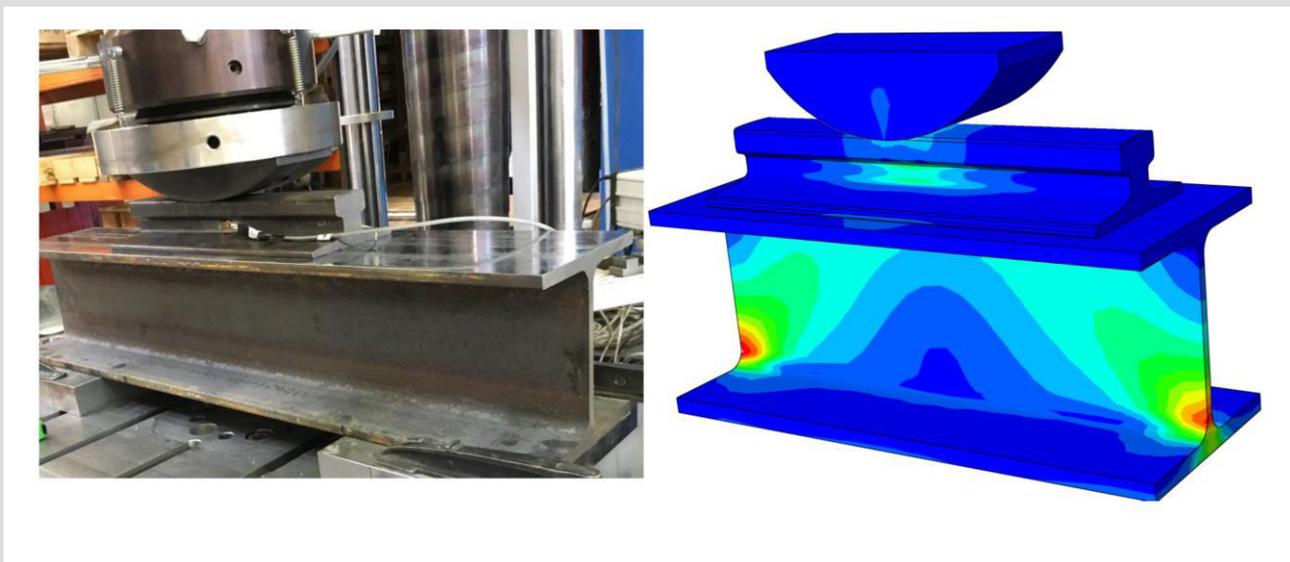


# Laborversuche und numerische Berechnungen zur experimentellen Ermittlung von Radlasten auf Kranbahnschienen



D-5-76/2019

**Zauchner Paul Reinhold**  
Institut für Stahlbau  
Technische Universität Graz



# **Laborversuche und numerische Berechnungen zur experimentellen Ermittlung von Radlasten auf Kranbahnschienen**

## **Masterarbeit**

Zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

Eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Fakultät für Bauingenieurwissenschaften – Institut für Stahlbau

## **Betreuer**

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

Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Markus KETTLER

## **Verfasser**

Paul Reinhold ZAUCHNER, BSc

Graz, 2019



## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen / Hilfsmittel benutzt habe. Unter den angeführten Quellen habe ich die wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit ident.

## **Statutory declaration**

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

---

Datum / date

---

Unterschrift / signature



# Danksagung

Vorab möchte ich einen herzlichen Dank an alle aussprechen, die zum Gelingen dieser Masterarbeit, sowie zum Abschluss meines Studiums beigetragen haben.

Ich möchte Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. tech. Harald Unterweger für die Möglichkeit danken, meine Masterarbeit am Institut für Stahlbau verfassen zu dürfen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. tech. Markus Kettler, der sich jeder Zeit um eine ausgezeichnete Betreuung der Arbeit bemüht hat und sich immer sehr viel Zeit genommen hat, alle meine Fragen zu beantworten und mich bei der Lösung von Problemstellungen zu unterstützen.

Weiters möchte ich meiner ganzen Familie bedanken, die mir sowohl mit mentaler, als auch mit finanzieller Unterstützung mein Studium an der Technischen Universität Graz ermöglicht hat. Besonders möchte ich meinem Vater Reinhold danken, der meine Ausbildung immer gefördert hat und mir immer ein Vorbild war. Ebenfalls danke ich ihm für das gewissenhafte und aufwendige Korrekturlesen dieser Arbeit.

Abschließend noch ein herzlicher Dank an meine Freundin Johanna, die mir in der gesamten Studienzeit zur Seite stand und mich immer unterstützt hat.



## **Kurzfassung**

Die Untersuchungen in dieser Masterarbeit sollen eine Methode zur experimentellen Ermittlung von Radlasten auf Kranbahnschienen liefern, auf Basis gemessener Dehnungen. Im Rahmen der Arbeit wird gezeigt, dass es durch Messungen der lokalen Vertikaldehnungen an der Schiene (mittels Dehnmessstreifen) bei einer Überfahrt des Krans möglich ist, die tatsächliche Radlast des Krans zu ermitteln. Diese Untersuchungen werden anhand von vier ausgewählten Schienenprofilen durchgeführt.

Da die zu messenden Dehnungen in der Schiene von mehreren Faktoren, wie zum Beispiel vom statischen System und der Dimension sowie der Stützweite des Kranbahnträgers abhängen, wird eine numerische Parameterstudie mit den verschiedenen Schienenprofilen, auf verschiedenen Kranbahnträgern gelagert, durchgeführt, um Einflüsse auf die zu messenden Dehnungen zu verifizieren. Dazu werden die Dehnungen für die verschiedenen Fälle im Zuge einer FE-Analyse berechnet.

Weiters wird im Zuge dieser Arbeit ein Laborversuch, mit Probekörpern einzelner Kranschienen, durchgeführt, um das Verhalten der zu messenden Dehnungen aus der FE-Analyse zu bestätigen.

Aus den Ergebnissen zufolge Parameterstudie und Laboversuch wird ein Vorschlag abgeleitet, wie die Radlasten auf einer Kranschiene, aus gemessenen Dehnungen bei der Kranüberfahrt, ermittelt werden können.

## **Abstract**

The studies in this master thesis should create a method for the experimental determination of wheel loads acting on a crane rail, based on strain measurements. Within this thesis it is shown, that the wheel load of the crane can be determined by measurements of the vertical strains at the rail with strain gauges. These studies are made based on four different rail types.

The strains in the rail which should be measured are influenced from different factors, for example the static system or the dimensions and supporting length of the crane girder. Therefore, a numeric parametric study was made, considering all the different rail profiles combined with various crane girders. The objective is to verify the influences on the strains, calculated in the rail. The calculation of the strains is based on a FE-analysis for various cases.

Moreover, within this thesis an experiment in the laboratory is carried out, using samples of the different rails to check the calculated strains of the FE-analysis.

From the results of the parametric study and the experiment, a proposal is presented how wheel loads on the crane rail can be determined, based on strain measurements during crossing of the crane wheel.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einführung und Inhalte der Arbeit</b> .....	<b>1</b>
1.1. Vorbemerkungen.....	1
1.2. Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	1
1.3. Numerische Berechnungen .....	1
1.4. Laborversuche .....	2
1.5. Messanordnung .....	2
1.6. Vorschlag zur Ermittlung der Radlast.....	3
<b>2. Numerische Vorstudie - Parameterstudie</b> .....	<b>5</b>
2.1. Vorbemerkung .....	5
2.2. Untersuchte Einflüsse auf die messbaren Dehnungen .....	5
2.2.1. Länge bzw. Stützweite des Kranbahnträgers .....	6
2.2.2. Dicke des Obergurtblechs des Kranbahnträgers .....	6
2.2.3. Dicke des Stegblechs des Kranbahnträgers .....	6
2.2.4. Einfluss von Queraussteifungen am Kranbahnträger .....	6
2.3. Untersuchte Kranschienenquerschnitte in dieser Arbeit .....	7
2.3.1. Schienenprofile .....	7
2.3.2. Werkstoff .....	7
2.4. Modellbildung – Finite Elemente Berechnung .....	7
2.4.1. FEM-Grundmodell - Grenzwertbetrachtung.....	8
2.4.2. FEM-Modellbildung für Parameterstudie.....	9
2.4.3. Diskretisierung .....	9
2.4.4. Material .....	9
2.4.5. Lagerung von Schiene und Kranbahnträger .....	10
2.4.6. Abbildung der Kontaktbedingungen .....	10
2.4.7. Ausnutzung der Symmetrie.....	10
2.5. Numerische Parameterstudie.....	11
2.5.1. Referenzwerte – Grundmodell mit starrer Lagerung .....	12
2.5.2. Einfluss des Kranbahnträgers .....	15
2.5.3. Einfluss der Höhe des Kranbahnträgers.....	21
2.5.4. Einfluss der Flanschbreite des Kranbahnträgers.....	24
2.5.5. Einfluss der Flanschstärke des Kranbahnträgers .....	26
2.5.6. Einfluss der Stegblechstärke des Kranbahnträgers .....	35
2.5.7. Einfluss von Queraussteifungen im Kranbahnträger .....	44

2.5.8. Parameterstudie – Einfluss der Schienenabnutzung auf vertikale Dehnungen .....	50
<b>3. Laborversuche .....</b>	<b>55</b>
3.1. Vorbemerkungen .....	55
3.2. Versuchskonzept.....	55
3.3. Messtechnik.....	56
3.3.1. Applikation der Dehnmessstreifen .....	56
3.4. Versuchsaufbau .....	57
3.4.1. Versuch 1 – starr gebettete Schiene .....	57
3.4.2. Versuch 2 – Schiene auf Walzprofil gelagert.....	59
3.5. Versuchsergebnisse .....	61
3.5.1. Ergebnisse für das Schienenprofil A 55 .....	61
3.5.2. Ergebnisse für das Schienenprofil A 75 .....	65
3.5.3. Ergebnisse für das Schienenprofil A 100 .....	67
3.5.4. Ergebnisse für das Schienenprofil A 120 .....	70
3.6. Vergleichsrechnungen zu den Versuchen mittels FE-Analyse .....	72
3.6.1. Modellbildung der Versuche .....	72
3.6.2. Vergleich der Vertikaldehnungsverläufe aus Versuch und FE-Analyse.....	75
3.6.3. Schlussfolgerungen aus den Versuchsergebnissen.....	80
<b>4. Ermittlung der Radlast aus Vertikaldehnungen am Schienenhals.....</b>	<b>81</b>
4.1. Vorbemerkung .....	81
4.2. Mechanischer Ansatz.....	81
4.3. Näherungslösung für die Dehnungsverläufe .....	82
4.3.1. Längsverlauf.....	82
4.3.2. Querverlauf.....	85
4.3.3. Einfluss der Abnutzung der Schiene .....	87
4.4. Referenzwert der Radlast bei starrer Bettung.....	87
4.4.1. Prognose der Radlast – Auswertung der Ergebniswerte für das FE-Grundmodell....	88
4.4.2. Prognose der Radlast – Auswertung aus den Versuchsergebnissen.....	88
4.5. Ermittlung der Radlast bei auf Kranbahnträger gelagerter Schiene .....	90
4.5.1. Einfluss der Blechstärken auf die maximale Dehnung $\varepsilon_{z,meas}$ .....	91
4.5.2. Vorschlag zur Ermittlung der Radlast $R$ aus gemessenen Vertikaldehnungen .....	94
4.5.3. Auswertung der Radlasten für die FE-Modelle.....	94
4.5.4. Auswertung der Radlasten für die Versuche der Schienen auf dem Walzprofil .....	95
4.6. Ermittlung der Radlast $R$ bei gemessener Dehnung oberhalb einer Queraussteifung .....	96

<b>5. Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>99</b>
5.1. Zusammenfassung.....	99
5.2. Ausblick .....	101
<b>6. Literaturverzeichnis.....</b>	<b>103</b>



# 1

## **1. Einführung und Inhalte der Arbeit**

### **1.1. Vorbemerkungen**

Kranbahnen sind Anlagen, die in Industriehallen oder Werkstätten zum Transport von Lasten installiert werden. Sie bestehen aus Kran, Kranschiene, dem eigentlichen Kranbahnträger und Konsolen sowie Stützen zur Lagerung. Die Kranschiene werden aus der Überfahrt des Krans vorwiegend dynamisch belastet. Aus diesem Grund werden die Radlasten, die zur statischen Bemessung angesetzt werden, üblicherweise mit dynamischen Faktoren beaufschlagt. Aufgrund mangelnder Unterlagen und Pläne für bestehende Kranbahnanlagen ist eine Bestimmung der tatsächlichen Radlast, welche auf die Kranschiene wirkt, nur schwer möglich. Daher wird in dieser Arbeit versucht, eine Möglichkeit zur experimentellen Ermittlung der Radlast auf einer Kranschiene, auf Basis von gemessenen Dehnungen bei der Überfahrt, zu entwickeln.

### **1.2. Aufgabenstellung und Zielsetzung**

Das Ziel dieser Arbeit ist, eine indirekte Methode zur Ermittlung von Radlasten auf Kranschiene zu entwickeln, ohne den Kran anheben, oder demontieren zu müssen. Dies soll durch Messung von vertikalen Dehnungen in der Kranschiene bei der Kranüberfahrt, und einer anschließenden Rückrechnung dieser Messergebnisse auf die Radlast, erfolgen. Als Messwerte sollen die Oberflächendehnungen an den Außenflächen der Schienenhälse, mittels Dehnmessstreifen, aufgenommen werden. Die Untersuchungen wurden an vier verschiedenen Schienenprofilen des Types A nach DIN 536-1 [1] durchgeführt. Die untersuchten Schienenprofile sind A 55, A 75, A 100 und A 120.

Zum Umfang der Arbeit zählen sowohl numerische Berechnungen, als auch die Durchführung eines Laborversuchs und ein Vorschlag zur Ermittlung der Radlasten.

### **1.3. Numerische Berechnungen**

Es sollen numerische FEM-Modelle zur Berechnung von Dehnungen in der Kranschiene angefertigt werden, um die Größenordnung der Dehnungen und Einflüsse welche eine Änderung der Dehnungen hervorrufen, beurteilen zu können. Es wird eine Parameterstudie durchgeführt, welche

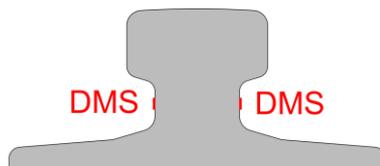
den Einfluss der Dimensionen des Kranbahnträgers und des statischen Systems aufzeigen soll. Die Berechnungen erfolgen nach der Finiten Elemente Methode. Modelliert werden dabei sowohl Kranschienen als auch Kranbahnträger mit Volumselementen. Die Modelle untersuchen Kranschienen, welche direkt, ohne elastische Zwischenlage, auf dem Kranbahnträger aufliegen und nicht schubstarr mit dem Träger verbunden sind. Alle Belastungen werden in dieser Arbeit zentrisch auf die Modelle aufgebracht. Für die ersten Untersuchungen wird die Annahme getroffen, dass Messungen bei exzentrischer Lasteinleitung durch die Bildung des Mittelwertes zweier gegenüberliegender Messpunkte korrigiert werden können.

### 1.4. Laborversuche

Weiters ist im Zuge dieser Arbeit die Durchführung von Laborversuchen am Labor für konstruktiven Ingenieurbau, der Technischen Universität Graz, vorgesehen, um das Messen der Dehnungen unter der Radlast experimentell durchzuführen, die Ergebnisse auszuwerten und mit den Berechnungen nach der Finiten Elemente Methode vergleichen zu können. Zur Durchführung der Versuche stehen, für jedes untersuchte Schienenprofil, Probekörper mit einer Länge von 400 mm zu Verfügung. An diesen werden, an den vorgesehenen Messpunkten, Dehnmessstreifen appliziert und die Dehnungen unter einer definierten Probelastung gemessen.

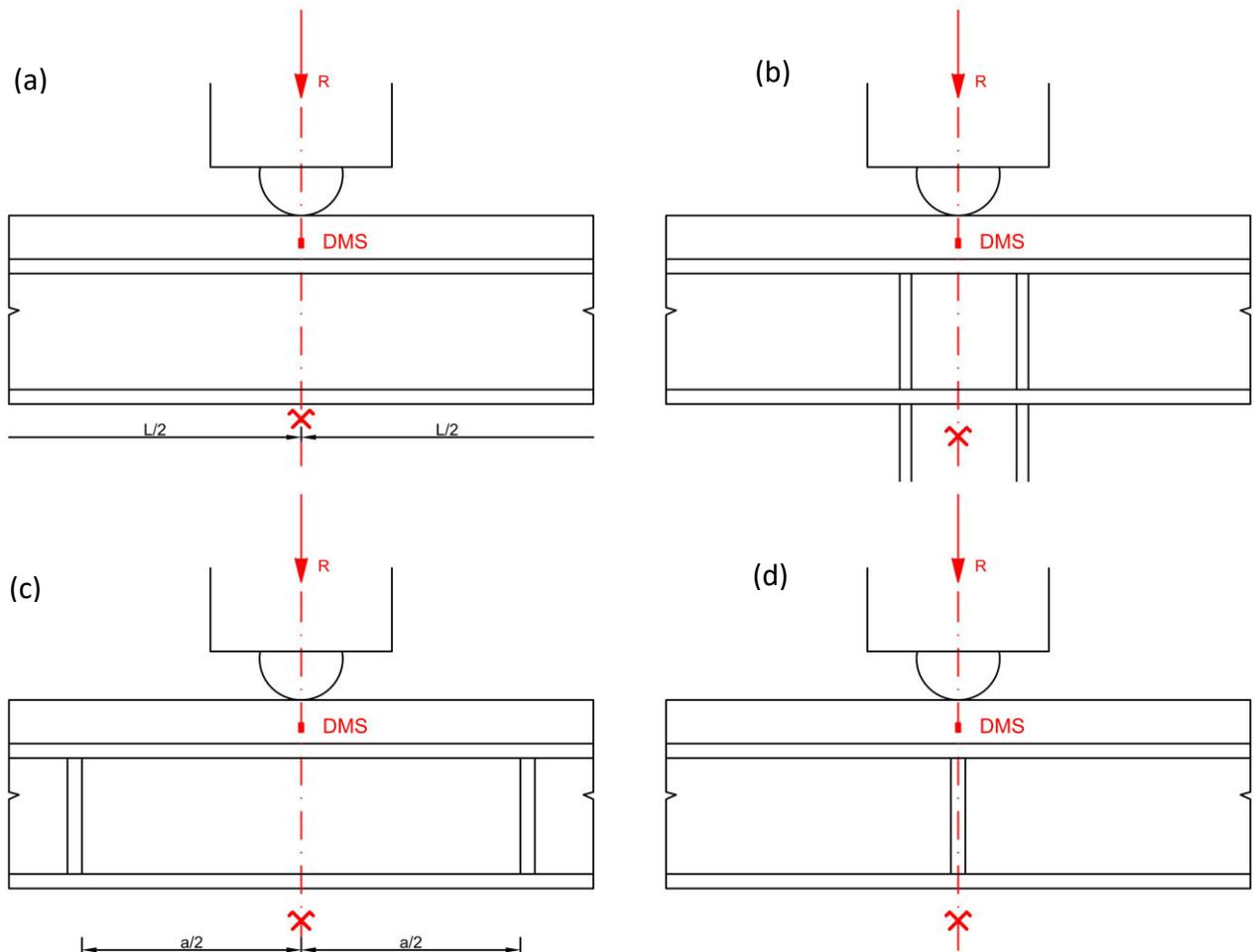
### 1.5. Messanordnung

Es sollen Oberflächendehnungen an den Kranschienen gemessen werden. Die Messung an der Schiene selbst ist nur sehr beschränkt durchführbar. Die Schiene ist unten durch den Kranbahnträger, der Schienenkopf ist oben durch das Rad und dessen Seitenführungskränze begrenzt und damit für eine derartige Messung nicht zugänglich. Die am besten geeigneten Messpunkte sind daher beidseits an den Außenflächen des Schienenhalses gelegen (siehe Abbildung 1.1). An diesen Punkten müssen an der Schiene in einem Insitu-Versuch Dehnmessstreifen angebracht, und die Vertikaldehnungen bei einer Überfahrt des Kranrades aufgezeichnet werden.



**Abbildung 1.1:** Anordnung der Dehnmessstreifen an dem Schienenprofil vom Typ A

Bei der Anordnung der Messpunkte in Längsrichtung am Kranbahnträger selbst sollte versucht werden, möglichst symmetrische Messergebnisse aus einer Kranüberfahrt zu erzielen. Deshalb sollten die Messpunkte an signifikanten Punkten (Feldmitte, Auflager, oberhalb einer Aussteifung, zwischen Aussteifungen) so angeordnet werden, dass symmetrische Ergebnisse zu erwarten sind (siehe Abbildung 1.2).



**Abbildung 1.2:** Anordnung der Messpunkte an der Kranschiene in Längsrichtung: in Feldmitte (a), über Auflagerpunkten (b), zwischen Quersteifen (c), direkt über Quersteifen (d)

## 1.6. Vorschlag zur Ermittlung der Radlast

Im letzten Kapitel dieser Arbeit wird ein Vorschlag zur Ermittlung der zutreffenden Radlasten vorgestellt, welcher aus den gemessenen Dehnungen und begleitenden FE-Berechnungen hergeleitet wurde.



# 2

## 2. Numerische Vorstudie - Parameterstudie

### 2.1. Vorbemerkung

Die Rückrechnung, von mittels Dehnmessstreifen gemessenen Vertikaldehnungen am Schienenhals auf die tatsächliche Radlast, soll im Idealfall für jedes beliebige Kranbahnsystem ermöglicht werden. Aus diesem Grund wurde eine numerische Vorstudie durchgeführt, um eine Aussage zu treffen, wie sich die Lastabtragung im System einstellt, bzw. wie sich die Vertikaldehnungen im Schienenhals in Abhängigkeit vom System ändern. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass die Lastabtragung nur sehr lokal unter dem Kranrad stattfindet und somit der Einfluss der Schienenlänge vernachlässigt werden kann. Maßgebend ist der Einfluss der Lagerung der Schiene. Die Schiene liegt üblicherweise auf einem Kranbahnträger auf, der für das statische System und eine vorgegebene Belastung dimensioniert wurde, und daher bei jeder Kranbahn andere Dimensionen aufweisen kann. Die Größenordnung der Einflüsse aus dem statischen System und den Abmessungen des Kranbahnträgers, sowie deren Auswirkungen auf die gemessenen Dehnungen am Schienenhals sind Gegenstand der nachfolgenden numerischen Parameterstudie.

### 2.2. Untersuchte Einflüsse auf die messbaren Dehnungen

Es wird davon ausgegangen, dass die Dimensionen des Kranbahnträgers, auf dem die Kranschienen gebettet werden, einen maßgebenden Einfluss auf die Größe der Vertikaldehnung im Schienenhals haben. Ob die Lasteinleitung sehr lokal erfolgt, oder sich eher verteilt, hängt von der Steifigkeit der vertikalen Bettung der Schiene und dadurch auch vom Kranbahnträger ab. Um eine Aussage über die Größenordnung der unterschiedlichen Einflüsse treffen zu können, wird in der Parameterstudie untersucht welche Einflüsse die Dimensionen des Kranbahnträgers auf die Dehnungsverteilung in der Schiene bzw. im Schienenhals, wo auch die Messung vorgenommen wird, aufweisen. In den folgenden Punkten wird beschrieben, von welchen Dimensionen und Abmessungen der Kranbahn ein Einfluss auf die Dehnungen erwartet wird.

