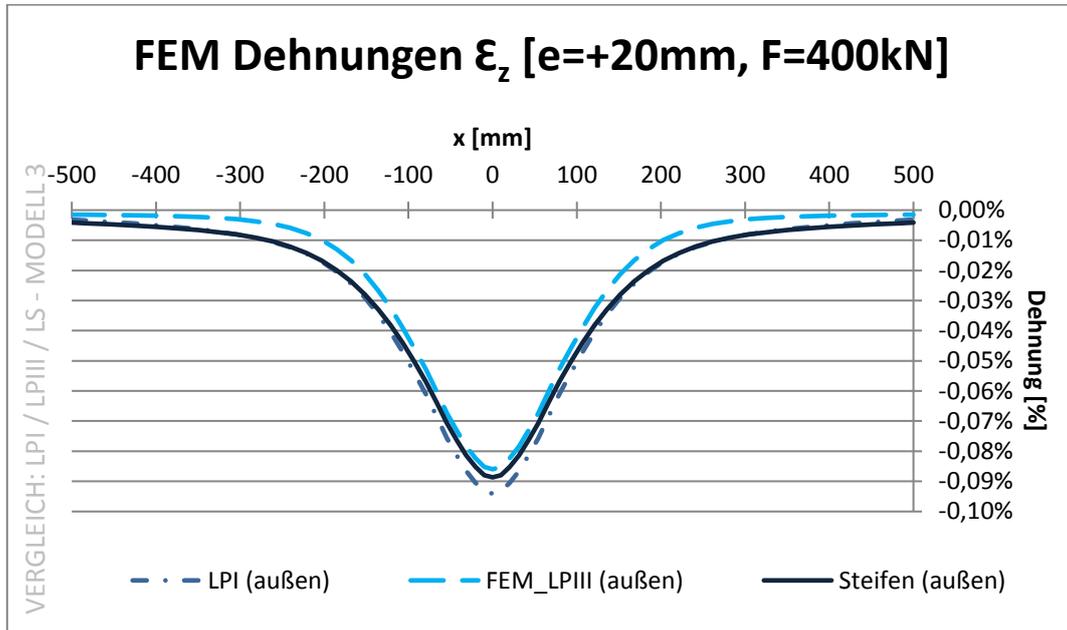


Abbildung 7.35: Dehnungsdiagramm; Vergleich außenseitig am Steg ( $e=+20$  mm)

Für die Dehnungen außenseitig am Steg kann man erkennen, dass die Ergebniskurve mit den unendlich steifen Längssteifen zuerst analog zur Kurve aus LP I und im mittleren Bereich beinahe wie die Kurve aus LP III verläuft.

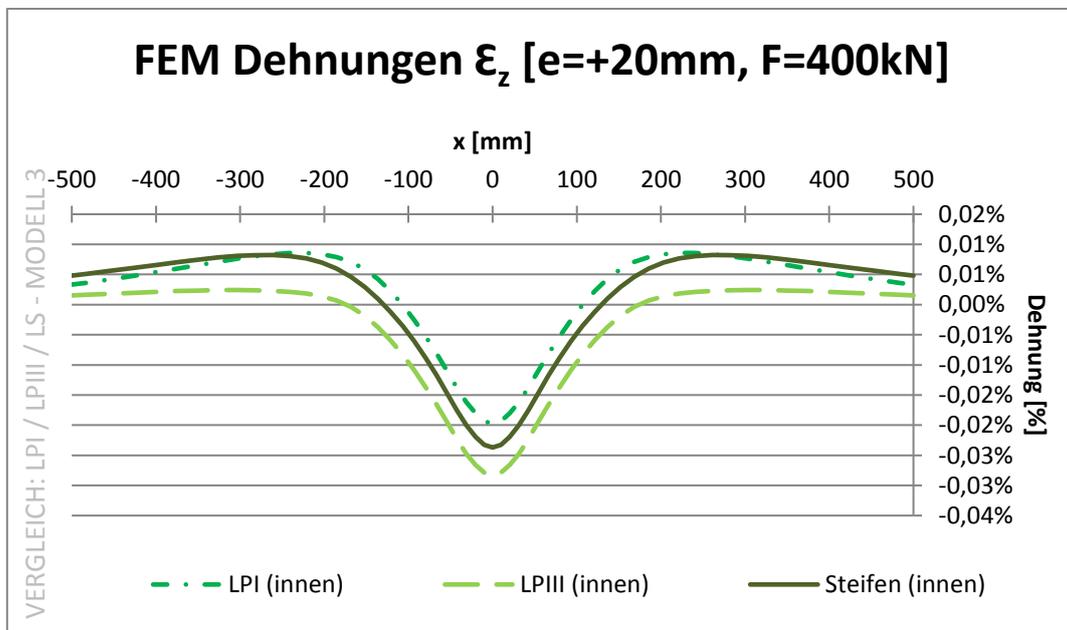


Abbildung 7.36: Dehnungsdiagramm; Vergleich innenseitig am Steg ( $e=+20$  mm)