### 2.2.1. Länge bzw. Stützweite des Kranbahnträgers

Untersucht wurde die Änderung der vertikalen Dehnungen am Schienenhals, bei verschiedenen Stützweiten des Kranbahnträgers. Es wird davon ausgegangen, dass eine längere Stützweite bei denselben Dimensionen des Kranbahnträgers (identer Querschnitt) zu einer höheren Nachgiebigkeit der Bettung der Schiene auf dem Kranbahnträger führt. Die auftretenden vertikalen Stauchungen am Schienenhals müssten aus diesem Grund abnehmen.

### 2.2.2. Dicke des Obergurtblechs des Kranbahnträgers

Die Kranschiene liegt am Obergurt des Kranbahnträgers auf, wodurch mit einem Einfluss der Blechstärke des Obergurtes zu rechnen ist. Bei höherer Blechstärke wird die Steifigkeit in vertikaler Richtung lokal im Lasteinleitungsbereich zwischen Schiene und Kranbahnträger erhöht. Dadurch ist davon auszugehen, dass die Dehnungen am Messpunkt steigen, weil die Lasteinleitung mehr konzentriert wird.

### 2.2.3. Dicke des Stegblechs des Kranbahnträgers

Wie bei der Änderung der Blechstärke des Obergurtes, wird auch bei einer Erhöhung der Stegblechstärke davon ausgegangen, dass die lokale Steifigkeit im Lasteinleitungsbereich zunimmt und dadurch die Stauchungen am Messpunkt höher ausfallen.

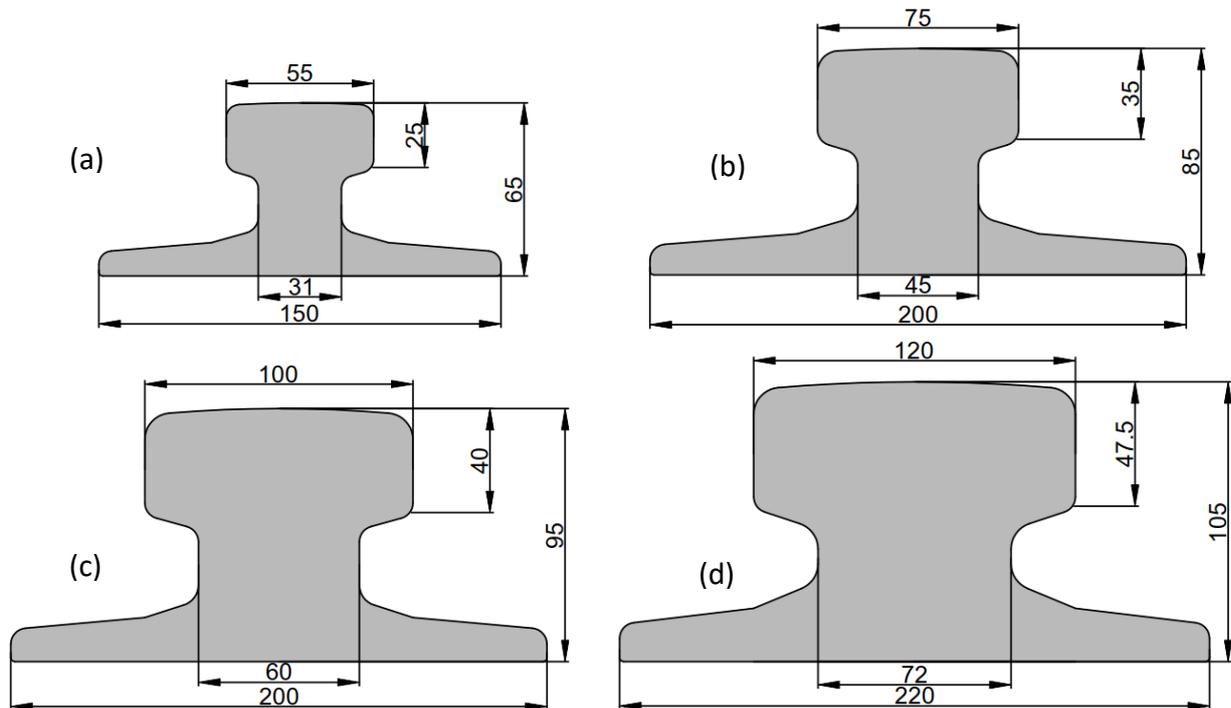
### 2.2.4. Einfluss von Queraussteifungen am Kranbahnträger

In der Regel sind in den Kranbahnträgern in regelmäßigen Abständen und über Auflagerpunkten (Konsolen oder Stützen) Queraussteifungen vorgesehen. Die Messung der Vertikaldehnungen oberhalb einer Steife sollte zu erhöhten Ergebnissen führen, da die Steifigkeit im Bereich der Lasteinleitung steigt. Die Messung über einen ausgesteiften Auflagerpunkt könnte eventuell zu Dehnungen in der Größenordnung des Referenzwertes am Grundmodell (Schiene auf starrer Unterlage) führen.

## 2.3. Untersuchte Kranschienequerschnitte in dieser Arbeit

### 2.3.1. Schienenprofile

In dieser Arbeit beziehen sich die Untersuchungen auf vier verschiedene Schienenprofile der Form A, nach DIN 536, Blatt 1 [1]. Die Profile A 55, A 75, A 100 und A 120 sind in Abbildung 2.1 dargestellt. Die Bezeichnung der Schienen bezieht sich auf die Schienenkopfbreite  $k$ . Die Abmessungen der untersuchten Profile sind der Abbildung 2.1 zu entnehmen.



**Abbildung 2.1:** Abmessungen der untersuchten Schienenprofile A 55 (a), A 75 (b), A 100 (c) und A 120 (d)

### 2.3.2. Werkstoff

Die Schienen sind nach DIN 536-1 [1] aus Stahl mit einer Mindestzugfestigkeit von  $f_u = 690 \text{ N/mm}^2$  hergestellt. Der Elastizitätsmodul wurde mit  $E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$  angesetzt. Alle numerischen Berechnungen wurden elastisch durchgeführt, wodurch kein Einfluss der Fließgrenze zu erwarten ist.

## 2.4. Modellbildung – Finite Elemente Berechnung

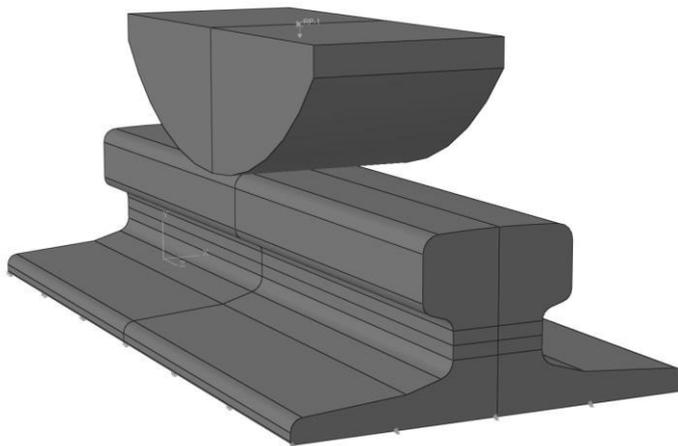
Die numerischen Berechnungen wurden mit der Finite Elemente Software Abaqus 6.14-3 durchgeführt. Es werden in der Software unterschiedliche FEM-Modelle, bestehend aus

Kranschienen und Kranbahnträger, erstellt und ausgewertet, um einen Überblick über die Einflüsse auf die vertikalen Stauchungen im Schienenhals, sowie deren Ursachen, zu erhalten. Die Modelle sollen eine Kranschiene, die direkt und nicht schubstarr auf den Kranbahnträger aufliegt, nach ÖNORM EN 1993-6 [2] abbilden.

### 2.4.1. FEM-Grundmodell - Grenzwertbetrachtung

Es werden in einem ersten Ansatz die Schienenprofile mit Volumselementen modelliert. Als Annahme des FEM-Grundmodells wird nur ein vertikal starr gelagertes Schienenstück mit einer Länge von 400 mm modelliert, da davon ausgegangen werden kann, dass die Dehnungen in der Schiene, bei mittiger Lasteinleitung, außerhalb dieses Bereichs der Lasteinleitung abgeklungen sind. Zur realistischen Abbildung der Lasteinleitung wurde ein Segment eines Kranrades modelliert und mit der Schiene über eine Kontaktbedingung verbunden (siehe Abbildung 2.2).

Um einen Referenzwert der Dehnungsverteilungen im Schienenhals zu erhalten, werden alle Einflüsse des Kranbahnträgers ausgenommen, und es wird eine starre Bettung des Schienenfußes in vertikaler Richtung modelliert. In Horizontalrichtung kann sich die Unterseite der Schiene frei verschieben. Die Ergebnisse liefern einen Grenzwert für eine unendlich hohe Steifigkeit in vertikaler Richtung unter der Schiene. Dieser Grenzwert wird den Ergebnissen der Parameterstudie gegenübergestellt, um zu ermitteln, welchen Einfluss die Änderungen der Bettung der Schiene aufweisen.



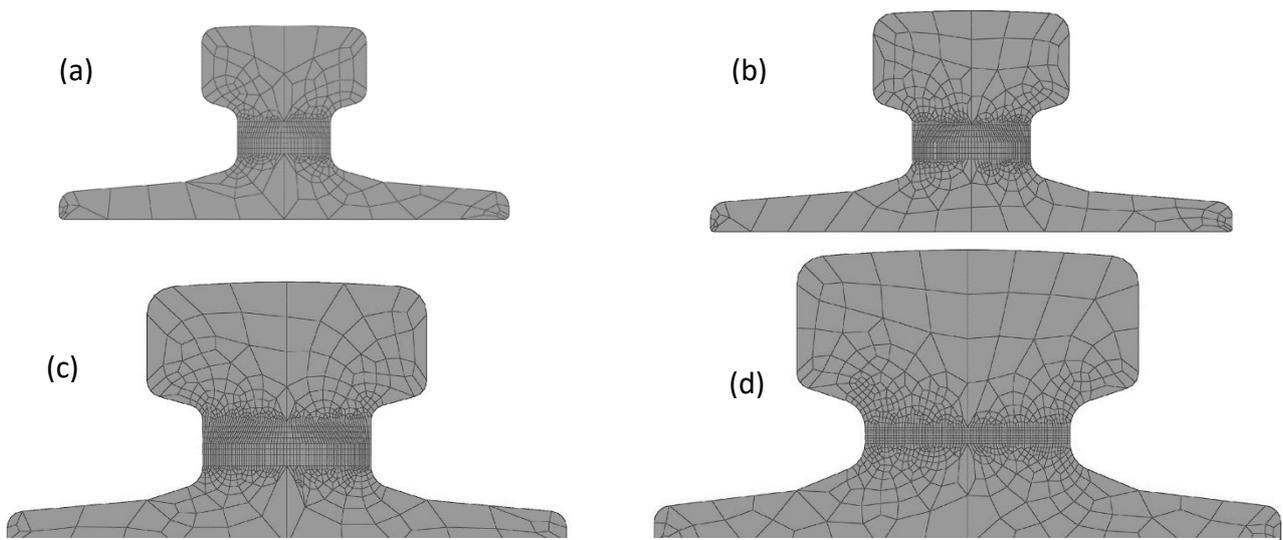
**Abbildung 2.2:** Grundmodell – Abaqus

### 2.4.2. FEM-Modellbildung für Parameterstudie

Es wurden in weiterer Folge für alle untersuchten Schienenprofile mehrere FEM-Modelle mit Kranbahnträgern unterschiedlich gewählter Dimensionen und Stützweiten modelliert. Schienen und Träger sind in den Modellen mittels Volumselementen abgebildet. Ziel der Modelle ist, anhand der ermittelten Ergebnisse Einflüsse auszumachen, welche sich auf die zu messenden Stauchungen im Schienenhals auswirken und die Größenordnungen der Abweichungen, gegenüber dem starr gestützten Grundmodell, festzustellen.

### 2.4.3. Diskretisierung

Die Modellierung der Kranbahnschienen erfolgte mit Volumselementen vom Typ C3D20R. Dabei handelt es sich um quadratische Volumselemente mit 20 Knoten. Das Netz der Schiene wurde so generiert, dass es zum jeweiligen Messpunkt an der Stegaußenfläche hin immer feiner wird. Die maximale Elementgröße beträgt 15 mm, die minimale 0,8 mm. Die Abbildung 2.3 zeigt die gewählten Elemente.



**Abbildung 2.3:** FE-Netz der untersuchten Schientypen A55 (a), A75 (b), A100 (c) A120 (d)

Die übrigen Bestandteile des Modells, wie Kranbahnträger, das Radstück zur Lasteinleitung und die Queraussteifungen sind mit linearen Volumselementen mit 8 Knoten, vom Typ C3D8R, abgebildet.

### 2.4.4. Material

Für das Material wurde ein rein linear-elastisches Verhalten, mit einem Elastizitätsmodul von  $E = 210\,000\text{ N/mm}^2$ , angesetzt. Es wurde auf das Ansetzen einer Fließgrenze im Zuge der FEM-

Berechnung verzichtet, da die Schienen im Gebrauchszustand und im Messbereich der Vertikaldehnungen nicht plastifizieren. Durch das lineare Verhalten kann auch ein linearer Bezug zwischen Dehnung und Belastung vorausgesetzt werden, wodurch die im Modell angesetzte Belastung beliebig modifizierbar bleibt.

### 2.4.5. Lagerung von Schiene und Kranbahnträger

Die Lagerung der Schiene erfolgte im Grundmodell über eine flächige, starre Bettung des Schienenfußes.

In den weiteren Modellierungen werden die Kranbahnträger als Einfeldbalken gelagert. Hierbei wurden die Untergurte gelenkig und an einer Seite längsverschieblich gelagert.

Die Lagerung der Schiene auf dem Kranbahnträger wurde über die Kontaktbedingung realisiert.

### 2.4.6. Abbildung der Kontaktbedingungen

Da in den FEM-Modellen ein Kontakt zwischen Kranrad und Schiene, sowie zwischen Schiene und Kranbahnträger hergestellt werden muss, wurden Kontaktbedingungen eingeführt. Die Kontaktbedingung, welche normal auf die Kontaktfläche eingeführt wird, soll sowohl zwischen Rad und Schiene, als auch zwischen Schiene und Kranbahnträger einen starren Kontakt auf Druck, jedoch einen Ausfall auf Zug (Abheben) ermöglichen. Durch die nichtlinearen Kontaktbedingungen bzw. durch das mögliche Abheben der Schiene werden die Rechenzeiten erhöht.

Als Kontaktbedingung in tangentialer Richtung zwischen den Kontaktflächen wurde eine Reibung angesetzt. Es wurde ein Reibungsbeiwert von  $\mu = 0,2$  für Stahl auf Stahl angenommen.

In den Grundmodellen ist kein Kranbahnträger vorhanden, daher ist die Kontaktbedingung nur zwischen dem Kranrad und dem Schienenkopf wirksam.

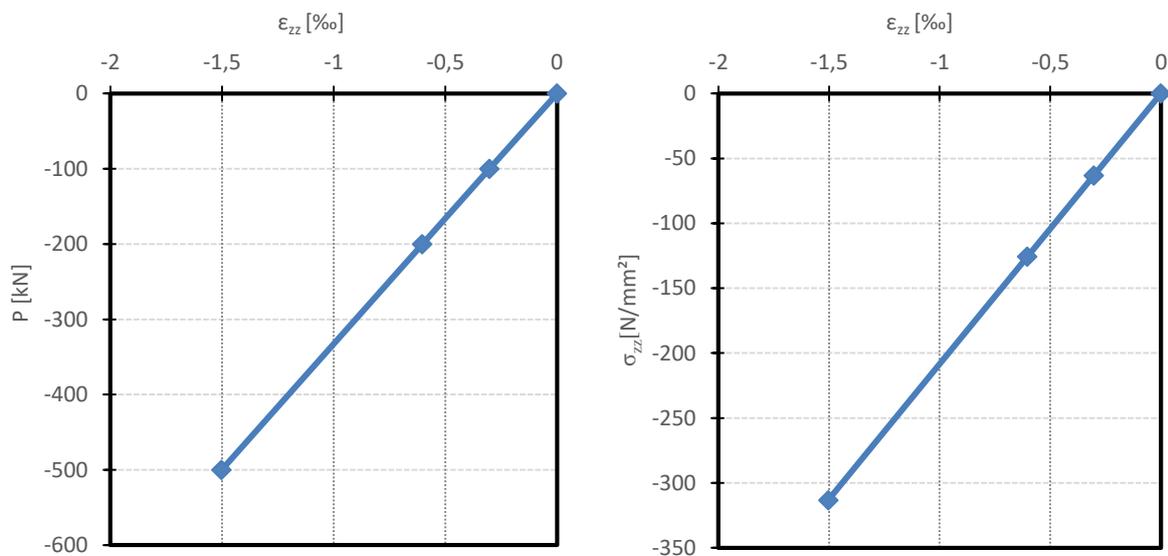
### 2.4.7. Ausnutzung der Symmetrie

Um die Rechenzeiten bei größeren FEM-Modellen möglichst gering zu halten, wurde mit Symmetriebedingungen gearbeitet. Der Umstand wird ausgenutzt, dass das Kranrad zur Lasteinleitung in Feldmitte, bei einem Einfeldträger, genau in der Symmetrieachse steht. Somit wurde, bei den FEM-Modellen mit größeren Stützweiten, nur die Hälfte des Systems modelliert und die zweite Hälfte mittels einer Symmetriebedingung an der Schnittfläche berücksichtigt.

## 2.5. Numerische Parameterstudie

Im folgenden Kapitel wird die Durchführung der Parameterstudie, hinsichtlich der FEM-Modellierung und Auswertung der Ergebnisse, beschrieben. Als Ergebnisse werden die Verläufe der Vertikaldehnungen über die Dicke des Schienenhalses in Querrichtung der Schiene und längs an der Außenfläche des Schienenhalses angegeben, wobei der gemeinsame Schnittpunkt den Messpunkt der Vertikaldehnungen an der Halsaußenfläche unter dem Kranrad darstellt. Die Betrachtung von Dehnungen anstatt von Spannungen wird deshalb vorgezogen, da die Messung mittels Dehnmessstreifen als Ergebnis ebenfalls Dehnungen liefert. Da die Betrachtung generell im linear-elastischen Bereich der Materialarbeitslinie stattfindet, ist eine lineare Umrechnung zwischen Vertikaldehnungen und Vertikalspannungen möglich.

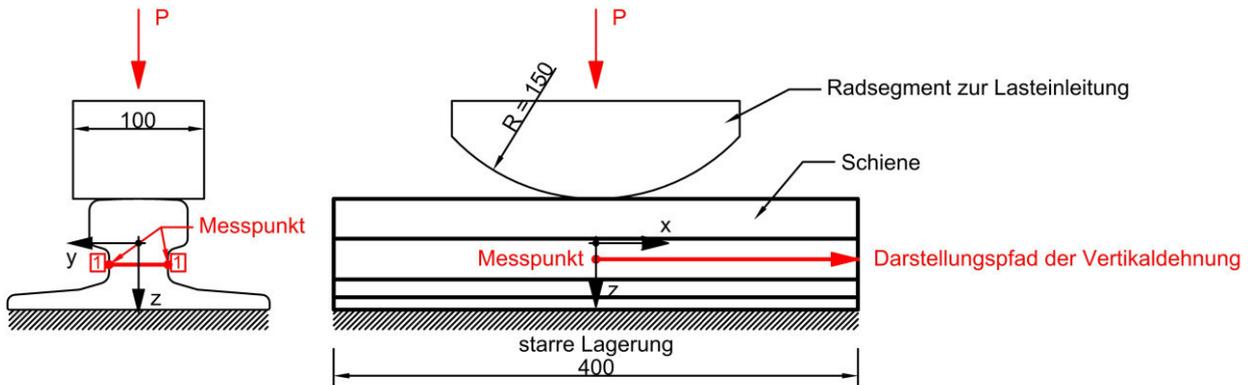
In Abbildung 2.4 wird das Verhalten der linearen Berechnung für ein Beispiel dargestellt. Es wird gezeigt, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Druckbelastung und Vertikalstauchung sowie zwischen Vertikalspannung und Vertikalstauchung im Schienenhals vorausgesetzt werden kann.



**Abbildung 2.4:** Last-Dehnungsdiagramm (links) und Spannungs-Dehnungsdiagramm (rechts) am Messpunkt für das Schienenprofil A55 - Grundmodell

## 2.5.1. Referenzwerte – Grundmodell mit starrer Lagerung

Grundmodell:



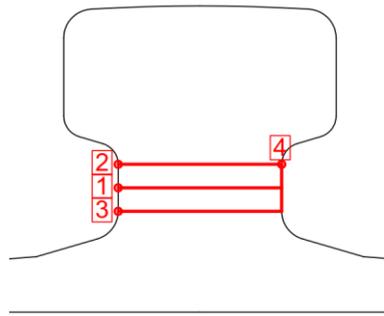
**Abbildung 2.5:** Grundmodell

Das Grundmodell, welches als Ausgangsbasis für die Studie betrachtet wird, besteht, wie erwähnt, aus einem 400 mm langem Schienenstück, welches starr gebettet gelagert ist. Die Last wird in der Mitte der Schiene, zentrisch aufgebracht (siehe Abbildung 2.5). Um eine realistische Lasteinleitung zu erhalten, wurde ein Segment eines Kranrades mit einem Radius von 150mm modelliert und in Kontakt mit der Lauffläche der Schiene gebracht. Der in diesem Modell ermittelte Wert der Vertikaldehnungen am Schienenhals im Messpunkt wird als Referenzwert gesehen, an dem sich die Ergebnisse der weiteren Modelle orientieren. Der in diesem Modell ermittelte Wert gilt als oberer Grenzwert. Es wird davon ausgegangen, dass der gemessene Wert der vertikalen Stauchung am Kranbahnschienenhals maßgeblich von der Bettung der Schiene abhängt. Daher wird bei starrer Bettung der höchste Wert der Stauchung erwartet. An diesem Grundmodell wird das Verhalten der Vertikaldehnungen am Schienenhals untersucht, um eine Aussage darüber zu treffen, ob durch die geplante Messung von Vertikaldehnungen am Schienenhals zuverlässige Ergebnisse zu erwarten sind.

In Abbildung 2.7 werden die Verteilungen der vertikalen Stauchungen am Schienenprofil A 75 repräsentativ dargestellt. Das Verhalten stellt sich bei allen Schienenprofilen ähnlich ein. Die Darstellung der Verteilungen erfolgte über die Dicke des Schienenhalses in Schienenquerrichtung (y-Achse) im Mittelquerschnitt (Achse 1 in Abbildung 2.6), an Ober- und Unterkante des Halses am Ende der Ausrundungsradien (Achsen 2 und 3 in Abbildung 2.6), sowie horizontal und vertikal an der Halsaußenfläche. Dabei ist ersichtlich, dass die Dehnungen an den Ausrundungsradien zu, Schienenkopf und -fuß hin, Spitzen aufweisen. Die Anbringung der Dehnmessstreifen in der Mitte des Schienenhalses wird aufgrund des dort vorliegenden flachen Gradienten der Dehnungen zuverlässige Ergebnisse liefern. An der Dehnungsverteilung vertikal an der Halsaußenkante (Abbildung 2.8) ist eine konstante Dehnungsverteilung über die Höhe des Schienenhalses zu

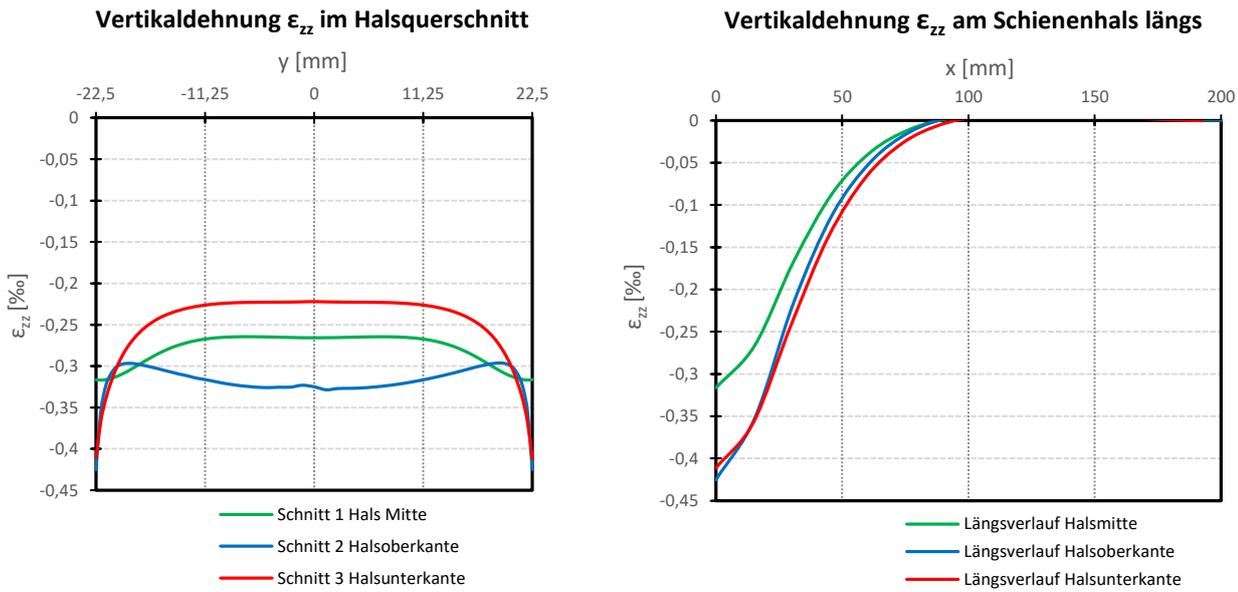
erkennen. Dadurch werden auch Unsicherheiten beim Applizieren der Dehnmessstreifen (Lageungenauigkeiten) nicht relevant.

In Abbildung 2.6 ist der Querschnitt durch die Schiene dargestellt. Im Querschnitt ist die Lage der Schnittebenen eingetragen an denen die Dehnungen ausgegeben werden, um eine Vorstellung von der Dehnungsverteilung innerhalb des Schienenhalses zu erhalten.



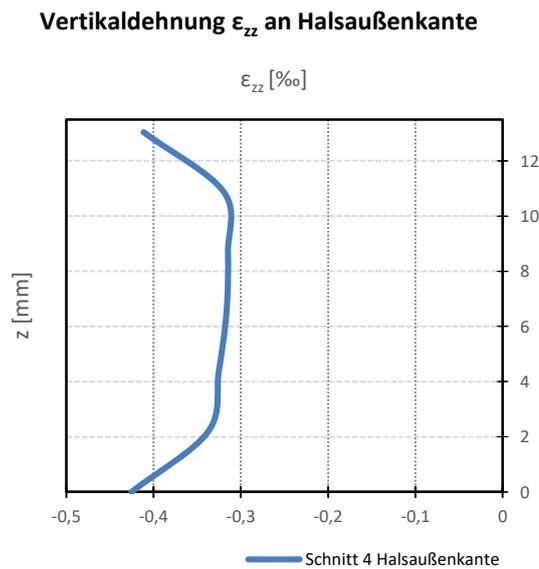
**Abbildung 2.6:** Schnittlinien für die Darstellung der Vertikaldehnungen

In Abbildung 2.7 sind die Verteilungen der Vertikaldehnungen im Schienenhals eines A 75 Profils, für eine Belastung von 200 kN dargestellt. Es sind die Verteilungen in den Schnitten 1 bis 3 und normal dazu in Längsrichtung, an der Außenfläche des Schienenhalses, ersichtlich. Daraus ist das grundsätzliche Verhalten der Dehnungen im Schienenhals ersichtlich. Am oberen und unteren Rand des Halses steigen die Dehnungen an den Übergängen zu den Ausrundungsradien deutlich an. Die Verteilung in der Mitte des Schienenhalses ist bis nahe zum Rand hin, nahezu konstant. Daher wird angestrebt die Messung mittels Dehnmessstreifen an der Außenseite in Halsmitte durchzuführen.



**Abbildung 2.7:** Verteilungen der Vertikalstauchungen in den Schnitten 1 – 3, sowie die Längsverteilungen an der Halsaußenfläche für das Schienenprofil A 75 unter einer Belastung von  $P = 200 \text{ kN}$  - Grundmodell

In Abbildung 2.8 ist die Dehnungsverteilung vertikal an der Halsaußenfläche (Schnitt 4 siehe Abbildung 2.6) entlang der Höhe dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass die Dehnungen über die Höhe des Halses eher konstant bleiben, und nur zu den Ausrundungsradien hin deutlich anwachsen. Dieses Verhalten ist in Hinsicht auf die Messung der Dehnungen sehr gutmütig, da die genaue Applikation der Dehnmessstreifen in der Regel sehr schwierig ist, und somit die genaue Lage der Dehnmessstreifen über die Halshöhe unbedeutend ist.



**Abbildung 2.8:** Verteilung der Vertikaldehnungen vertikal an der Halsaußenkante für das Schienenprofil A 75, bei einer Belastung von  $P = 200 \text{ kN}$  - Grundmodell

Aufgrund dieses Verhaltens der Dehnungsverteilung im Schienenhalsbereich wird festgelegt, dass als Ergebnisse der Parameterstudie die Vertikaldehnungen im Schnitt 1 in Halsmitte in Querrichtung (siehe Abbildung 2.6), sowie orthogonal dazu an der Halsaußenfläche in Längsrichtung dargestellt werden, und der Messpunkt in Halsmitte angeordnet wird.

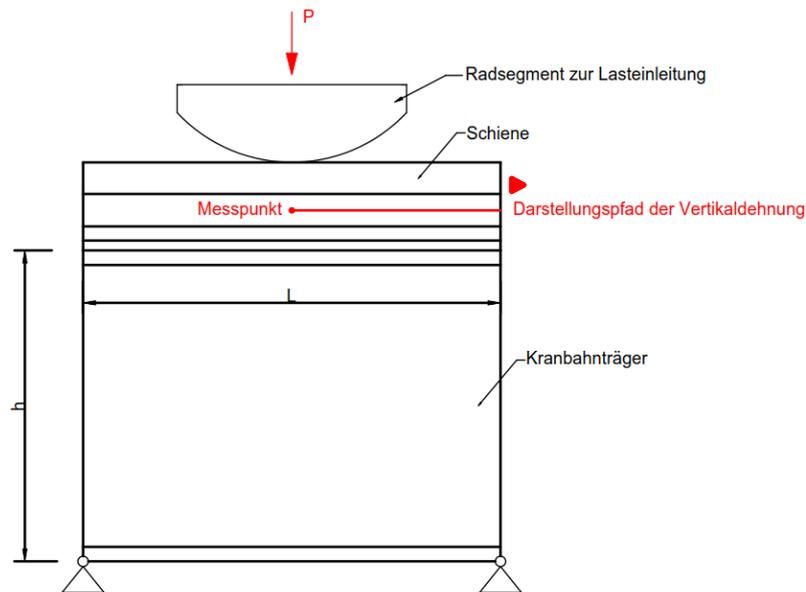
In Tabelle 2.1 sind die berechneten Maximalstauchungen am Messpunkt für alle untersuchten Schienenprofile angeführt. Die Belastung wurde hierbei in Abhängigkeit vom Schienenprofil gewählt, um immer ein linear elastisches Verhalten zu bewirken.

**Tabelle 2.1:** Obere Grenzwerte der maximalen Vertikalstauchungen am Messpunkt - Grundmodelle

Schienenprofil	Belastung P [kN]	$\epsilon_{zz,max}$ [‰]
A55	100	-0,303
A75	200	-0,316
A100	300	-0,299
A120	300	-0,259

### 2.5.2. Einfluss des Kranbahnträgers

a) Modell M1 mit Kranbahnträger:



**Abbildung 2.9:** Modell M1 mit Kranbahnträger, L = 400 mm

Um den Einfluss eines Kranbahnträgers, auf dem die Kranschiene gebettet ist, auf die Vertikaldehnungen am Messpunkt zu ermitteln, wird nun das Grundmodell um ein 400 mm langes Teilstück eines Kranbahnträgers erweitert (Abbildung 2.9). Dieses Modell M1 stellt auch eine Grenzwertbetrachtung dar, da die Stützweite des Kranbahnträgers untypisch kurz ist ( $L/h = 40/30 = 1,33$ ). Die Lasteinleitung erfolgt wieder zentrisch und mittig. Am Verlauf der Dehnungen in Abbildung 2.10 ist ersichtlich, dass sich die Lasteinleitung nun durch die nicht mehr starre, sondern auf einen Kranbahnträger gebettete Schiene, weniger konzentriert. Dadurch sinkt der Maximalwert der Vertikaldehnung am Messpunkt ab. Dieser Einfluss wurde für alle Schienenprofile ermittelt. Für jedes Schienenprofil wurden andere Ausgangsabmessungen der Kranbahnträger gewählt, welche im Zuge der Parameterstudie variiert wurden. Im Fall des Schienenprofils A 55 wurden als erste Annahme für den Kranbahnträger jeweils ein gewalztes und ein geschweißtes Profil gewählt, um mögliche Unterschiede zu untersuchen. Ebenfalls wurde, wie schon im Grundmodell, jedes Schienenprofil mit unterschiedlichem Lastniveaus belastet, um anschauliche Werte zu erhalten.

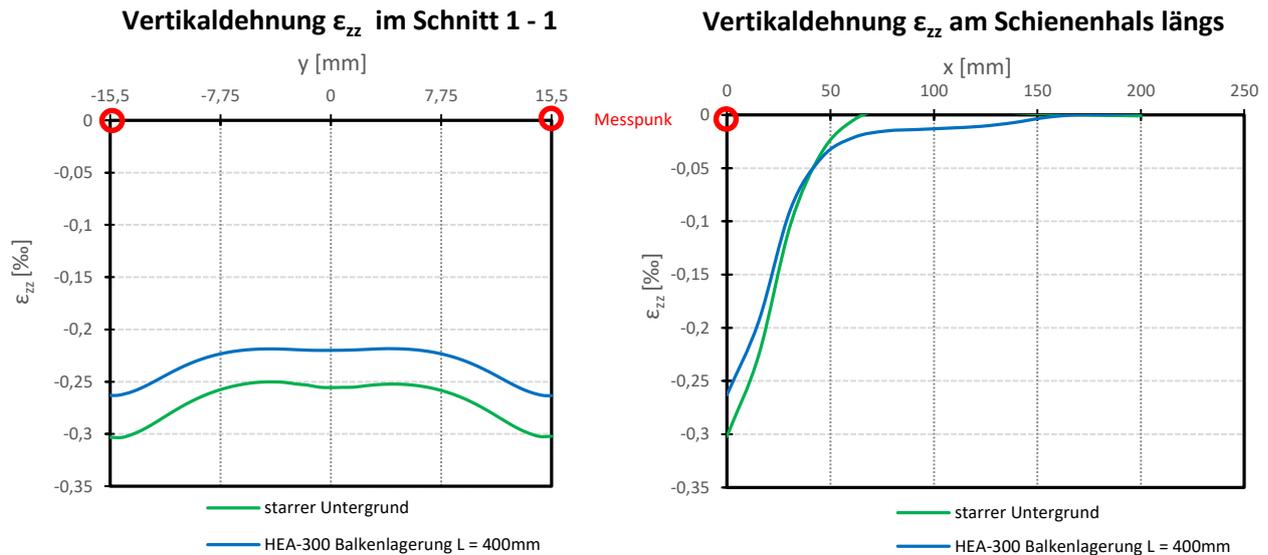
In Tabelle 2.2 sind die Abmessungen der Kranbahnträger, welche für jedes Schienenprofil separat als Ausgang für die Parameterstudie gewählt wurden, aufgelistet. Die Geometrie des Kranbahnträgers, und die Höhe der Belastung wurden jeweils auf die Geometrie der jeweiligen Kranschiene abgestimmt.

**Tabelle 2.2:** Gewählte Abmessungen der Kranbahnträger für die untersuchten Schienenprofile

Schienenprofil	Stützweite L [mm]	L/h	Abmessungen Kranbahnträger [mm]				Belastung P [kN]
			h	b	s	t	
A 55	400	1,33	HEA-300				100
	400	1,33	300	300	8	14	
A 75	1000	2,0	500	400	15	25	200
A 100	1000	1,0	1000	400	15	25	300
A 120	1000	1,0	1000	400	20	30	300

### b) Ergebnisse für das Schienenprofil A 55:

Für das Schienenprofil A 55 wird als erste Annahme von einem gewalzten Profil der Abmessungen HEA-300, bei einer Länge von  $L = 400$  mm ausgegangen. Die Darstellungen der Vertikaldehnungen, für eine Radlast von 100 kN, in Abbildung 2.10 zeigen, dass die Bettung auf einen Kranbahnträger dazu führt, dass die Dehnungen am Messpunkt abnehmen.



**Abbildung 2.10:** Änderung der Vertikaldehnungen im Schienenhals bei starrer Lagerung oder Lagerung auf Kranbahnträger HEA-300,  $L = 400$  mm für das Schienenprofil A 55, unter einer Belastung von  $P = 100$  kN

Bei starrer Bettung beträgt die maximale Vertikaldehnung unter der Belastung von  $P = 100$  kN:

$$\varepsilon_{zz,max} = 0,303 \text{ [‰]}$$

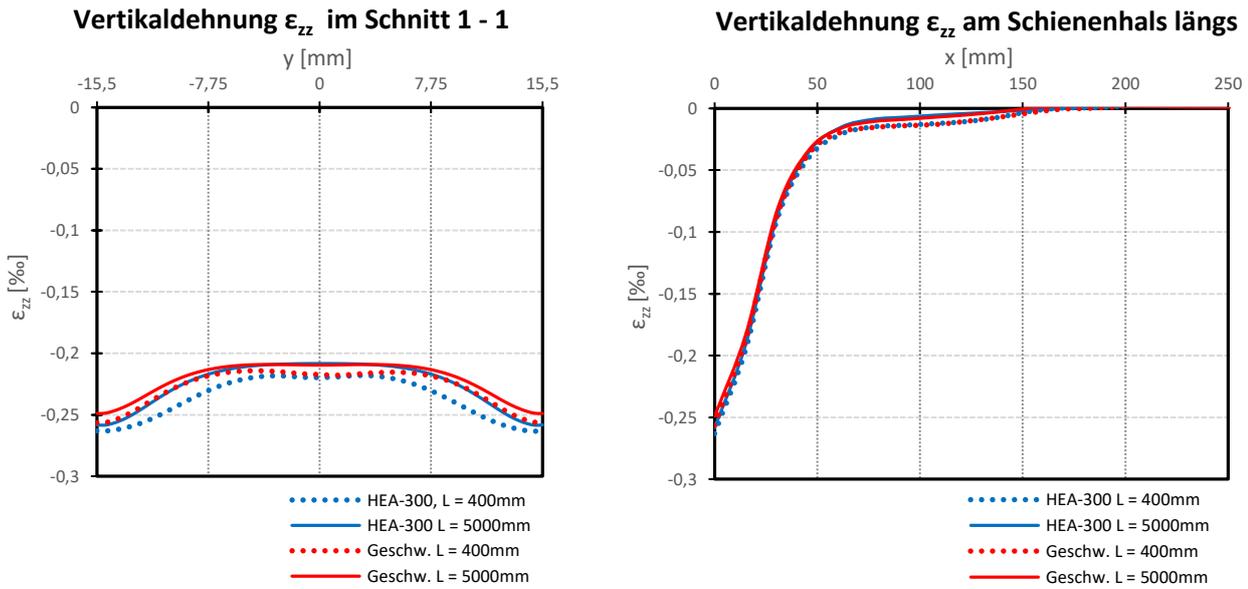
Bei der Bettung auf dem Kranbahnträger mit den Abmessungen eines HEA-300 Profils und  $L = 400$  mm:

$$\varepsilon_{zz,max} = 0,263 \text{ [‰]}$$

Es ist durch die Lagerung der Schiene auf einem Kranbahnträger ein Abfall der Stauchungen am Messpunkt von ca. 15%, gegenüber jenen der starr gebetteten Schiene, zu vermerken.

Das Profil HEA-300 für den Kranbahnträger wurde als erste Annahme getroffen, um einen grundlegenden Einfluss eines Kranbahnträgers auszumachen. In weiterer Folge werden für die Parameterstudie geschweißte Profile als Kranbahnträger modelliert. In Abbildung 2.11 wird der Unterschied zwischen dem gewalzten Profil HEA-300, und einem geschweißten Profil, mit ähnlichen Abmessungen dargestellt. Es zeigt sich, dass der Ausradius, zwischen Steg und Flansch des gewalzten Profils, eine versteifende Wirkung im Bereich der Lasteinleitung zwischen Kranschiene und -träger bewirkt. Daraus ist der Umstand zu erklären, dass die Vertikaldehnungen im Schienenhals, direkt unter der Last weiter abnehmen, wenn dieser versteifende Effekt entfernt wird.

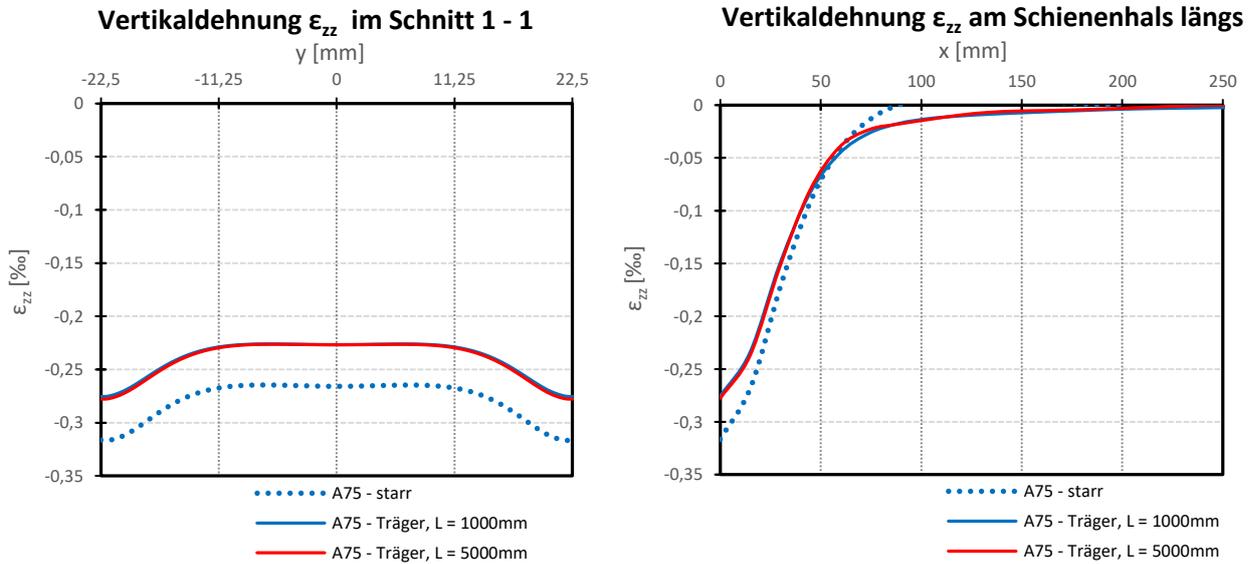
Zusätzlich wird in Abbildung 2.11 der Einfluss der Stützweite miteinbezogen. Die zugehörigen Dehnungsverteilungen wurden sowohl für  $L = 400$  mm ermittelt, als auch für  $L = 5000$  mm, mit jeweils einer Einzellast in Feldmitte. Die Lasteinleitung der Einzellast wurde, wie schon mehrfach erwähnt, durch zusätzliche Modellierung eines Kranradsegments realistisch abgebildet.