Auch das Diagramm der Ergebnisse innenseitig am Steg vermittelt ein ähnliches Bild, nämlich dass sich die Ergebniskurve der Berechnung mit den unendlich steifen Längssteifen in den äußeren Bereichen der Kurve von LP I angleicht. In der Mitte (Bereich  $x=\pm 200$  mm) werden die Dehnungen jedoch betragsmäßig größer.

Die Vermutung, als eine FEM-Berechnung für unendlich steife Längssteifen erstellt wurde, war, dass sich die Ergebniskurve deutlich von den Systemen LP I und LP III abheben würde. Es wurde angenommen, dass die Dehnungen innenseitig am Steg kleiner und außenseitig am Steg größer wären.

Diese Annahme hat sich aber nicht bestätigt, wie man an den obenstehenden Diagrammen erkennen kann. Daher liegt nun die Vermutung nahe, dass das System im äußeren Bereich ( $-500 \text{ mm} < x \leq -200 \text{ mm}$  und  $500 \text{ mm} < x \leq 200 \text{ mm}$ ) denselben Biegungsanteil erhält wie das System LP I. Im mittleren Bereich ( $-200 \text{ mm} < x \leq 200 \text{ mm}$ ) erhöhen sich die Biege­spannungen, da das Stegblech nun aus der Ebene deutlich steifer ist.

Nachfolgend befindet sich in Abbildung 7.37 ein Diagramm, das den Vergleich zwischen Norm, FEM-Berechnung und der Versuchsauswertung darstellt.

Man erkennt, dass die Abstände jeweils zwischen LP I-FEM und LP I-Versuch bzw. LP III-FEM und LP III-Versuch gut passen, sowohl innenseitig als auch außenseitig am Steg. Der Normwert ist wiederum für LP I unterhalb der FEM-Kurve und für LP III innerhalb der FEM-Kurve.

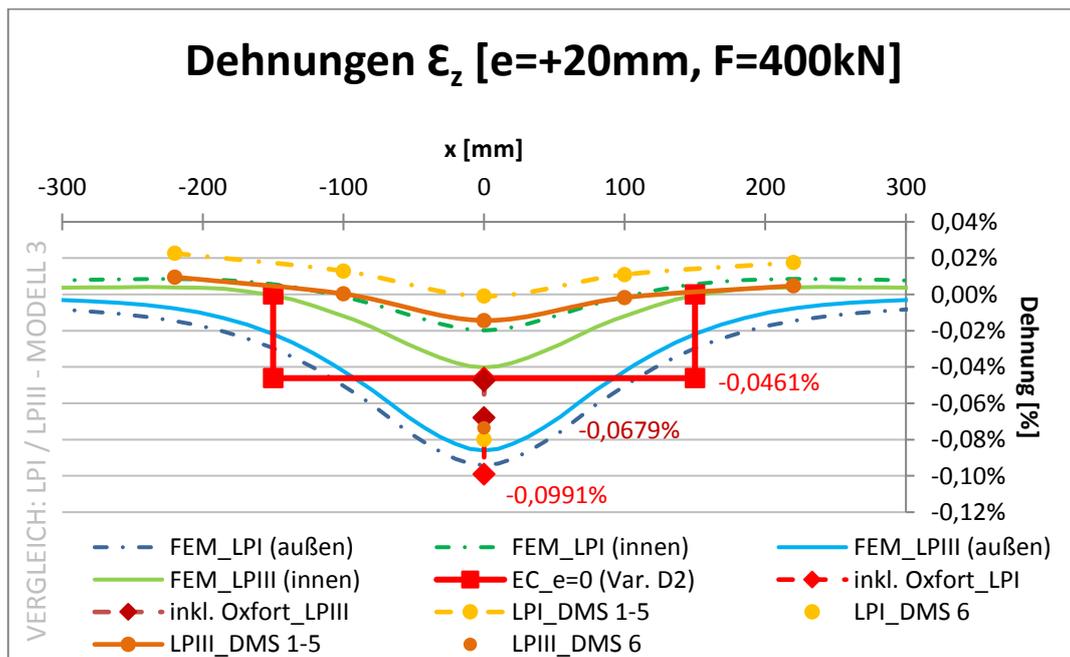


Abbildung 7.37: Vergleich Norm, FEM und Laborversuche für LP I und LP III ( $e=+20 \text{ mm}$ )