**Abbildung 2.11:** Gegenüberstellung der Dehnungsverteilungen bei Lagerung der Schiene auf einem gewalztem oder einem geschweißtem Profil für das Schienenprofil A 55, für eine Belastung von  $P = 100$  kN

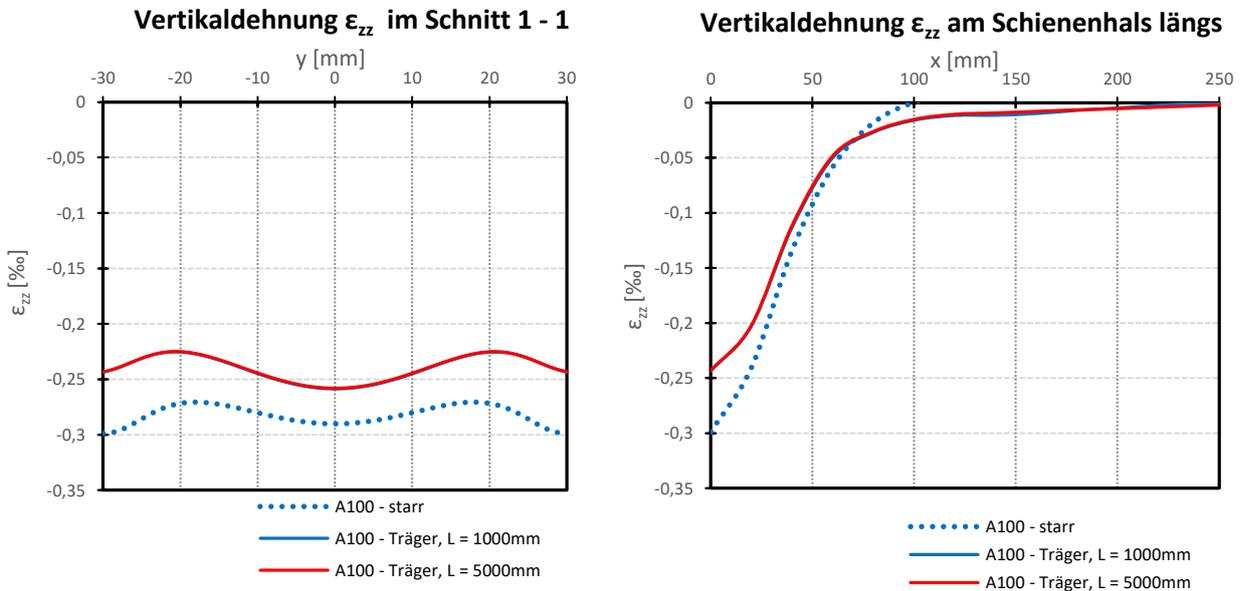
In Abbildung 2.12 bis Abbildung 2.14 sind die Gegenüberstellungen der Dehnungsverläufe bei starrer bzw. auf Kranbahnträger gebetteter Schiene, für die untersuchten Schientypen dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, wie schon beim Schienenprofil A 55, einen Abfall der Dehnungen, gegenüber dem Referenzfall der starren Bettung. Anhand der Ergebnisse kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss der Bettung der Schiene auf die Dehnungen, bei einer Rückrechnung von gemessenen Dehnungen auf die Radlast, berücksichtigt werden muss. Aus den Ergebnissen ist auch zu abzulesen, dass der Einfluss der Stützweite vernachlässigbar klein bleibt.

c) Ergebnisse für das Schienenprofil A 75:



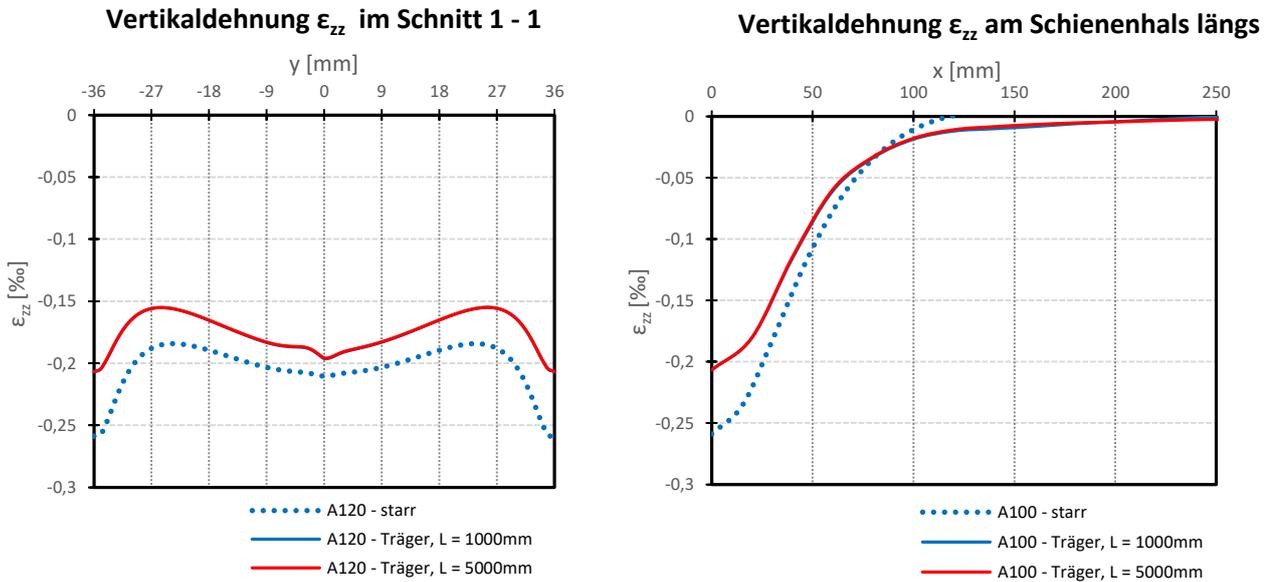
**Abbildung 2.12:** Gegenüberstellung der Dehnungsverteilungen bei starrer Lagerung und Lagerung auf Kranbahnträger (Abmessungen siehe Tabelle 2.2) für die Schiene A 75, bei einer Belastung von 200 kN

d) Ergebnisse für das Schienenprofil A 100:



**Abbildung 2.13:** Gegenüberstellung der Dehnungsverteilungen bei starrer Lagerung und Lagerung auf Kranbahnträger (Abmessungen siehe Tabelle 2.2) für die Schiene A 100, bei einer Belastung von  $P = 300$  kN

e) Ergebnisse für das Schienenprofil A 120:



**Abbildung 2.14:** Gegenüberstellung der Dehnungsverteilungen bei starrer Lagerung und Lagerung auf Kranbahnträger (Abmessungen siehe Tabelle 2.2) für die Schiene A 120, bei einer Belastung von  $P = 300$  kN

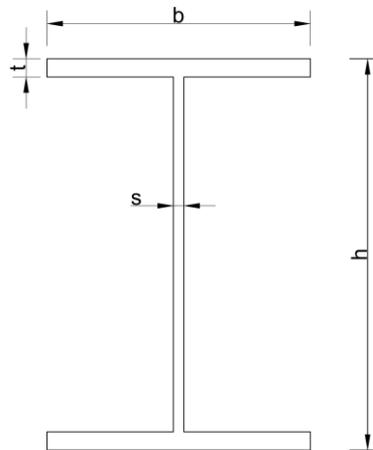
f) Gesamtergebnisse im Vergleich

In Tabelle 2.3 sind die Ergebnisse der oben angeführten Berechnungen in tabellarischer Form zusammengefasst. Dabei wird der Wert der maximalen Stauchung am festgelegten Messpunkt als Vergleichswert herangezogen.

**Tabelle 2.3:** Maximale Stauchungen am Messpunkt

Schienenprofil	A55		A75		A 100		A 120	
Stützweite L [mm]	400	5000	1000	5000	1000	5000	1000	5000
L/h	1,33	16,67	2,0	10,0	1,0	5,0	1,0	5,0
Belastung [kN]	100 kN		200 kN		300 kN		300 kN	
starre Bettung	-0,303	-	-0,316	-	-0,299	-	-0,259	-
Auf geschweißtem Träger	-0,256	-0,249	-0,275	-0,278	-0,243	-0,243	-0,207	-0,207
Auf gewalztem Träger	-0,263	-0,258	-	-	-	-	-	-
	$\epsilon_{zz}$ [‰] am Messpunkt							

Damit ist grundsätzlich gezeigt, dass der Kranbahnträger einen Einfluss auf die Größenordnung der Vertikaldehnungen am Messpunkt hat. Die Abmessungen des Kranbahnträgers sind keine genormten Größen. Sie werden aus Sicht der statischen Berechnung und konstruktiven Ausbildung jeder Kranbahnanlage vom Konstrukteur oder Statiker gewählt. Um eine zuverlässige Aussage über die vorhandene Radlast bei Kranüberfahrt treffen zu können, muss näher untersucht werden, von welchem Parameter des Kranbahnträgers der Einfluss auf die Vertikaldehnungen im Schienenhals am stärksten abhängt. In einer weiteren Parameterstudie werden daher die Abmessungen des Kranbahnträgers separat variiert, um eine Aussage treffen zu können, welche Auswirkungen die einzelnen Änderungen auf die Dehnungen am Messpunkt aufweisen. Es werden die Außenabmessungen (Höhe und Breite) der Träger, sowie die Blechstärken der Flansche und des Steges variiert (siehe Abbildung 2.15).



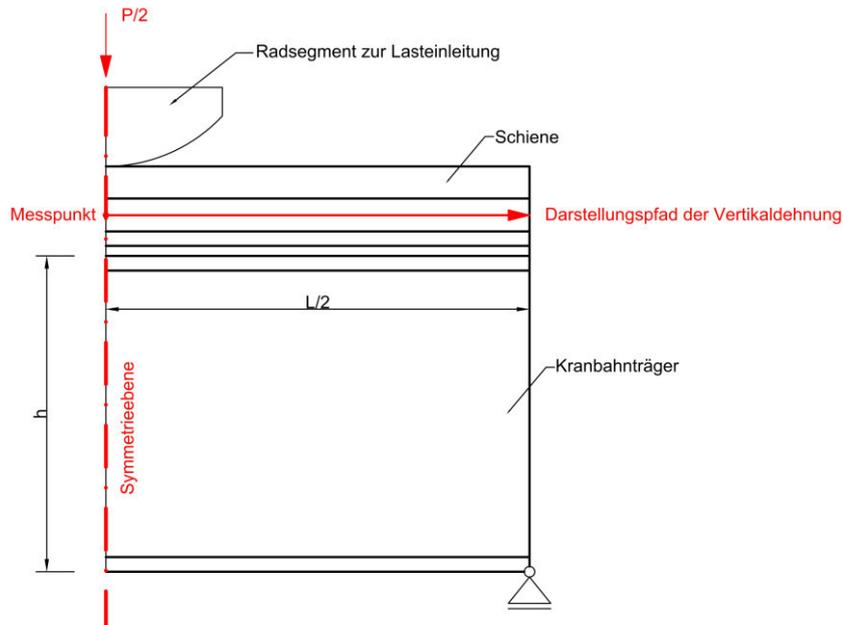
**Abbildung 2.15:** Variierte Parameter bzw. Abmessungen des Kranbahnträgers

### 2.5.3. Einfluss der Höhe des Kranbahnträgers

Der erste Parameter, der in dieser Studie variiert wurde, ist die Höhe  $h$  des Kranbahnträgers. Der Grundgedanke dahinter ist, dass ein höherer Träger eine höhere Biegesteifigkeit aufweist und dadurch der Widerstand, welcher der Radlast entgegenwirkt, größer wird und somit die Vertikaldehnungen im Schienenhals zunehmen.

Im ersten Schritt wird der  $L = 400$  mm lange Träger untersucht. Dadurch ist der Einfluss der Biegesteifigkeit eliminiert, da die Lastabtragung zu den Auflagerpunkten hin im 400mm langen Modell nicht über Biegung des Kranbahnträgers läuft, sondern über Scheibenwirkung des Steges stattfindet. Dadurch kann der Einfluss der Steghöhe direkt gegenübergestellt werden, ohne Einflüsse aus Trägerlänge und Biegung mitabzubilden.

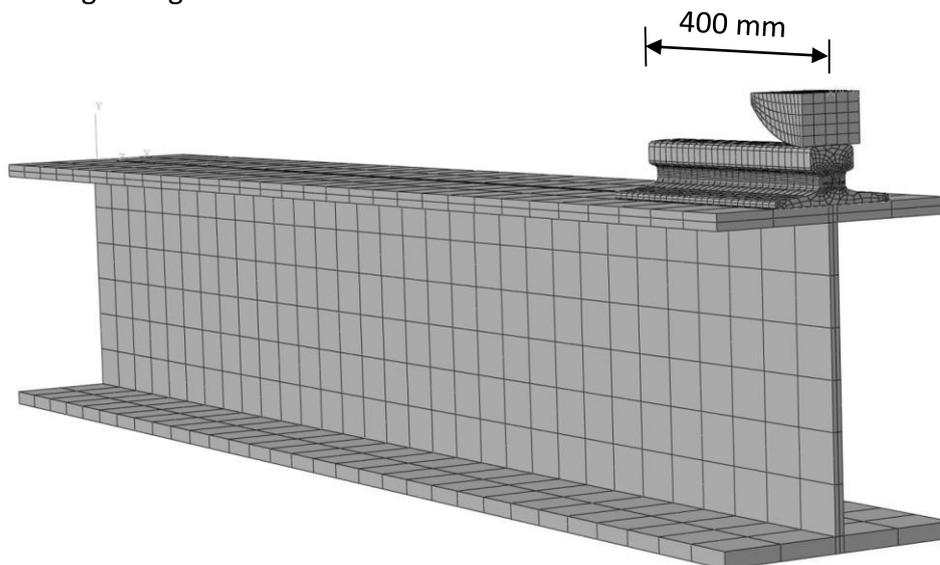
Im nächsten Schritt wird dann die Höhe  $h$  am  $L = 5000$  mm langen Einfeldbalken vergrößert, um den Einfluss der Trägerlänge und den Einfluss der Biegesteifigkeit des Trägers zu ermitteln.



**Abbildung 2.16:** Modell M2 für Berechnungen der Parameterstudie mit Symmetrierandbedingung

In Abbildung 2.17 ist das Modell für das Schienenprofil A 75, auf einen Kranbahnträger gebettet, beispielsweise dargestellt. Die Modelle für die anderen Schienenprofile sind nach demselben Prinzip aufgebaut.

Es ist anzumerken, dass die Länge des Kranbahnträgers im Modell vergrößert wurde, jedoch nicht die ganze Schiene mit abgebildet wurde. Da die Kontaktbedingung ein Abheben der Schiene zulässt (siehe 2.4.6), läuft die Berechnung des Modells stabiler, wenn nicht die ganze Schiene modelliert wird. Ebenfalls hat die Länge der Schiene keinen Einfluss auf die Ergebnisse, da eine freie Längsverschiebung vorausgesetzt wird und die Lastausbreitung in der Länge der modellierten Schiene bereits abgeklungen ist.



**Abbildung 2.17:** Modell M2: Modellierung – Schiene auf Kranbahnträger gelagert, mit Symmetrieebene

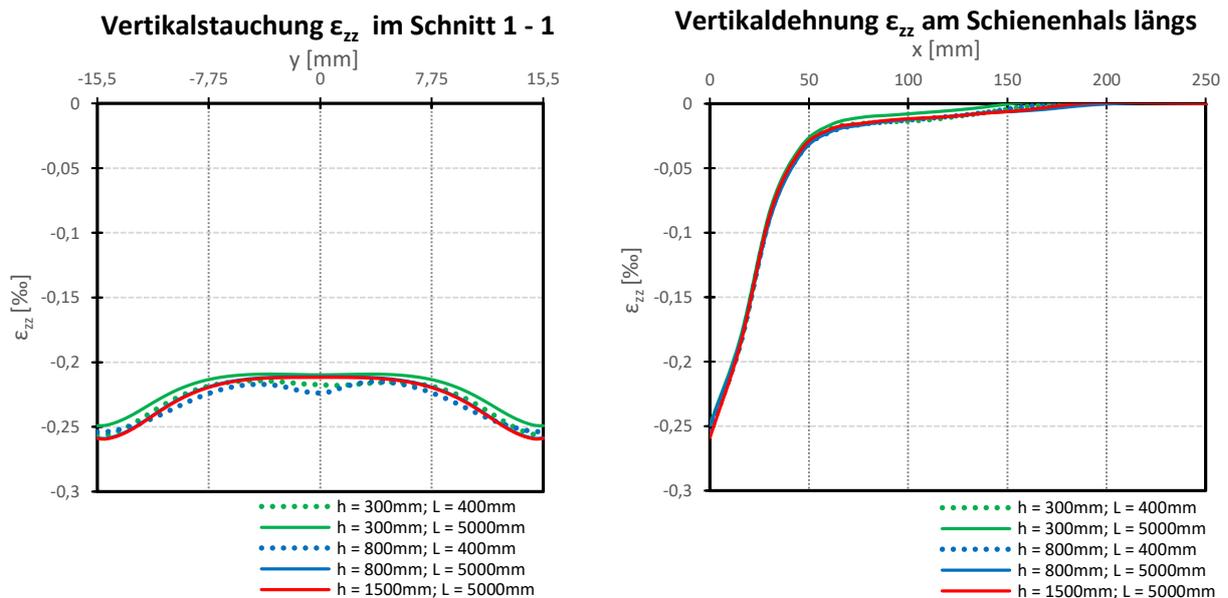
In Abbildung 2.18 sind die Dehnungsverteilungen im Querschnitt und längs an der Außenfläche des Schienenhalses, für die Variation der Kranbahnträgerhöhe, gegenübergestellt. Die sonstigen Abmessungen betragen:  $b = 300 \text{ mm}$ ,  $s = 8,0 \text{ mm}$ ,  $t = 14,0 \text{ mm}$  (siehe Tabelle 2.2).

Die Ergebnisse sind für das Schienenprofil A 55 dargestellt. Alle Modelle sind mit einer Einzellast von  $P = 100 \text{ kN}$  belastet worden.

Die Diagramme zeigen, dass die Erhöhung des Stegbleches von  $h = 300 \text{ mm}$  auf  $h = 800 \text{ mm}$  nahezu keinen Einfluss auf die Dehnungen am Messpunkt hat. Nur die Verteilung ändert sich in Quer- und Längsrichtung minimal.

In der Dehnungsverteilung im Querschnitt ist zu sehen, dass sich die Lastabtragung eher zur Mitte hin verlagert, weshalb die Dehnungen am Messpunkt minimal abfallen.

Für eine weitere Erhöhung des Kranbahnträgers von  $h = 800 \text{ mm}$  auf  $h = 1500 \text{ mm}$  Höhe, ist kein Einfluss mehr auszumachen.



**Abbildung 2.18:** Gegenüberstellung der Dehnungsverteilung am Schienenhals bei Variation der Kranbahnträgerhöhe  $h$  und Stützweite  $L$ , für das Schienenprofil A 55, bei einer Belastung von  $P = 100 \text{ kN}$  (Trägerquerschnitt:  $b = 300 \text{ mm}$ ,  $s = 8,0 \text{ mm}$ ,  $t = 14,0 \text{ mm}$ )

In Tabelle 2.4 sind die Stauchungen am Messpunkt, zufolge der Variation der Kranbahnträgerhöhe und -länge, für den Schientyp A 55 in tabellarischer Form zusammengefasst, bzw. gegenübergestellt.

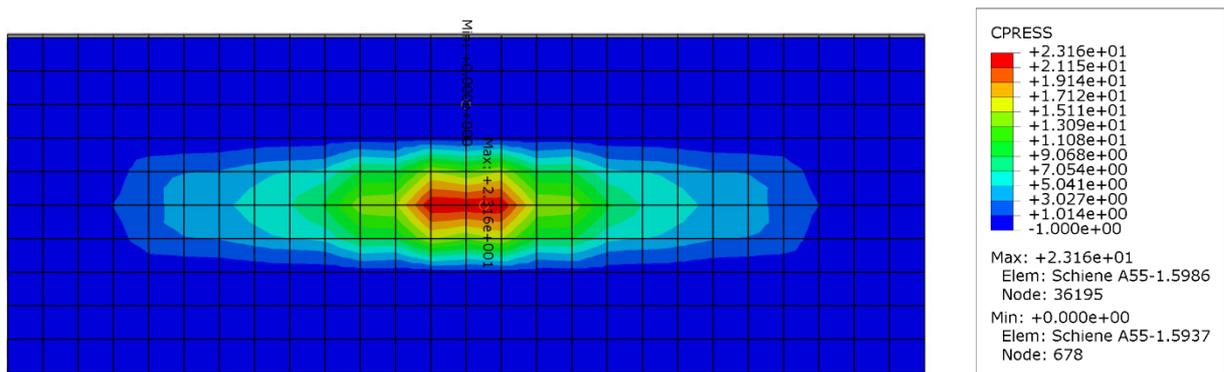
**Tabelle 2.4:** Stauchungen am Messpunkt zufolge Variation der Kranbahnträgerhöhe für das Schienenprofil A 55, bei einer Belastung von  $P = 100 \text{ kN}$  (Trägerquerschnitt:  $b = 300 \text{ mm}$ ,  $s = 8,0 \text{ mm}$ ,  $t = 14,0 \text{ mm}$ )

Stützweite L [mm]	Höhe h [mm]		
	300	800	1500
400	-0,256	-0,254	-
5000	-0,25	-0,258	-0,259
	$\epsilon_{zz}$ [‰] am Messpunkt des Schienenprofils A 55		

Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass durch die Erhöhung des Kranbahnträgers eine maximale Änderung (Abnahme) der Dehnungen von ca. 3% zu vermerken ist. Es wird auf die Untersuchung der Auswirkungen bei den anderen Schienenprofilen verzichtet, da davon ausgegangen wird, dass das Verhalten sich ähnlich einstellt, wie beim Schienentyp A 55.

### 2.5.4. Einfluss der Flanschbreite des Kranbahnträgers

Die Variation der Kranbahnträgerbreite  $b$  wurde im Zuge der Parameterstudie ebenfalls untersucht. In Abbildung 2.19 ist die im FE-Modell ermittelte Flächenpressung zwischen Fuß der Kranschiene und Obergurt des Kranbahnträgers, beispielhaft für das Schienenprofil A 55, unter einer Belastung von  $100 \text{ kN}$ , dargestellt. Dabei ist deutlich zu sehen, dass die Kontaktspannung nur sehr lokal über dem Steg des Kranbahnträgers hoch ist und zum Rand hin, sowie in der Länge rasch abklingt.



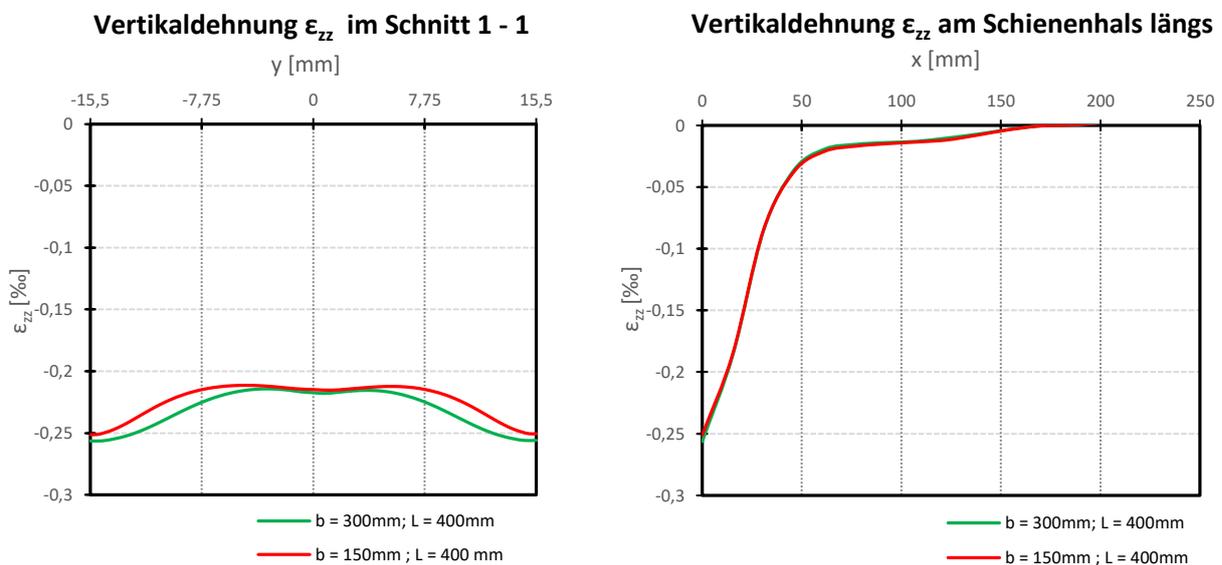
**Abbildung 2.19:** Flächenpressung zwischen Schienenfuß und Kranbahnträgerobergurt, des Schienenprofils A 55 bei einer Stützweite  $L = 400 \text{ mm}$  und bei einer Belastung von  $100 \text{ kN}$ . (Trägerquerschnitt:  $h = 300 \text{ mm}$ ,  $b = 300 \text{ mm}$ ,  $s = 8,0 \text{ mm}$ ,  $t = 14,0 \text{ mm}$ ).

Aus diesem Grund wird angenommen, dass die Breite des Flansches keinen Einfluss auf die zu messenden Vertikaldehnungen hat. Deshalb wird nur der Grenzfall untersucht, welcher sich einstellt, wenn die Breite des Obergurtes auf die Breite des Schienenfußes reduziert wird. Die

Berechnungen wurden nur für das Schienenprofil A 55 durchgeführt. Auf die Erstellung eines entsprechenden Modells für die anderen Schienenprofile wurde verzichtet, da keine maßgebende Änderung auf die Dehnungen im Schienenhals erwartet wird.

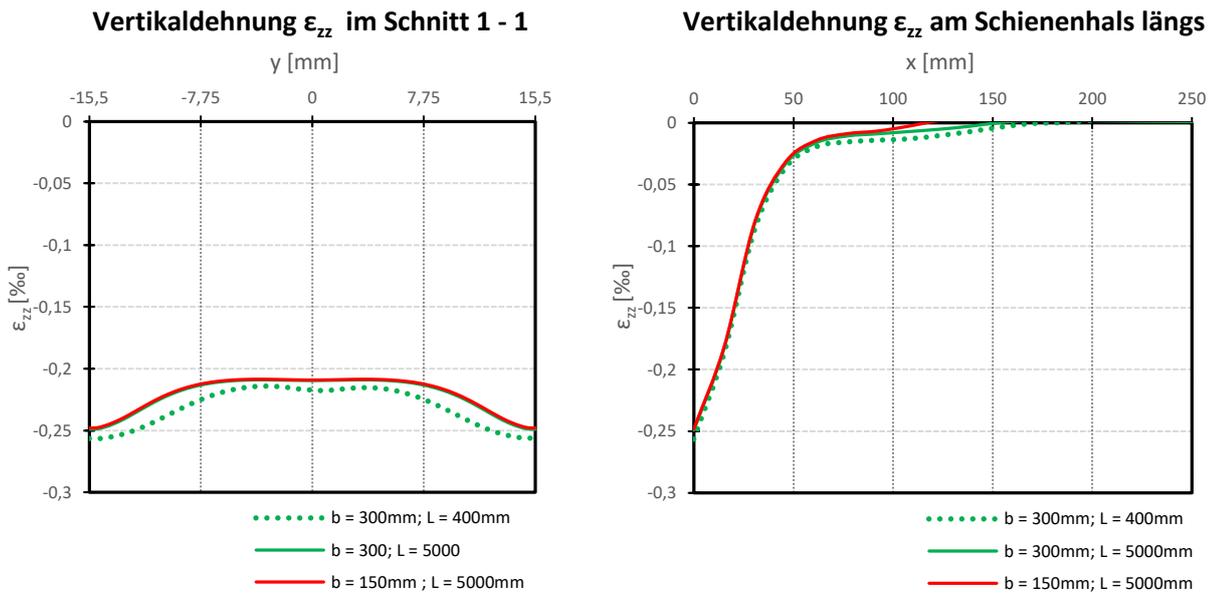
Für das Schienenprofil A 55 bedeutet das, dass die Breite des vorhandenen Kranbahnträgers von 300 mm auf 150 mm reduziert wurde, was der Breite des Schienenfußes entspricht. Die sonstigen Trägerabmessungen betragen:  $h = 300$  mm,  $s = 8,0$  mm,  $t = 14,0$  mm

In Abbildung 2.20 ist die Gegenüberstellung der Dehnungsverläufe für die reduzierte Breite, sowohl am  $L = 400$  mm langem, als auch am  $L = 5000$  mm langem Modell, für das Schienenprofil A 55, unter einer Belastung von 100 kN, ersichtlich. Es ist zu erkennen, dass sich die Verläufe in Quer- und Längsrichtung geringfügig ändern, jedoch die Dehnungen am Messpunkt keine signifikante Erhöhung oder Reduzierung aufweisen.



**Abbildung 2.20:** Gegenüberstellung der Dehnungsverläufe für eine Verringerung der Kranbahnträgerbreite für das Schienenprofil A 55 bei  $L = 400$  mm Stützweite, bei einer Belastung von  $P = 100$  kN (Trägerquerschnitt:  $h = 300$  mm,  $s = 8,0$  mm,  $t = 14,0$  mm).

In Abbildung 2.21 ist die Änderung der Systemlänge und der damit zusammenhängende Einfluss auf die Vertikaldehnungen am Messpunkt dargestellt. Es zeigt sich ein Abfall der Vertikaldehnungen bei einem längeren Kranbahnträger. Ebenfalls zeigt sich, dass der Einfluss der Breite beim längeren Kranbahnträger vernachlässigbar klein ist.



**Abbildung 2.21:** Gegenüberstellung der Dehnungsverläufe für eine Verringerung der Kranbahnträgerbreite für das Schienenprofil A 55 bei L = 5000 mm Stützweite, für eine Belastung von P = 100 kN. (Trägerquerschnitt: h = 300 mm, s = 8,0 mm, t = 14,0 mm)

Die Ergebnisse aus Tabelle 2.5 zeigen eine Auswirkung aus der Verringerung der Flanschbreite auf 150mm von unter 2%. Damit ist gezeigt, dass die Flanschbreite des Kranbahnträgers keinen maßgebenden Einfluss auf die Dehnungen am Messpunkt hat, und somit auf eine Betrachtung des Verhaltens bei den anderen Schienenprofilen verzichtet wurde.

**Tabelle 2.5:** Stauchungen am Messpunkt zufolge Verringerung der Flanschbreite für das Schienenprofil A 55, bei einer Belastung von P = 100 kN (Trägerquerschnitt: h = 300 mm, s = 8,0 mm, t = 14,0 mm)

Stützweite L [mm]	L/h [-]	Breite b [mm]	
		300	150
400	1,33	-0,256	-0,251
5000	16,67	-0,250	-0,248
		ε <sub>zz</sub> [‰] am Messpunkt	

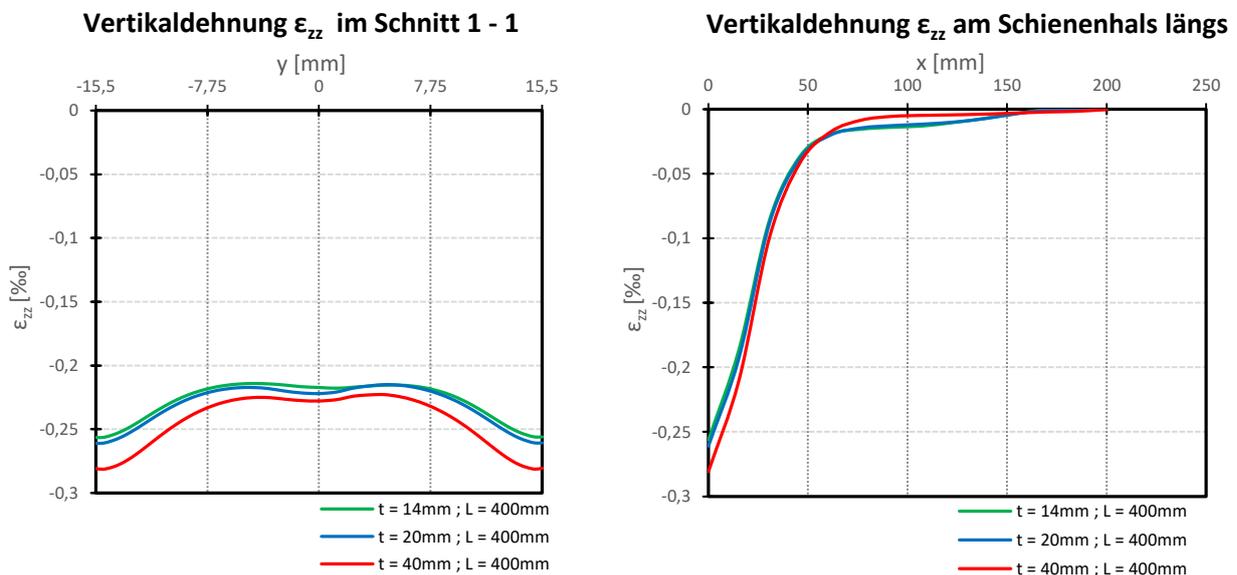
### 2.5.5. Einfluss der Flanschstärke des Kranbahnträgers

Bisher kann festgestellt werden, dass die Außenabmessungen (Höhe h, Breite b) des Kranbahnträgers auf die Dehnungen am Messpunkt nur einen geringen Einfluss haben. Dieser Umstand wird durch die sehr lokale Lasteinleitung erklärt, wodurch die Dehnungsänderung sehr stark von der Steifigkeit des Lasteinleitungsbereichs abhängt. Aus diesem Grund wird in Folge eine ausführliche Untersuchung, der Einflüsse der Blechstärken von Flansch und Steg, durchgeführt. Eine

Erhöhung der Blechstärken führt zu einer Erhöhung der vertikalen Bettung im Lasteinleitungsbereich. Deshalb wird mit einem maßgebenden Einfluss dieser Parameter gerechnet.

a) Ergebnisse für das Schienenprofil A 55:

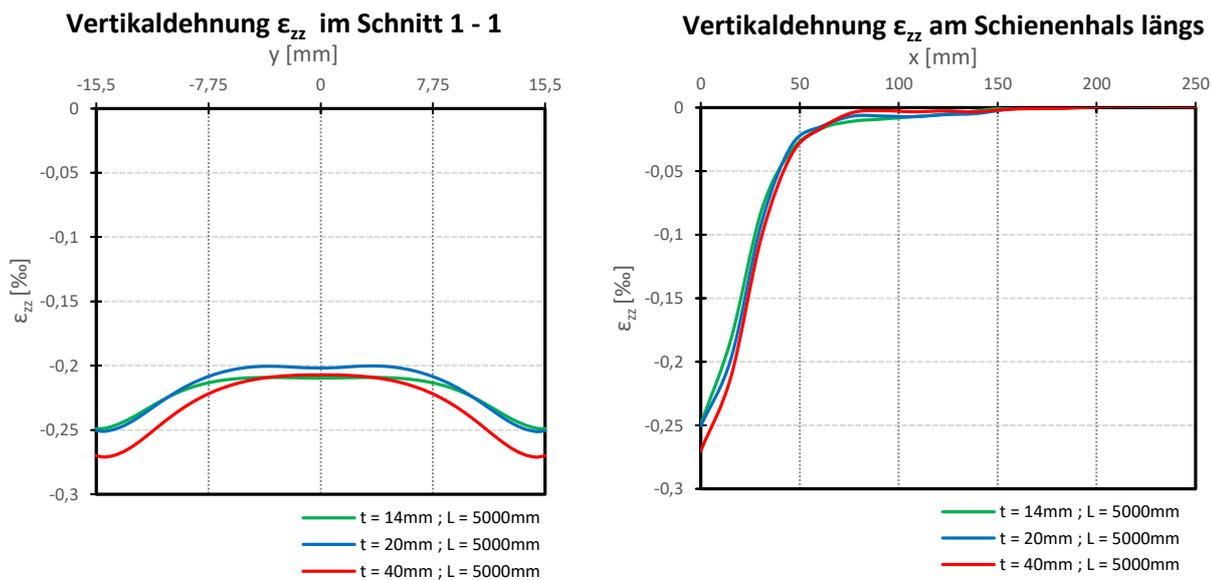
In Abbildung 2.22 sind die Dehnungsverläufe im Schienenhals des Schienenprofils A 55, bei Erhöhung der Blechstärke des Kranbahnträgerobergurts für eine Belastung von 100 kN dargestellt. Die Ergebnisse sind für das Modell mit einer Länge von  $L = 400$  mm dargestellt. Die Erhöhung der Steifigkeit des Lasteinleitungsbereichs führt bei den höheren Blechstärken zu einer konzentrierteren Lasteinleitung, was zu einem Anstieg der vertikalen Stauchungen am Messpunkt führt.



**Abbildung 2.22:** Gegenüberstellung der Dehnungsverläufe bei Erhöhung der Blechstärke des Kranbahnträgergurts für das Schienenprofil A 55 bei  $L = 400$  mm und bei einer Belastung von 100 kN (Trägerquerschnitt:  $h = 300$  mm,  $b = 300$  mm,  $s = 8,0$  mm)

In Abbildung 2.23 sind die entsprechenden Ergebnisse für eine Stützweite von  $L = 5000$  mm dargestellt. Der Einfluss, welcher aus der Erhöhung der Blechstärke des Obergurts kommt, verhält sich in etwa gleich wie bei  $L = 400$  mm.

## 2. Numerische Vorstudie - Parameterstudie



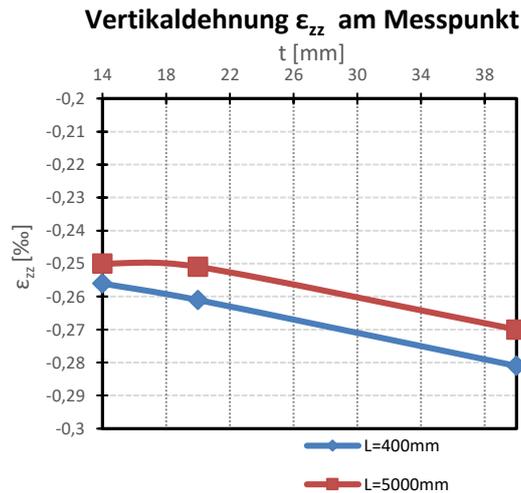
**Abbildung 2.23:** Gegenüberstellung der Dehnungsverläufe bei Erhöhung der Blechstärke des Kranbahnträgergurts für das Schienenprofil A 55 und bei  $L = 5000\text{ mm}$  Stützweite, bei einer Belastung von  $P = 100\text{ kN}$  (Trägerquerschnitt:  $h = 300\text{ mm}$ ,  $b = 300\text{ mm}$ ,  $s = 8,0\text{ mm}$ )

Eine tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Tabelle 2.6 angeführt.

**Tabelle 2.6:** Stauchungen am Messpunkt bei Erhöhung der Flanschstärke für das Profil A 55, bei einer Belastung von  $P = 100\text{ kN}$  (Trägerquerschnitt:  $h = 300\text{ mm}$ ,  $b = 300\text{ mm}$ ,  $s = 8,0\text{ mm}$ )

Stützweite L [mm]	L/h	Flanschstärke t [mm]		
		14	20	40
400	1,33	-0,256	-0,261	-0,281
5000	16,67	-0,250	-0,251	-0,270
$\epsilon_{zz}$ [%] am Messpunkt				

Der Einfluss der Blechstärke des Flansches weist für beide untersuchten Stützweiten eine Zunahme der Stauchungen am Messpunkt, laut Tabelle 2.6, auf. In Abbildung 2.24 ist der Verlauf dieser Zunahme für die untersuchten Flanschstärken dargestellt. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei weiterer Erhöhung die Stauchungen weiter zunehmen werden und sich im Grenzfall dem Wert annähern, welcher im Grundmodell für die starre Bettung errechnet wurde.



**Abbildung 2.24:** Zunahme der Stauchungen am Messpunkt in Abhängigkeit der Flanschstärke t, für das Schienenprofil A 55, bei einer Belastung von P = 100 kN. (Trägerquerschnitt: h = 300 mm, b = 300 mm, s = 8,0 mm)

Aufgrund des deutlichen Einflusses der Blechstärke des Trägergurts auf die vertikalen Dehnungen im Schienenhals, wurden in weiterer Folge dieselben Untersuchungen des Einflusses der Gurtstärke des Kranbahnträgers für die Schienenprofile A 75, A 100 und A 120, für verschiedene Stützweiten und Blechstärken des Kranbahnträgers durchgeführt. Es wird im ersten Ansatz von einem linearen Zuwachs der Dehnungen, in Abhängigkeit von der Flanschstärke, ausgegangen. Deshalb wurden für die folgenden Schienenprofile nur jeweils zwei Blechstärken untersucht. Als Ausgangslänge wurde hierbei ein Kranbahnträger mit einer Stützweite von L = 1000 mm gewählt und im zweiten Schritt auf L = 5000mm erhöht.

b) Ergebnisse für das Schienenprofil A 75:

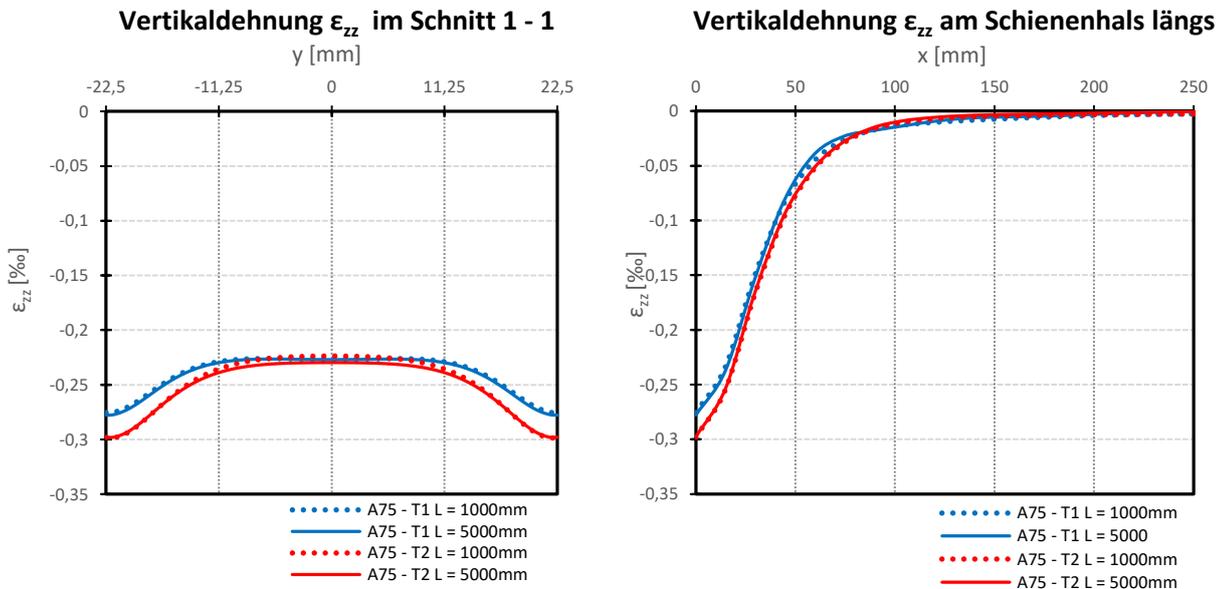
In Tabelle 2.7 sind die Abmessungen der gewählten Kranbahnträger für die Untersuchung des Parameters Gurtstärke des Kranbahnträgers angeführt. Die Vertikaldehnungen wurden für das Schienenprofil A 75 mit einer angenommenen Radlast von P = 200 kN in Feldmitte ermittelt.

**Tabelle 2.7:** Abmessungen der gewählten Kranbahnträger für das Schienenprofil A 75

Kranbahnträger	Abmessungen [mm]				Belastung P [kN]
	H	b	s	t	
T1	500	400	15	<b>25</b>	200
T2	500	400	15	<b>50</b>	200

## 2. Numerische Vorstudie - Parameterstudie

In Abbildung 2.25 werden die Dehnungsverläufe im Schienenhals für die gewählten Kranbahnträgerabmessungen dargestellt. Es ist ein Anstieg der Dehnungen bei höherer Blechstärke des Flansches zu vermerken, was sich auf dieselbe Weise, wie beim Schienentyp A 55, erklären lässt. Es ist noch anzumerken, dass der Einfluss der Stützweite beim Schienenprofil A 75, gegenüber den Berechnungen bei dem Schienenprofil A 55, vernachlässigbar klein ist.



**Abbildung 2.25:** Gegenüberstellung der Dehnungsverteilungen bei Erhöhung der Blechstärke des Kranbahnträgergurts von 25 mm auf 50 mm für das Schienenprofil A 75, bei einer Belastung von  $P = 200$  kN. (Trägerabmessungen nach Tabelle 2.7)

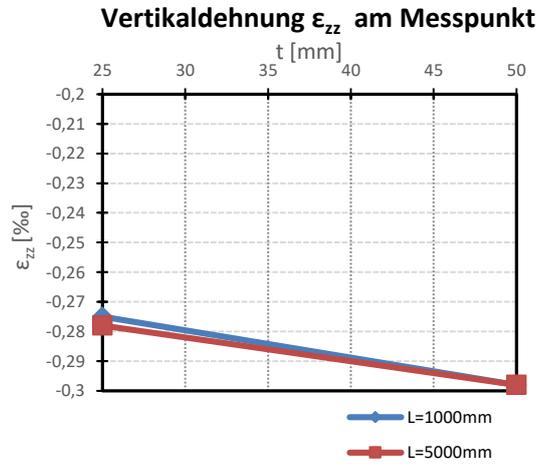
In Tabelle 2.8 sind die vertikalen Stauchungen am Messpunkt, bei Erhöhung der Flanschstärke, für die beiden Trägerlängen  $L = 1000$  mm und  $L = 5000$  mm, und einer Belastung von 200 kN, für das Schienenprofil A 75 tabellarisch dargestellt.

**Tabelle 2.8:** Stauchungen am Messpunkt bei Erhöhung der Flanschstärke für das Profil A 75, bei einer Belastung von  $P = 200$  kN (Trägerabmessungen nach Tabelle 2.7)

Stützweite L [mm]	Flanschstärke t [mm]	
	25	50
1000	-0,275	-0,298
5000	-0,278	-0,298
	$\epsilon_{zz}$ [‰] am Messpunkt	

In Abbildung 2.26 ist die Zunahme der Stauchungen, in Abhängigkeit der Flanschstärke für das Schienenprofil A 75 dargestellt. Das Verhalten ist ähnlich, wie zuvor beim Schienenprofil A 55

gezeigt. Es ist in der Darstellung zu sehen, dass der Einfluss der Stützweite bei steigender Flanschstärke bei diesem Schienenprofil sinkt.



**Abbildung 2.26:** Zunahme der Stauchungen am Messpunkt in Abhängigkeit der Flanschstärke  $t$ , für das Schienenprofil A 75, bei einer Belastung von  $P = 200$  kN. (Trägerabmessungen nach Tabelle 2.7)

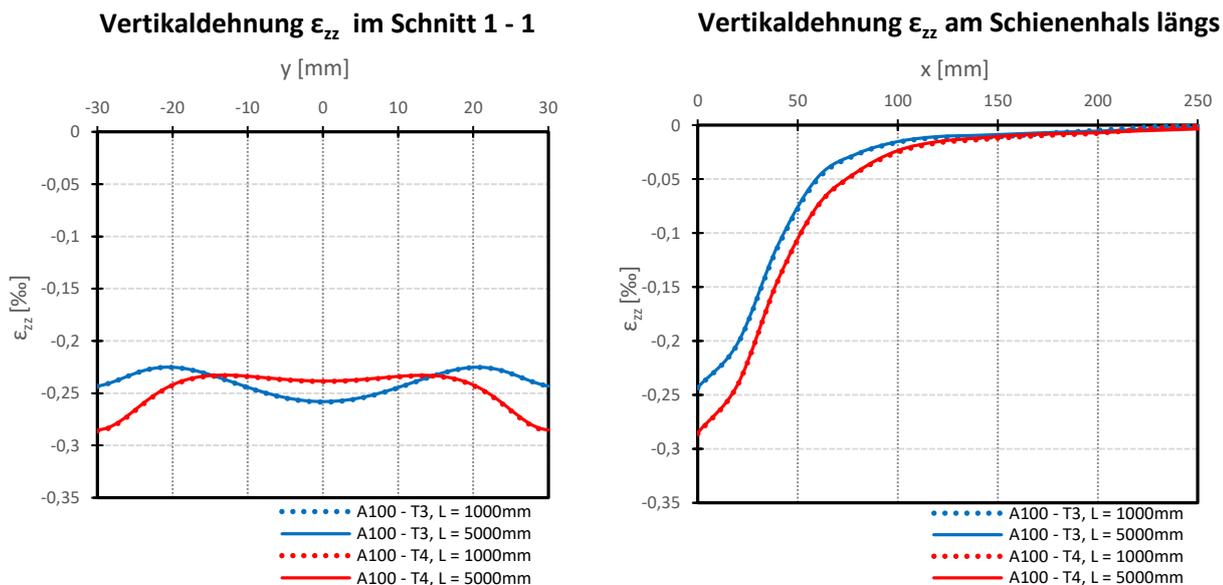
c) Ergebnisse für das Schienenprofil A 100:

Die Untersuchung am Schienenprofil A 100 wurde mit den gewählten Kranbahnträgern laut Tabelle 2.9 und einer Radlast von 300 kN in Feldmitte durchgeführt.