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend kann man feststellen, dass hinsichtlich der lokalen Vertikalspannungen an der Stegobenseite, unmittelbar unter der Radlast, die Laborversuche und die FEM-Studie intensiv analysiert wurden und auf vielfältige Weise Vergleiche angestellt wurden.

Die Studie der numerischen Berechnungen brachte die gewünschten Ergebnisse, indem sich die Ergebnisschärfe mit jedem Modellierungsschritt in die gewünschte Richtung entwickelt hat. Die Ergebnisse der FEM-Modellierung kamen den Ergebnissen der Laborversuche immer näher. Allerdings muss man an dieser Stelle auch kritisch anmerken, dass sie trotzdem immer einen gewissen Abstand hatten. Hier sollten in der Zukunft noch weitere Versuche und numerische Vergleiche angestellt werden.

Des Weiteren wurden die Unterschiede zwischen den Systemen LP I und LP III herausgearbeitet, also dem Trägerabschnitt mit und ohne Längssteifen. Für diesen Vergleich wurden noch einige ergänzende Berechnungen gemacht, in welchen die Längssteifen als unendlich steif modelliert wurden. Das Fazit hierbei ist, dass es zwischen System LP I und System LP III doch deutliche Unterschiede bei den Ergebnissen gibt, sowohl bei der FEM-Modellierung, als auch bei den Laborversuchen. Trotzdem bleibt die Tendenz deutlich sichtbar. Die Modellierung der unendlich steifen Längssteifen hatte eher überraschende Ergebnisse zur Folge, da die besagte Kurve nicht ähnlicher zu LP I (mit Längssteifen) war, sondern im mittleren Bereich zwischen LP I und LP III (ohne Längssteifen) lag. Dies konnte nur dadurch erklärt werden, dass sich die Biegespannungen durch die höhere Steifigkeit des Stegblechs erhöhen und dadurch die Dehnungen beeinflusst wurden. Auch dies lässt noch Raum für weitere Forschung.

Für die Zukunft gibt es natürlich noch Vieles, das man weiter entwickeln kann. Beispielsweise wurde für das System LP II, mit Radlaststellung unmittelbar über dem Querschott, nur die Vorstudie durchgeführt und die weiteren Modelle aus Zeitgründen nicht weiterbearbeitet.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Forschung bei Hohlkasten-Kranbahnträgern sehr spannend ist und auch in Zukunft viele neue Erkenntnisse zu erwarten sind.

## Literaturverzeichnis

- [1] ÖNORM EN 1993-6, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten; Teil 6: Kranbahnen, Wien, Österreichisches Normungsinstitut, Ausgabe: 15.08.2010
- [2] Mandl, A.A.: Lokale Spannungen in Stegen von Kranbahnträgern – Laborversuche und numerische Berechnungen, Technische Universität Graz, 2017
- [3] Oxfort, J.K.: Zur Beanspruchung der Obergurte vollwandiger Kranbahnträger durch Torsionsmomente und durch Querkraftbiegung unter dem örtlichen Radlastangriff, Stuttgart, Der Stahlbau 12/1963 S. 360-363
- [4] Harrer, B.: Lokale Biegespannungen in Stegen von Kranbahnträgern infolge exzentrischer Radlasteinleitung, Technische Universität Graz, 2017
- [5] Kraus M., Mämpel S.: Kennwerte neuer und abgenutzter Kranschiene für die Bemessung von Kranbahnträgern, Stahlbau 86, 2017
- [6] Kindmann, R., Kraus, M., Niebur H.J.: Stahlbau Kompakt – Bemessungshilfen, Profiltabellen, 3. Auflage, 2014
- [7] Dassault Systèmes Simulia Corp., Softwarepaket Abaqus Version 6.14-5, 2015

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