**Tabelle 2.9:** Abmessungen der gewählten Kranbahnträger für das Schienenprofil A 100

Kranbahnträger	Abmessungen [mm]				Belastung P [kN]
	h	b	s	t	
T3	1000	400	15	<b>25</b>	300
T4	1000	400	15	<b>50</b>	300

In Abbildung 2.27 sind die Verläufe der Vertikaldehnungen in Quer- und Längsrichtung am Schienenhals, für das Schienenprofil A 100, unter einer Belastung von 300 kN, dargestellt. Es zeigt sich bei Erhöhung der Flanschstärke, eine Erhöhung der Vertikaldehnungen am Messpunkt.



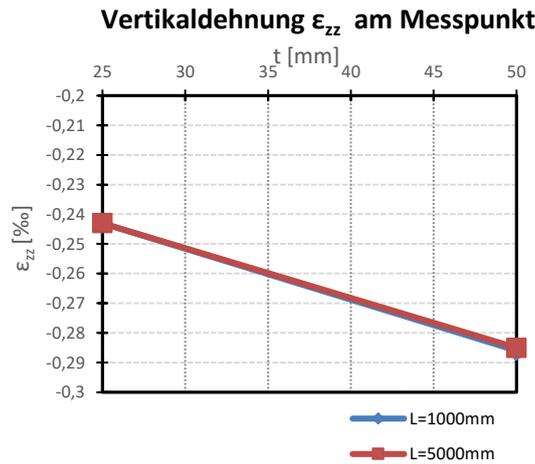
**Abbildung 2.27:** Gegenüberstellung der Dehnungsverteilungen bei Erhöhung der Blechstärke des Kranbahnträgergurts für das Schienenprofil A 100, bei einer Belastung von P = 300 kN (Trägerabmessungen nach Tabelle 2.9)

In Tabelle 2.10 sind die Ergebnisse der Berechnungen, bei Variation der Flanschstärke zum Vergleich dargestellt. Die Tabelle zeigt die Dehnungen am Messpunkt für das Schienenprofil A 100, bei Trägerlängen von L = 1000 mm und L = 5000 mm und einer Belastung von 300 kN.

**Tabelle 2.10:** Stauchungen am Messpunkt bei Erhöhung der Flanschstärke für das Profil A 100, bei einer Belastung von 300 kN. (Trägerabmessungen nach Tabelle 2.9)

Stützweite L [mm]	Flanschstärke t [mm]	
	25	50
1000	-0,243	-0,286
5000	-0,243	-0,285
	ε <sub>zz</sub> [%] am Messpunkt	

Abbildung 2.28 zeigt die Zunahme der Dehnungen am Messpunkt in Abhängigkeit der Flanschstärke.



**Abbildung 2.28:** Zunahme der Stauchungen am Messpunkt in Abhängigkeit der Flanschstärke t, für das Schienenprofil A 100, bei einer Belastung von P = 300 kN. (Trägerabmessungen nach Tabelle 2.9)

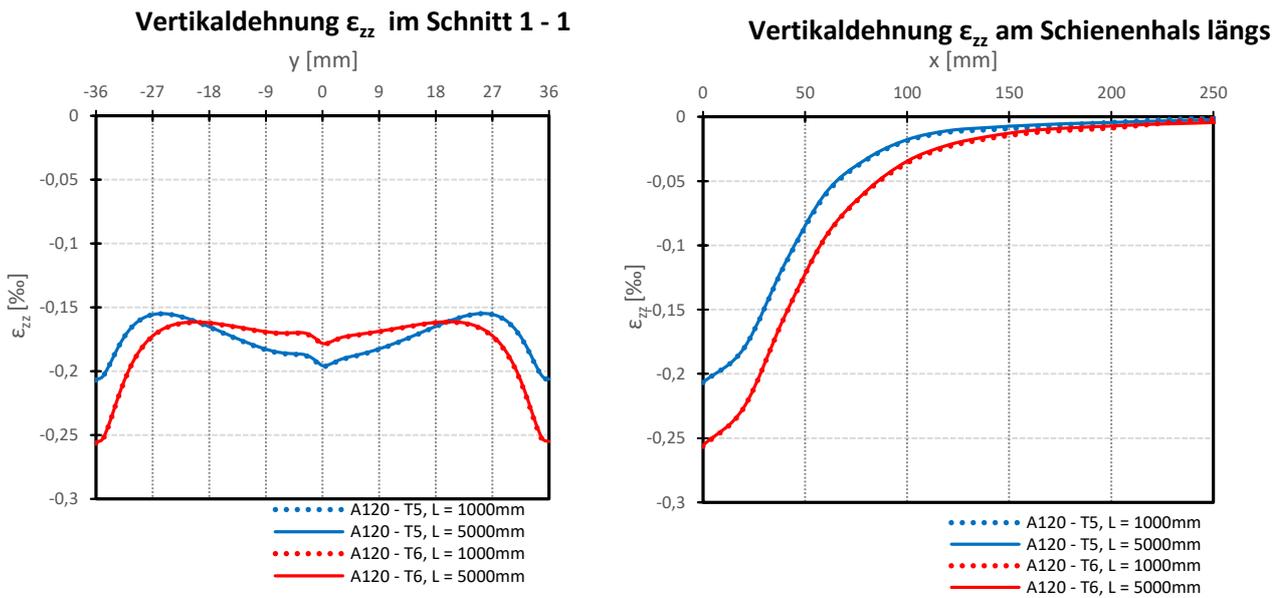
d) Ergebnisse für das Schienenprofil A 120:

Das Schienenprofil A 120 wurde bei der Untersuchung mit Kranbahnträger mit den Trägerabmessungen laut Tabelle 2.11 modelliert und in Feldmitte mit einer Radlast von 300 kN belastet.

**Tabelle 2.11:** Abmessungen der gewählten Kranbahnträger für das Schienenprofil A 120

Kranbahnträger	Abmessungen [mm]				Belastung P [kN]
	h	b	s	t	
T5	1000	400	20	<b>30</b>	300
T6	1000	400	20	<b>60</b>	300

In Abbildung 2.29 sind die Dehnungsverläufe am Schienenhals, in Quer- und Längsrichtung, für das Schienenprofil A 120 dargestellt. Die Berechnungen wurden mit den oben angeführten Kranbahnträger und für eine Belastung von 300 kN durchgeführt. Die Diagramme zeigen die Änderung der Dehnungsverläufe bei Erhöhung der Flanschstärke. Es ist eine Erhöhung der Dehnungen bei größerer Flanschstärke zu erkennen. Der Einfluss der Stützweite ist vernachlässigbar klein.



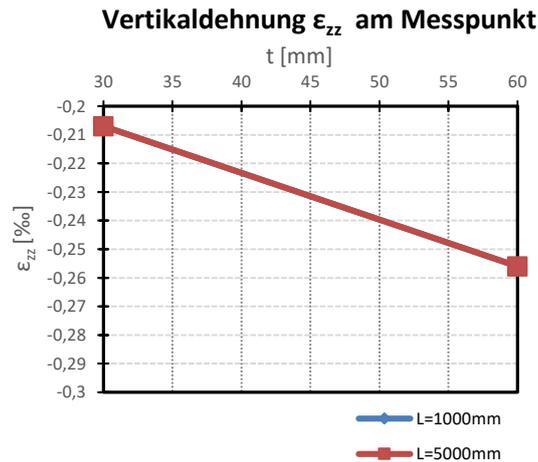
**Abbildung 2.29:** Gegenüberstellung der Dehnungsverteilungen bei Erhöhung der Blechstärke des Kranbahnträgers für das Schienenprofil A 120, bei einer Belastung von  $P = 300$  kN. (Trägerabmessungen nach Tabelle 2.11)

Tabelle 2.12 zeigt die maximalen Stauchungen am Messpunkt, im Vergleich, bei Erhöhung der Flanschstärke der Kranbahnträger für das Schienenprofil A 120, bei einer Belastung von  $P = 300$  kN

**Tabelle 2.12:** Stauchungen am Messpunkt bei Erhöhung der Flanschstärke für das Profil A 120, bei einer Belastung von  $P = 300$  kN. (Trägerabmessungen nach Tabelle 2.11)

Stützweite L [mm]	Flanschstärke t [mm]	
	30	60
1000	-0,207	-0,256
5000	-0,207	-0,256
	$\epsilon_{zz}$ [%] am Messpunkt	

Abbildung 2.30 zeigt die maximalen Stauchungen am Messpunkt, gegenüber den Flanschstärken aufgetragen.



**Abbildung 2.30:** Zunahme der Stauchungen am Messpunkt in Abhängigkeit der Flanschstärke  $t$ , für das Schienenprofil A 120, bei einer Belastung von  $P = 300$  kN. (Trägerabmessungen nach Tabelle 2.11)

Es ist bei der Untersuchung aller Schienenprofile ein maßgebender Einfluss der Blechstärke des Kranbahnträgerobergurtes auf die Lastableitung und auf die vertikalen Dehnungen am Messpunkt festzustellen. Ein Einfluss der Stützweite ist beim Schienenprofil A 55 auszumachen, bei den übrigen Schienenprofilen nicht mehr. Aus den Ergebnissen zeigt sich ein nahezu linearer Zuwachs der Stauchungen bei Erhöhung der Blechstärke, welcher sich dem Grenzfall bei starrer Bettung annähert. Es kann vermerkt werden, dass der Einfluss der Obergurtstärke des Kranbahnträgers bei der Ermittlung der Radlast berücksichtigt werden muss.

### 2.5.6. Einfluss der Stegblechstärke des Kranbahnträgers

Diese Untersuchung soll den Einfluss der Stegblechstärke des Kranbahnträgers auf die vertikalen Dehnungen im Schienenhals zeigen. Grundlegend liegt hier dieselbe Überlegung, wie bei der Variation der Flanschstärke, vor. Die Verstärkung des Stegblechs führt zu einer höheren Steifigkeit im Lasteinleitungsbereich des Schienenprofils. Das führt wieder zu einer konzentrierteren Lasteinleitung unter dem Kranrad, wodurch mit einer Erhöhung der Vertikalstauchungen am Messpunkt zu rechnen ist. Die Berechnungen wurden für alle vier untersuchten Schienenprofile, in gleicher Weise wie bei den Parametern zuvor, durchgeführt. Als Ergebnisse sind hier wieder die Dehnungsverteilungen im Halsquerschnitt, sowie an der Halsaußenfläche, dargestellt und erläutert.

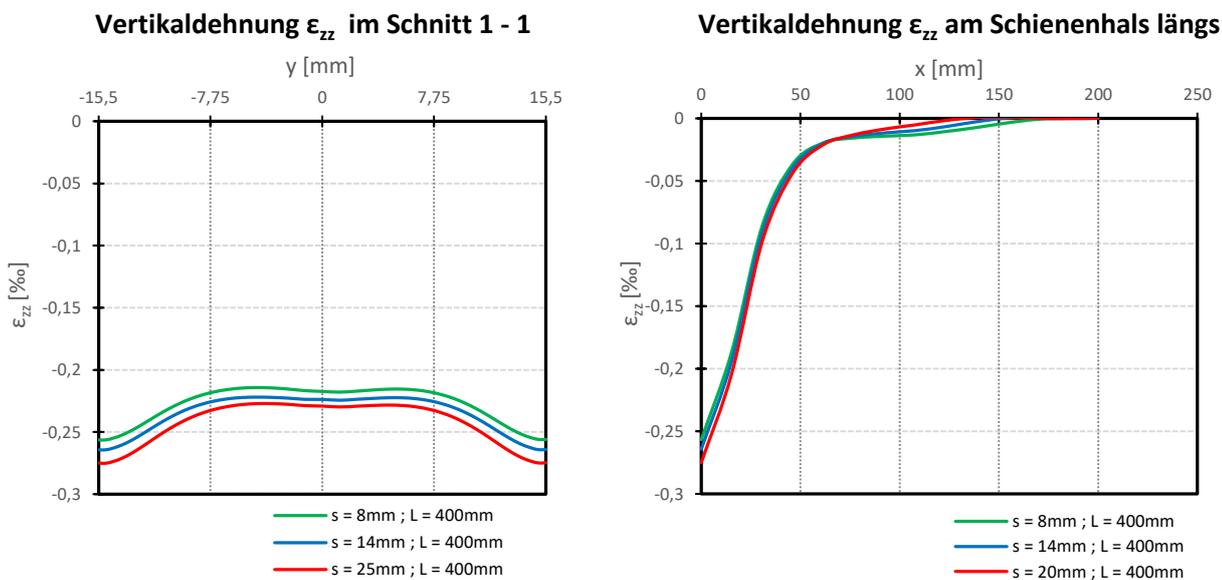
#### a) Ergebnisse für das Schienenprofil A 55:

Um einen grundsätzlichen Einfluss der Stegblechstärke festzustellen, wurden die Berechnungen im ersten Schritt am Modell mit einer Stützweite von  $L = 400$  mm und einer Stegdicke von  $s = 8,0$  mm

## 2. Numerische Vorstudie - Parameterstudie

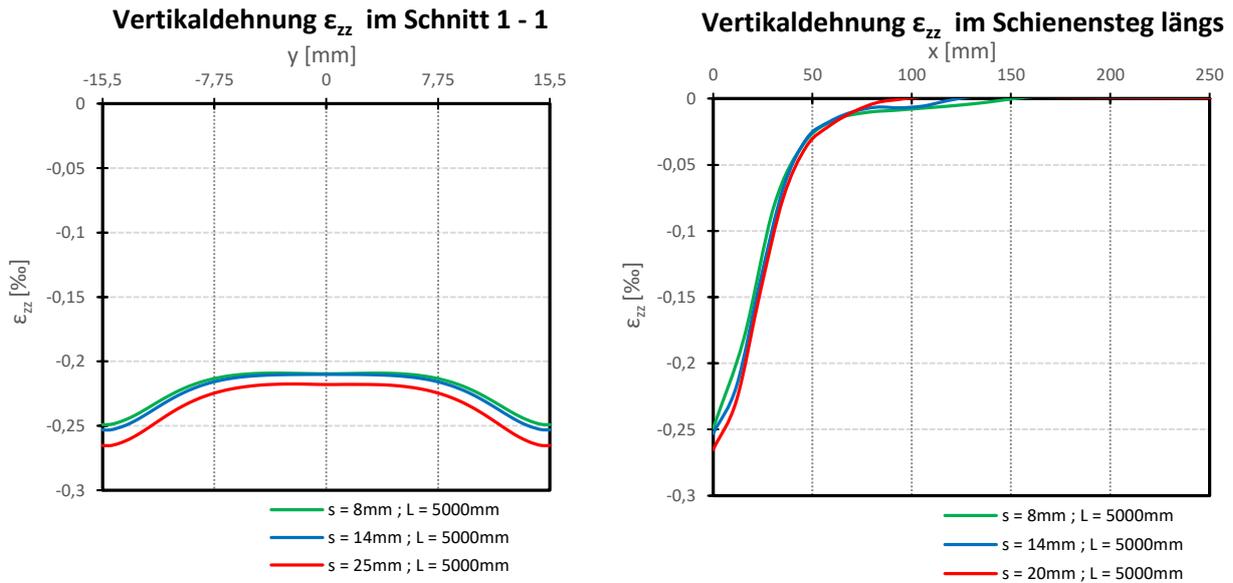
durchgeführt. Die Stegblechstärke wurde in zwei Schritten erhöht und die Ergebnisse gegenübergestellt.

In Abbildung 2.31 ist die Änderung der Dehnungsverläufe, in Folge einer Verstärkung des Stegblechs des Kranbahnträgers, für das Schienenprofil A 55, bei einer Belastung von 100 kN, dargestellt. Eine Zunahme der Dehnungen am Messpunkt unter dem Kranrad ist deutlich auszumachen. Dies lässt sich, wie bereits erwähnt, auf die höhere Steifigkeit zurückführen. Im Längsverlauf ist zu sehen, dass die Dehnungen bei stärkerem Stegblech rascher abfallen, und somit der Maximalwert unter dem Kranrad zunimmt.



**Abbildung 2.31:** Gegenüberstellung der Dehnungsverteilungen bei Erhöhung der Blechstärke des Stegbleches des Kranbahnträgers für das Schienenprofil A 55 bei  $L = 400$  mm Stützweite, bei einer Belastung von  $P = 100$  kN (Trägerabmessungen:  $h = 300$  mm,  $b = 300$  mm,  $t = 14,0$  mm)

Um das Verhalten näher zu beschreiben und den Einfluss der Stützweite abzubilden, wurde im nächsten Schritt am Modell des Einfeldbalkens mit einer Stützweite von  $L = 5000$  mm die Stegblechstärke variiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2.32 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sich das gleiche Verhalten wie am  $L = 400$  mm langen Modell einstellt, aber die Dehnungen durch den Einfluss der Stützweite etwas abfallen. Für die folgenden Schienenprofile A 75, A 100 und A 120 wird aufgrund der Ergebnisse für das Profil A 55, wie schon bei der Variation der Flanschstärke, von einem linearen Zuwachs der Dehnungen, in Abhängigkeit der Stegstärke ausgegangen. Es werden deshalb nur zwei verschiedene Blechstärken untersucht.

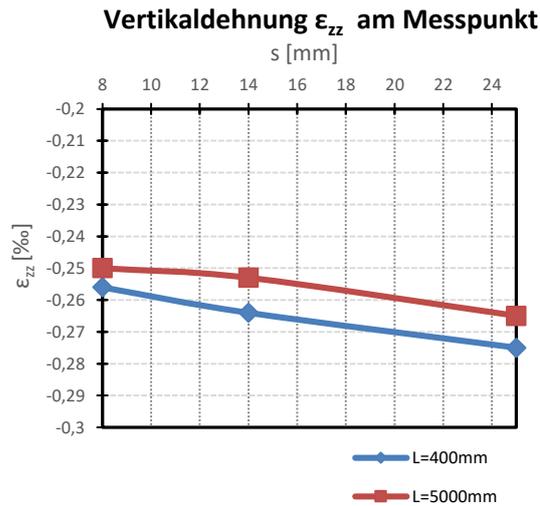


**Abbildung 2.32:** Gegenüberstellung der Dehnungsverteilungen bei Erhöhung der Blechstärke des Stegbleches des Kranbahnträgers für das Schienenprofil A 55 bei  $L = 5000\text{ mm}$  Stützweite, für eine Belastung von  $P = 100\text{ kN}$ . (Trägerabmessungen:  $h = 300\text{ mm}$ ,  $b = 300\text{ mm}$ ,  $t = 14,0\text{ mm}$ )

Die in Tabelle 2.13 angeführten maximalen Stauchungen am Messpunkt wurden in Abbildung 2.33, in Abhängigkeit der Stegstärke, aufgetragen, um den Zuwachs der Stauchungen zu veranschaulichen.

**Tabelle 2.13:** Stauchungen am Messpunkt bei Erhöhung der Stegstärke des Trägers für das Profil A 55, bei einer Belastung von  $P = 100\text{ kN}$ . (Trägerabmessungen:  $h = 300\text{ mm}$ ,  $b = 300\text{ mm}$ ,  $t = 14,0\text{ mm}$ )

Stützweite L [mm]	Stegstärke s [mm]		
	8	14	25
400	-0,256	-0,264	-0,275
5000	-0,250	-0,253	-0,256
	$\epsilon_{zz}$ [‰] am Messpunkt		



**Abbildung 2.33:** Zunahme der Stauchungen am Messpunkt in Abhängigkeit der Stegstärke des Trägers, bei dem Schienenprofil A 55, bei einer Belastung von  $P = 100 \text{ kN}$ . (Trägerabmessungen:  $h = 300 \text{ mm}$ ,  $b = 300 \text{ mm}$ ,  $t = 14,0 \text{ mm}$ )

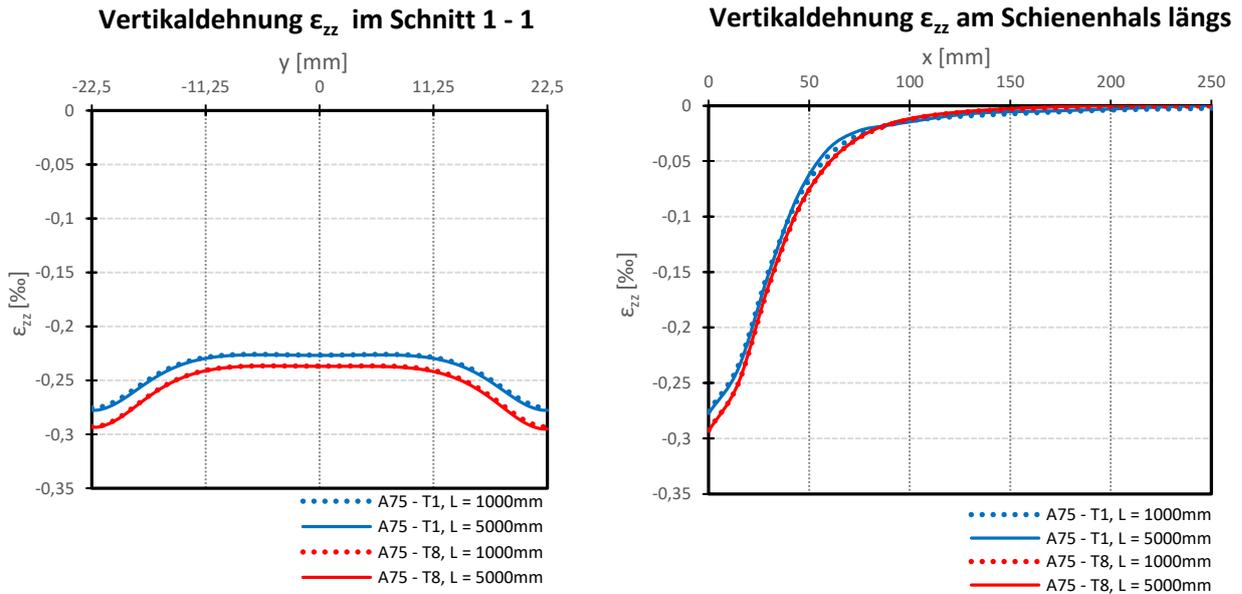
b) Ergebnisse für das Schienenprofil A 75:

Für das Schienenprofil A 75 wurde am gewählten Kranbahnträger die Stegblechstärke vergrößert. Die Abmessungen der Kranbahnträger sind in Tabelle 2.14 dargestellt. Die Modelle für das Schienenprofil A 75 wurden mit einer Radlast von  $P = 200 \text{ kN}$  belastet.

**Tabelle 2.14:** Abmessungen der gewählten Kranbahnträger für das Schienenprofil A 75

Kranbahnträger	Abmessungen [mm]				Belastung P [kN]
	h	b	s	t	
T1	500	400	15	25	200
T8	500	400	40	25	200

Die Ergebnisse in Abbildung 2.34 zeigen den erwarteten Zuwachs an Vertikalstauchung im Schienenhals, durch die Verstärkung des Stegblechs. Der Längeneinfluss bei den größeren Schienenprofilen reduziert sich, im Vergleich zu den Ergebnissen für das Schienenprofil A 55.

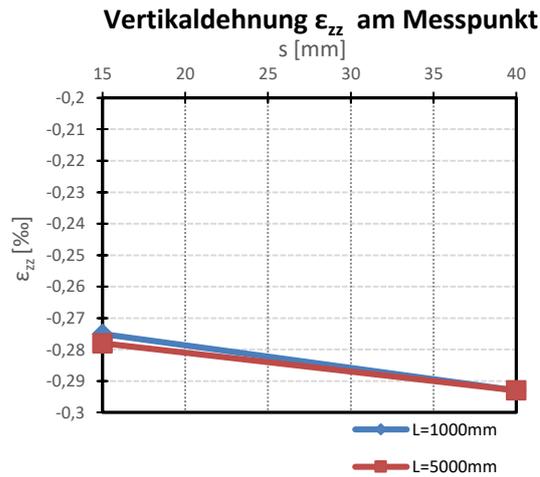


**Abbildung 2.34:** Gegenüberstellung der Dehnungsverteilungen bei Erhöhung der Blechstärke des Stegbleches des Kranbahnträgers für das Schienenprofil A 75, bei einer Belastung von  $P = 200 \text{ kN}$  (Trägerabmessungen nach Tabelle 2.14)

Tabelle 2.15 zeigt die Ergebnisse für die maximalen Stauchungen am Messpunkt, für die Variation von Stegstärke und Stützweite des Kranbahnträgers. Diese Stauchungen sind in Abbildung 2.35 gegenüber den Stegstärken des Trägers aufgetragen.

**Tabelle 2.15:** Stauchungen am Messpunkt bei Erhöhung der Stegstärke des Trägers für das Profil A 75, bei einer Belastung von  $P = 200 \text{ kN}$  (Trägerabmessungen nach Tabelle 2.14)

Stützweite L [mm]	Stegstärke s [mm]	
	15	40
1000	-0,275	-0,293
5000	-0,278	-0,293
	$\epsilon_{zz}$ [‰] am Messpunkt	



**Abbildung 2.35:** Zunahme der Stauchungen am Messpunkt in Abhängigkeit der Stegstärke des Trägers für das Schienenprofil A 75, bei einer Belastung von  $P = 200 \text{ kN}$ . (Trägerabmessungen nach Tabelle 2.14)

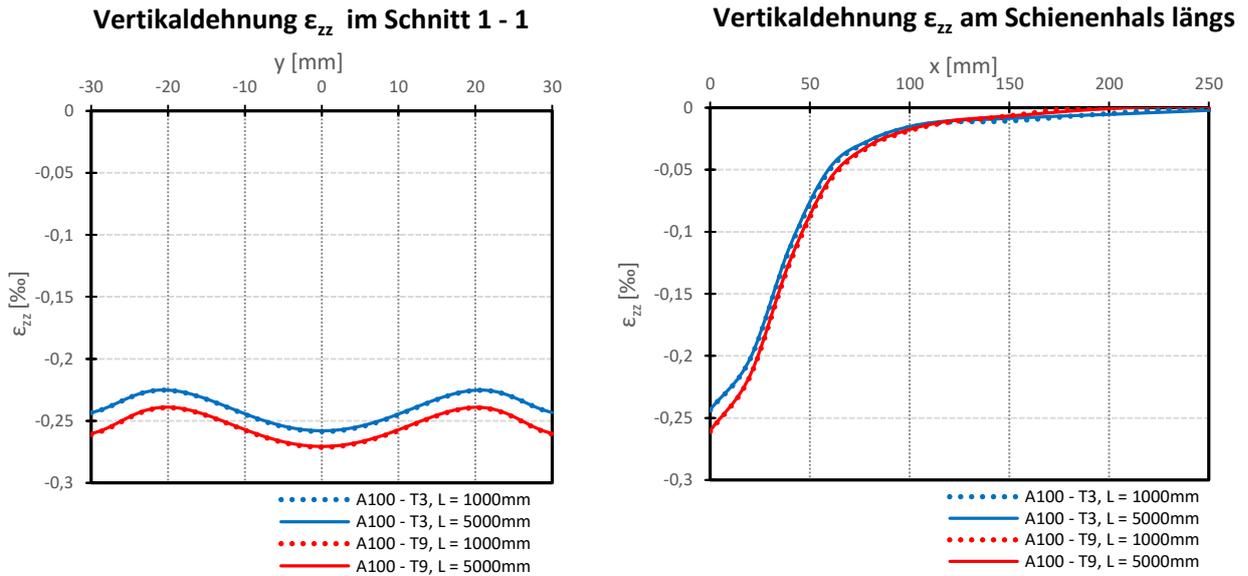
c) Ergebnisse für das Schienenprofil A 100:

Die Abmessungen der gewählten Kranbahnträger für die Modelle des Schienenprofil A 100 sind in Tabelle 2.16 ersichtlich. Die in den Modellen aufgebrachte Radlast beträgt  $300 \text{ kN}$  für das Schienenprofil A 100.

**Tabelle 2.16:** Abmessungen der gewählten Kranbahnträger für das Schienenprofil A 100

Kranbahnträger	Abmessungen [mm]				Belastung P [kN]
	h	b	s	t	
T3	1000	400	<b>15</b>	25	300
T9	1000	400	<b>40</b>	25	300

In Abbildung 2.36 ist die Gegenüberstellung der Dehnungsverläufe, zufolge der Variation der Stegblechdicke des Trägers nach Tabelle 2.16, ersichtlich. Es zeigt sich wieder der erwartete Zuwachs der Dehnungen, bei größerer Stegblechdicke.

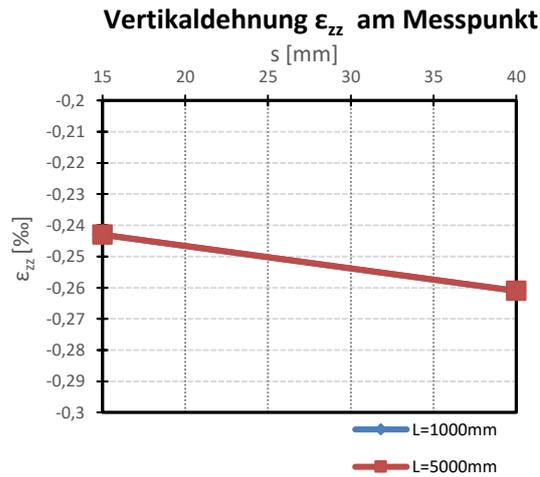


**Abbildung 2.36:** Gegenüberstellung der Dehnungsverteilungen bei Erhöhung der Blechstärke des Stegbleches des Kranbahnträgers für das Schienenprofil A 100, bei einer Belastung von  $P = 300$  kN (Trägerabmessungen nach Tabelle 2.16)

Tabelle 2.17 zeigt die Ergebnisse der Stauchungen für den Messpunkt, bei Variation der Stegblechstärke und Stützweite des Kranbahnträgers aufgelistet. Es ist kein Einfluss der Stützweite mehr auszumachen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2.37, gegenüber der Stegstärke des Trägers, aufgetragen.

**Tabelle 2.17:** Stauchungen am Messpunkt bei Erhöhung der Stegstärke des Trägers für das Profil A 100, bei einer Belastung von  $P = 300$  kN. (Trägerabmessungen nach Tabelle 2.16)

Stützweite L [mm]	Stegstärke s [mm]	
	15	40
1000	-0,243	-0,261
5000	-0,243	-0,261
	$\epsilon_{zz}$ [‰] am Messpunkt	



**Abbildung 2.37:** Zunahme der Stauchungen am Messpunkt in Abhängigkeit der Stegstärke des Trägers für das Profil A 100, bei einer Belastung von  $P = 300$  kN. (Trägerabmessungen nach Tabelle 2.16)

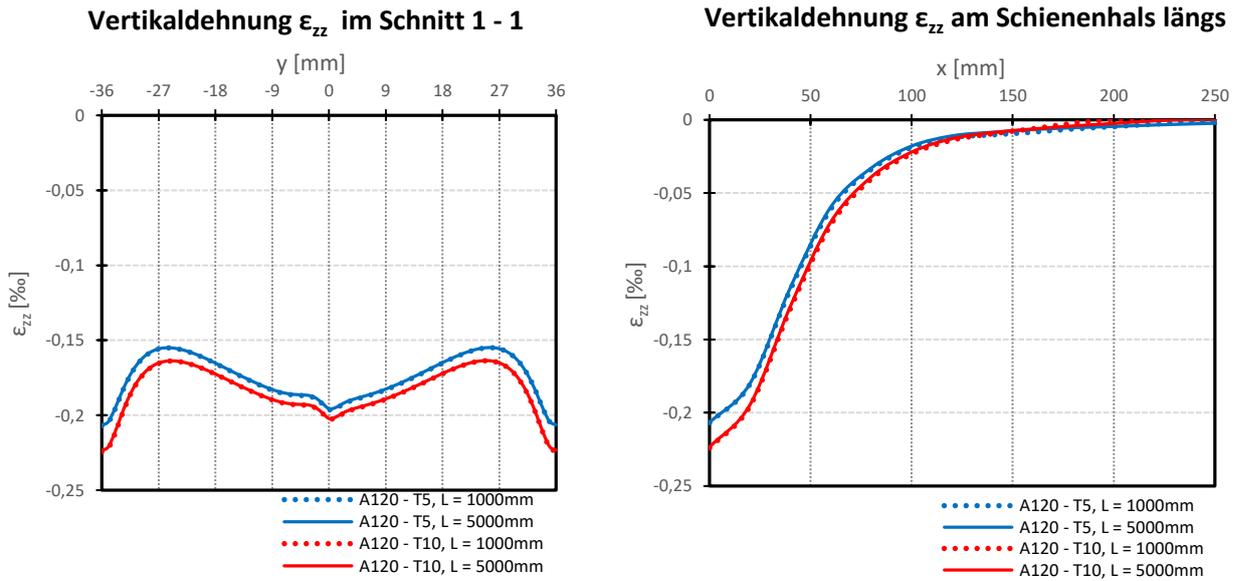
d) Ergebnisse für das Schienenprofil A 120:

Als letztes Schienenprofil, für das die Untersuchung durchgeführt wurde, sei hier das Profil A 120 angeführt. Die gewählten Abmessungen der Kranbahnträger, mit unterschiedlichen Stegblechen, sind Tabelle 2.18 zu entnehmen.

**Tabelle 2.18:** Abmessungen der gewählten Kranbahnträger für das Schienenprofil A 120

Kranbahnträger	Abmessungen [mm]				Belastung P [kN]
	h	b	s	t	
T5	1000	400	<b>20</b>	30	300
T10	1000	400	<b>50</b>	30	300

Die Ergebnisse für das Schienenprofil A 120 sind in Abbildung 2.38 dargestellt. Das Verhalten der Dehnungsverteilungen ist gleich dem, der vorher untersuchten Schienenprofile.

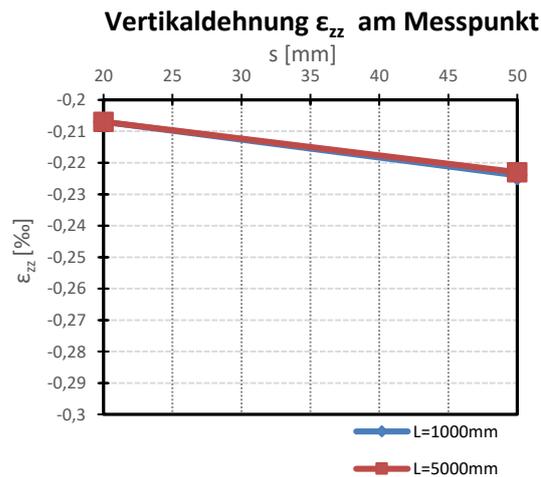


**Abbildung 2.38:** Gegenüberstellung der Dehnungsverteilungen bei Erhöhung der Blechstärke des Stegbleches des Kranbahnträgers für das Schienenprofil A 120, bei einer Belastung von  $P = 300 \text{ kN}$  (Trägerabmessungen nach Tabelle 2.18)

In Tabelle 2.19 sind die Ergebnisse der Stauchungen am Messpunkt, für die untersuchten Stegstärken und Stützweiten aufgelistet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2.39 in Abhängigkeit der Stegstärke aufgetragen.

**Tabelle 2.19:** Stauchungen am Messpunkt bei Erhöhung der Stegstärke des Trägers für das Profil A 120, bei einer Belastung von  $P = 300 \text{ kN}$  (Trägerabmessungen nach Tabelle 2.18)

Stützweite L [mm]	Stegstärke s [mm]	
	20	50
1000	-0,207	-0,224
5000	-0,207	-0,223
	$\epsilon_{zz}$ [‰] am Messpunkt	



**Abbildung 2.39:** Zunahme der Stauchungen am Messpunkt in Abhängigkeit der Stegstärke des Trägers für das Profil A 120, bei einer Belastung von  $P = 300\text{ kN}$  (Trägerabmessungen nach Tabelle 2.18)

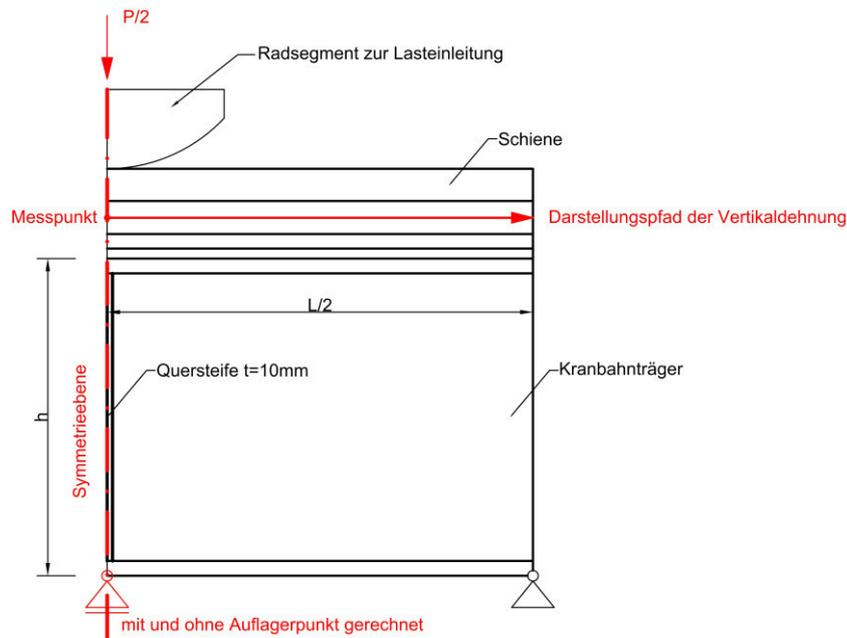
### e) Zusammenfassung der Ergebnisse

Es ist festzuhalten, dass der Einfluss der Parameter Obergurtstärke  $t$  und Stegstärke  $s$ , gegenüber den übrigen Einflüssen (Stützweite  $L$ , Höhe  $h$ , Breite  $b$ ), eine erhebliche Änderung der Dehnungen bewirkt. Daher wird für weitere Studien festgelegt, dass der Einfluss aus Trägerhöhe und -breite vernachlässigt wird und nur der Einfluss von Flansch- und Stegstärke berücksichtigt wird. Es wird als erste Annahme von einem linearen Zuwachs der Stauchungen in Abhängigkeit der Steg- und Flanschstärke ausgegangen, daher wurden für die größeren Schienenprofile A 75, A 100 und A 120 jeweils nur zwei verschiedene Blechstärken untersucht. In Hinblick auf die Ermittlung bzw. Rückrechnung einer Radlast aus den Dehnungen müssen die Einflüsse aus Flansch- und Stegstärke des Kranbahnträgers über Korrekturfaktoren ausgeglichen werden. Der Einfluss der Stützweite  $L$  ist weniger maßgebend, wird aber in den folgenden Studien trotzdem mitgenommen, weil sich die Einflüsse bei den verschiedenen Schientypen noch ändern können.

### 2.5.7. Einfluss von Queraussteifungen im Kranbahnträger

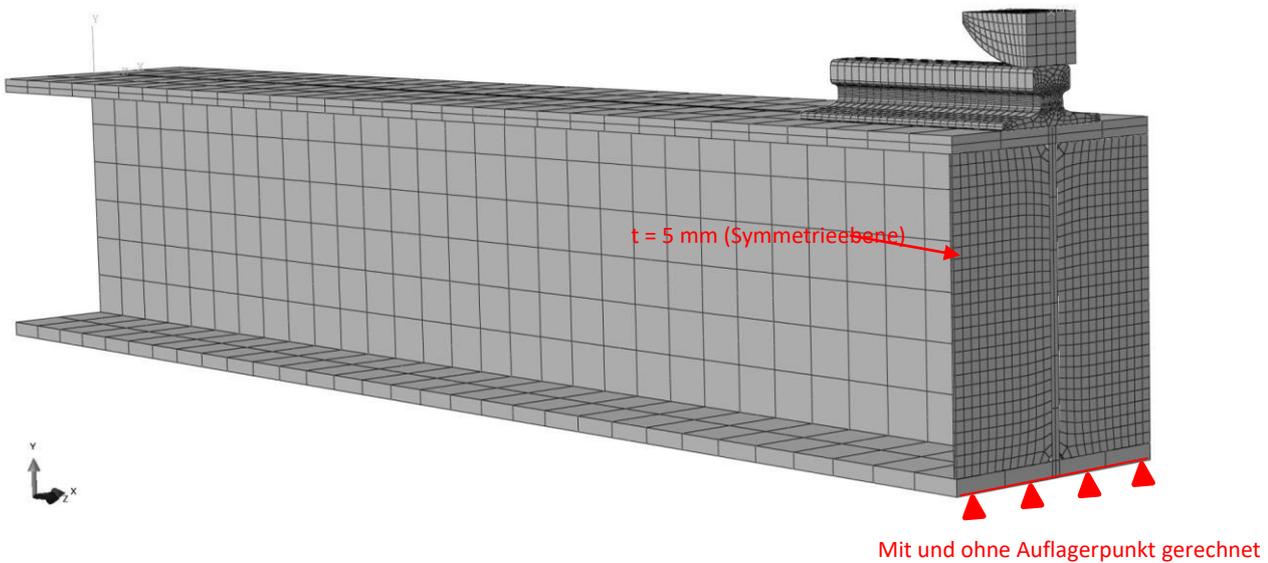
An den Kranbahnträgern sind, in den meisten Fällen, in regelmäßigen Abständen Quersteifen angeordnet. Über den Auflagerpunkten (Stützen oder Konsolen) sind ebenfalls Quersteifen zur Lasteinleitung vorhanden. In dieser Untersuchung wird überprüft, wie sich die Dehnungsverteilung über einer Quersteife verhält, bzw. wie sich die Dehnungen am Messpunkt ändern, wenn die Messung direkt über einer Quersteife im Träger, oder direkt über einem Lagerpunkt durchgeführt würde. Der Gedanke dahinter ist, dass durch die höhere Steifigkeit die Dehnungen steigen und sich eventuell eine Dehnung am Messpunkt in der Größenordnung des Grenzfalles der starren Bettung einstellt. Dadurch ist es möglich, die zuvor ermittelten Einflüsse aus dem Kranbahnträgerdimensionen zu eliminieren und sich direkt auf die Dehnungen im Grundmodell zu

beziehen. Die Untersuchung wurde für jedes Schienenprofil an einem Modell mit gewähltem Kranbahnträger und einer Stützweite von  $L = 5000$  mm durchgeführt. Die Quersteife wurde im Modell in Feldmitte, direkt unter der Lasteinleitung des Kranradsegmentes eingefügt (Abbildung 2.40). In einem zweiten Schritt wurde im FEM-Modell unter der Last direkt ein Auflager in vertikaler Richtung gesetzt, um die Messung über einem Auflagerpunkt zu simulieren.



**Abbildung 2.40:** Modell M3 für die Ermittlung der Einflüsse einer Quersteife,  $L = 5000$  mm, mit und ohne mittiges Auflager

In Abbildung 2.41 ist das Modell M3 für die Berechnungen der Dehnungen, für den Fall einer Quersteife unter der Lasteinleitung, abgebildet. Der Aufbau des Modells ist gleich dem der anderen Untersuchungen. Es wurde lediglich die Quersteife unter der Lasteinleitung eingefügt. Da die Quersteife genau in der Symmetrieebene liegt, wurde sie nur mit einer Blechstärke von 5 mm modelliert. Dies entspricht dann der Gesamtstärke von 10 mm lt. Abbildung 2.40.



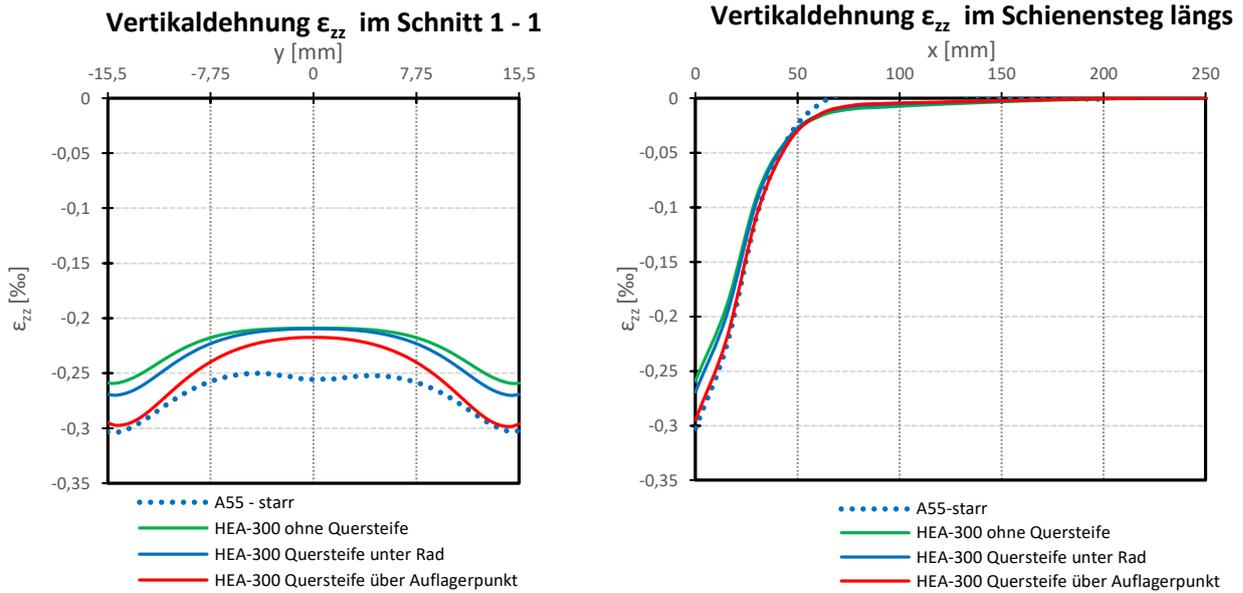
**Abbildung 2.41:** Modellierung M3 – Schiene auf Kranbahnträger gelagert, mit Queraussteifung unter der Lasteinleitung

Die Ergebnisse der vertikalen Stauchungen werden für alle vier untersuchten Schienenprofile im Halsquerschnitt und an der Halsaußenfläche dargestellt, und dem Referenzfall, mit starrer Bettung der Schiene, gegenübergestellt. Die Quersteife wurde in allen Modellen einheitlich mit einer Blechstärke von  $t = 10\text{mm}$  gewählt.

a) Ergebnisse für das Schienenprofil A 55:

Im Fall des Schienenprofils A 55 wurde die Quersteife im Modell mit einem HEA-300 Profil als Kranbahnträger eingefügt.

In Abbildung 2.42 ist der Einfluss der Quersteife deutlich, über eine Zunahme der Stauchungen zum Messpunkt hin, wahrzunehmen. Dieses Verhalten lässt sich, wie schon erwartet, über die erhöhte Steifigkeit im Lasteinleitungsbereich erklären. Die Dehnungen steigen bei zusätzlicher Betrachtung über einen Auflagerpunkt weiter an.

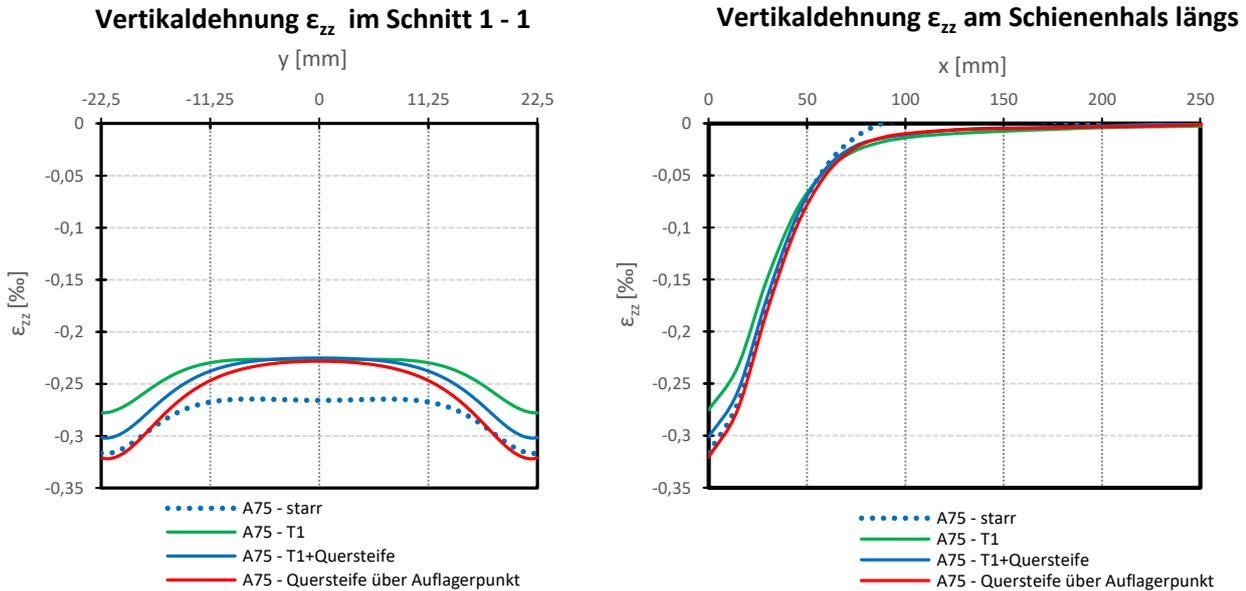


**Abbildung 2.42:** Gegenüberstellung der Dehnungsverteilungen, mit und ohne Quersteife im Lasteinleitungsbereich, für das Schienenprofil A 55 bei L = 5000 mm Stützweite, bei einer Belastung von P = 100 kN (Träger HEA 300)

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einfluss der Blechstärken des Kranbahnträgers auf die Messung der Dehnungen somit umgangen werden kann, wenn man die Messung über einer Quersteife direkt über einem Auflagerpunkt vornimmt.

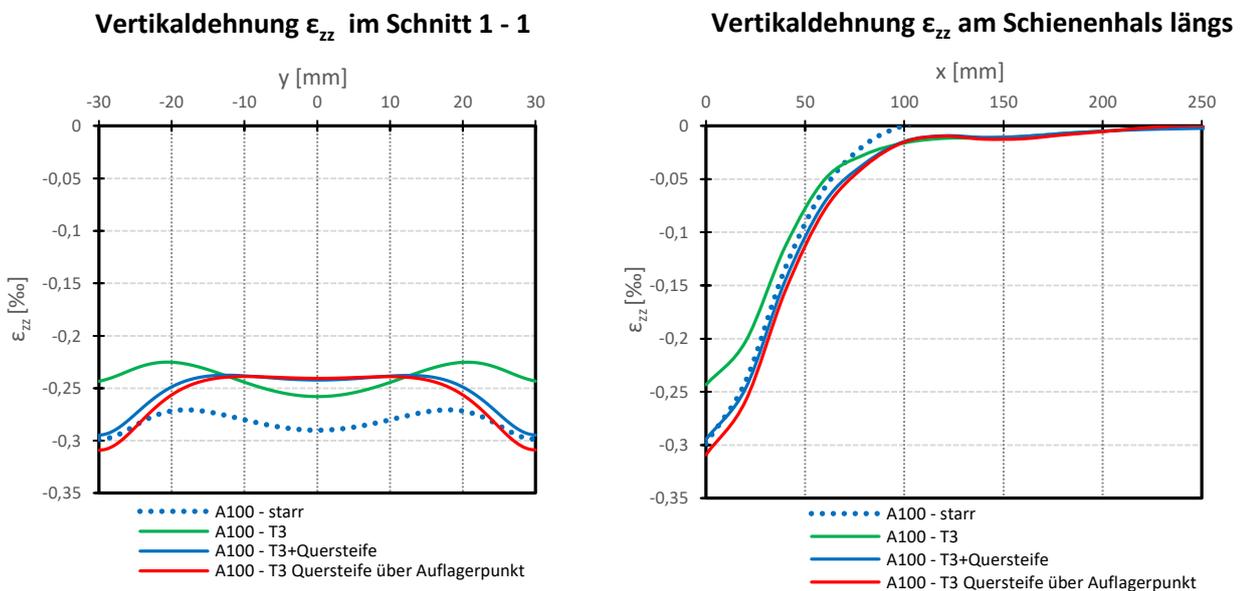
Die Ermittlung und Darstellung der Ergebnisse für die anderen Schienenprofile wurde auf dieselbe Weise durchgeführt. Die Dehnungsverteilungen sind in Abbildung 2.43 bis Abbildung 2.45 dargestellt.

b) Ergebnisse für das Schienenprofil A 75:

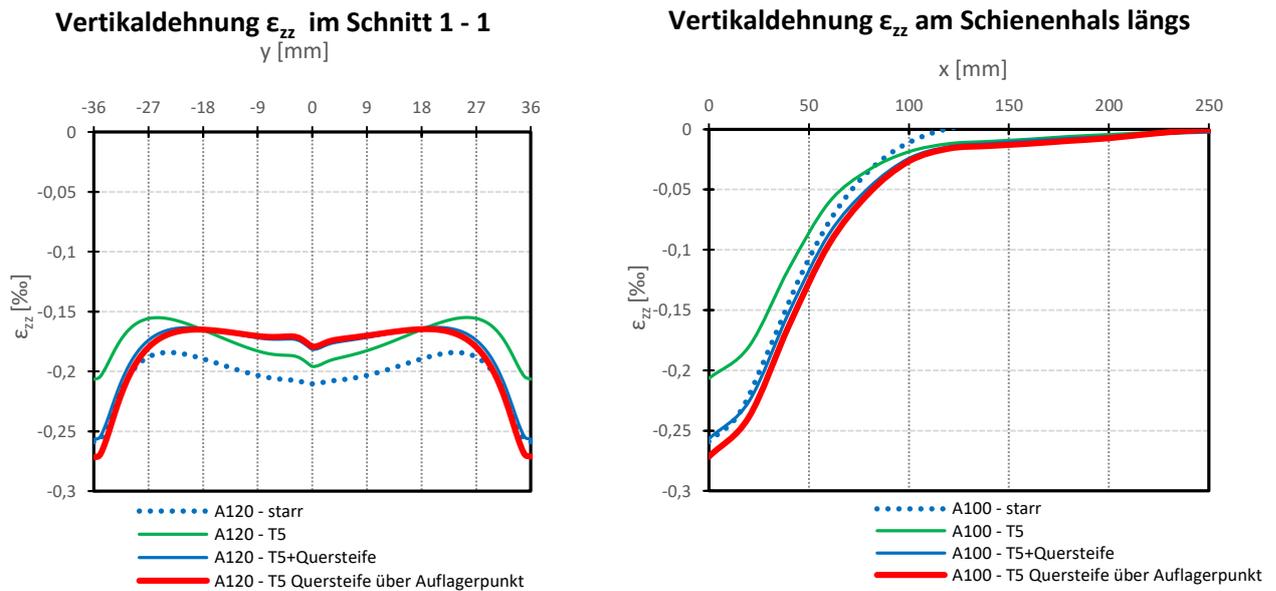


**Abbildung 2.43:** Gegenüberstellung der Dehnungsverteilungen, mit und ohne Quersteife im Lasteinleitungsbereich, für das Schienenprofil A 75, bei  $L = 500$  mm Stützweite, bei einer Belastung von  $P = 200$  kN (Trägerabmessungen:  $h = 500$  mm,  $b = 400$  mm,  $s = 15$  mm,  $t = 25$  mm)

c) Ergebnisse für das Schienenprofil A 100:



**Abbildung 2.44:** Gegenüberstellung der Dehnungsverteilungen mit und ohne Quersteife im Lasteinleitungsbereich für das Schienenprofil A 100, bei  $L = 5000$  mm Stützweite, bei einer Belastung von  $P = 300$  kN (Trägerabmessungen:  $h = 1000$  mm,  $b = 400$  mm,  $s = 15$  mm,  $t = 25$  mm)

d) Ergebnisse für das Schienenprofil A 120:

**Abbildung 2.45:** Gegenüberstellung der Dehnungsverteilungen, mit und ohne Quersteife im Lasteinleitungsbereich, für das Schienenprofil A 120, bei  $L = 5000$  mm Stützweite, bei einer Belastung von  $P = 300$  kN (Trägerabmessungen:  $h = 1000$  mm,  $b = 500$  mm,  $s = 20$  mm,  $t = 40$  mm)

e) Zusammenfassung der Ergebnisse

In Tabelle 2.20 sind die maximalen Stauchungen am Messpunkt, für die Modelle mit und ohne Quersteife bzw. Auflagerpunkt, gegenübergestellt. Dabei ist für alle Schienenprofile das gleiche Verhalten zu erkennen. Die Stauchungen bei einer Queraussteifung über dem Auflagerpunkt des Trägers sind ähnlich jenen des Referenzfalls bei starrer Bettung, was bestätigt, dass bei Messung der Dehnungen über einem Trägerauflager die Einflüsse des Kranbahnträgers eliminiert werden können.

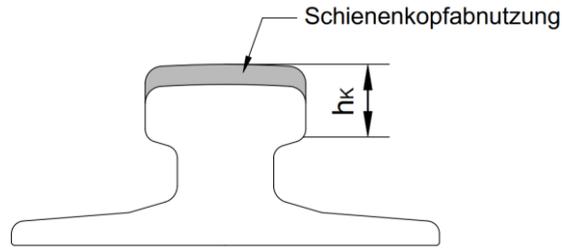
**Tabelle 2.20:** Maximale Stauchungen am Messpunkt unter Einfluss von Queraussteifungen am Kranbahnträger

Schienenprofil	A55	A75	A 100	A 120
Stützweite L [mm]	5000 mm	5000 mm	5000 mm	5000 mm
Belastung P [kN]	100 kN	200 kN	300 kN	300 kN
Trägerabmessungen (h/b/s/t) [mm]	HEA-300	500/400/15/25	1000/400/15/25	1000/400/20/40
starre Bettung (Grundmodell)	-0,303	-0,316	-0,299	-0,259
auf Kranbahnträger	-0,26	-0,278	-0,243	-0,207
Quersteife unter Lasteinleitung	-0,269	-0,302	-0,295	-0,257
Auflagerpunkt unter Lasteinleitung	-0,295	-0,321	-0,309	-0,272
	$\epsilon_{zz}$ [‰] am Messpunkt			

### 2.5.8. Parameterstudie – Einfluss der Schienenabnutzung auf vertikale Dehnungen

Gemäß ÖNORM EN1993-6 [2] ist eine Abnutzung der Schiene um 25% der Schienenkopfhöhe für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) anzusetzen. Für Ermüdungsnachweise darf dieser Wert halbiert werden. Daher werden hier die Abnutzungsgrade von jeweils 12,5% und 25% der Schienenkopfhöhe ( $h_k$  nach Abbildung 2.46) angesetzt, um das Verhalten der vertikalen Dehnungen darzustellen. Diese Abnutzungsgrade werden an den Grundmodellen (starre Bettung) angesetzt, um die Auswirkung auf die Dehnungen aus reiner Abnutzung darzustellen.

Es ist hier anzumerken, dass in dieser Arbeit eine nicht-schubstarre Verbindung der Schiene mit dem Kranbahnträger angesetzt wurde. Daher kann davon ausgegangen werden, dass durch die Abnutzung ein Einfluss der vertikalen Lasteinleitung, durch Veränderung der effektiven Fläche im Schienenhals unter dem Rad zu erwarten ist. Es sei jedoch angemerkt, dass bei Kranbahnen, an denen die Schiene schubstarr auf den Kranbahnträger befestigt wird, die Schiene als statisch mitwirkendes Bauteil gesehen wird und somit einen Anteil an der Biegetragwirkung des Trägers hat. In solchen Fällen sind durch die Abnutzung der Schienenkopfhöhe auch andere Effekte zu erwarten. [3]

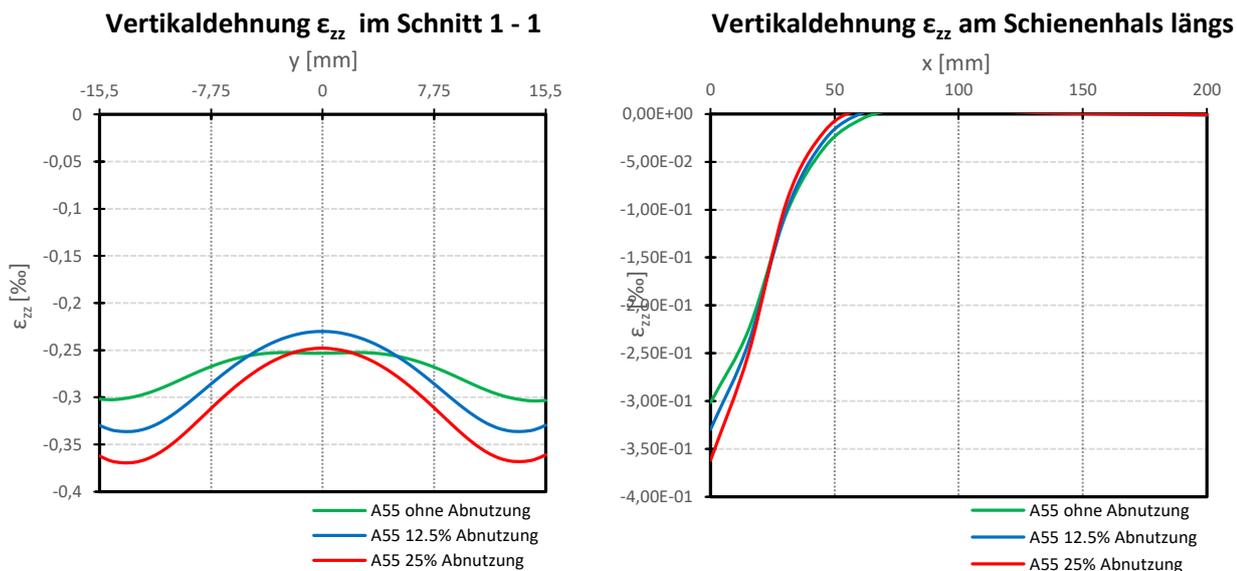


**Abbildung 2.46:** Schienenkopfabnutzung

Es wird die Schienenabnutzung in dieser Parameterstudie bei zentrisch belasteter Schiene, und starrer Bettung berücksichtigt, um zu ermitteln ob die gemessenen Dehnungen am Schienenhals auch bei stark abgenutzten Schienen noch eine zuverlässige Aussage über die Radlast zulassen, bzw. ob der Abnutzungsrad bei der Messung bekannt sein muss und auch bei der Ermittlung der Radlast über Korrekturfaktoren berücksichtigt werden muss. Zum besseren Vergleich des Einflusses bei den verschiedenen Schienenprofilen wurde in diesem Fall eine einheitliche Belastung von 100 kN für alle Schienenprofile angesetzt.

a) Ergebnisse für das Schienenprofil A 55:

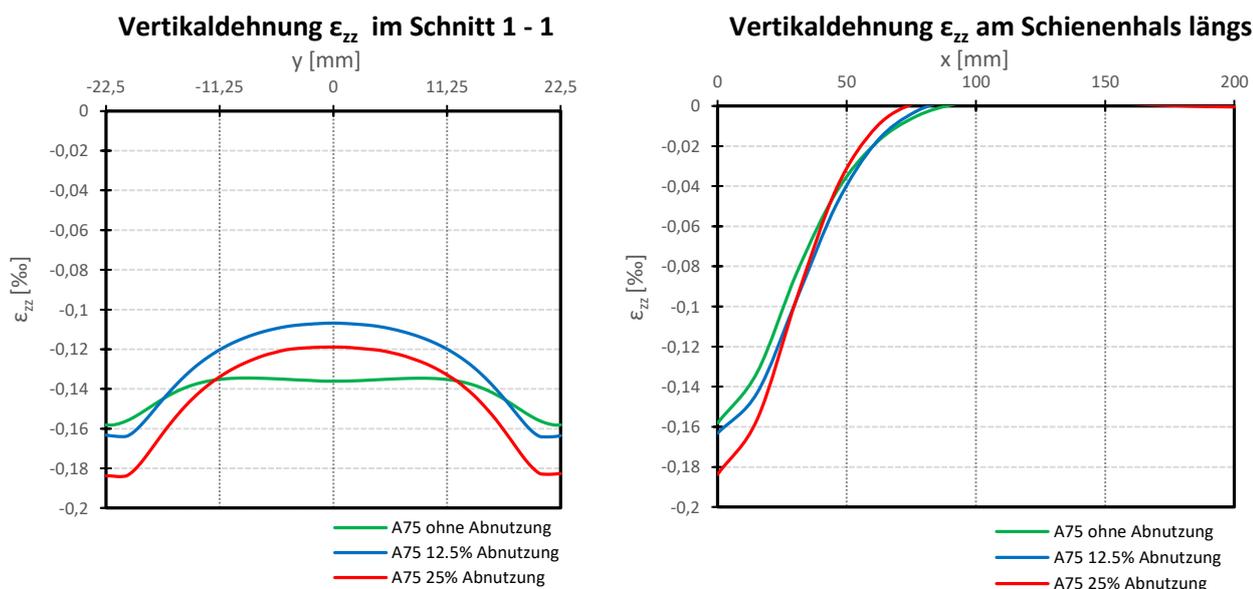
Die Berechnungen zur Schienenkopfabnutzung wurden am Grundmodell nach Abschnitt 2.5.1, mit einer starr gebetteten Schiene durchgeführt. Im Modell wurde die Schienenkopfhöhe einmal um 12,5% und einmal um 25% reduziert. Die Ergebnisse werden in Form einer Gegenüberstellung der Dehnungsverteilungen, zwischen der nicht abgenutzten Schiene und den Schienen mit den jeweiligen reduzierten Kopfhöhen dargestellt (Abbildung 2.47). Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Umlagerung der Dehnungen mit zunehmender Abnutzung zum Rand des Schienenhalses hin. Die Dehnungen am Messpunkt fallen daher höher aus, als im Referenzfall ohne Schienenabnutzung. Bei verringerter Kopfhöhe lässt sich also ein anderes Lastabtragungsverhalten in der Schiene feststellen. Das bedeutet, dass bei einer zuverlässigen Rückrechnung auf die Radlast die Schienenkopfhöhe und der Abnutzungsgrad der Schiene vorweg beurteilt werden muss, und bei der Ermittlung der Radlast berücksichtigt werden muss.



**Abbildung 2.47:** Gegenüberstellung der Vertikaldehnungen im Halsquerschnitt bei den verschiedenen Abnutzungsgraden für das Schienenprofil A 55, für eine Belastung von  $P = 100 \text{ kN}$ , am Grundmodell mit starrer Stützung

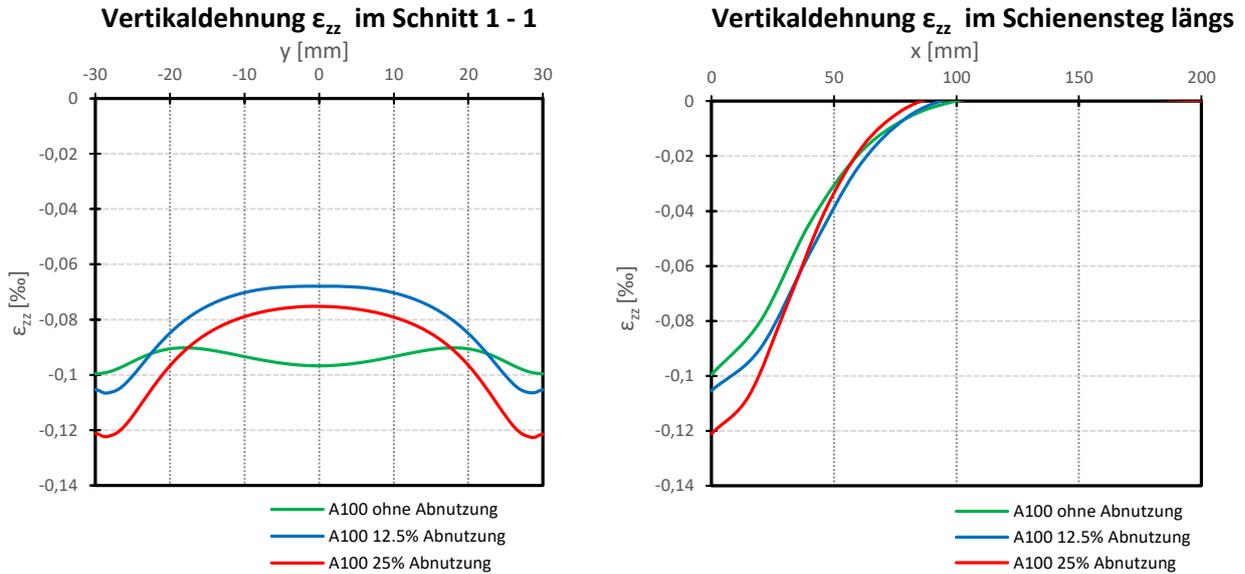
In Abbildung 2.48 bis Abbildung 2.50 sind die Ergebnisse einer Berechnung am Grundmodell der starr gebetteten Schiene, bei den Abnutzungsgraden von 12,5% und 25%, an den anderen untersuchten Schienenprofilen A 75, A 100 und A 120 dargestellt.

b) Ergebnisse für das Schienenprofil A 75:



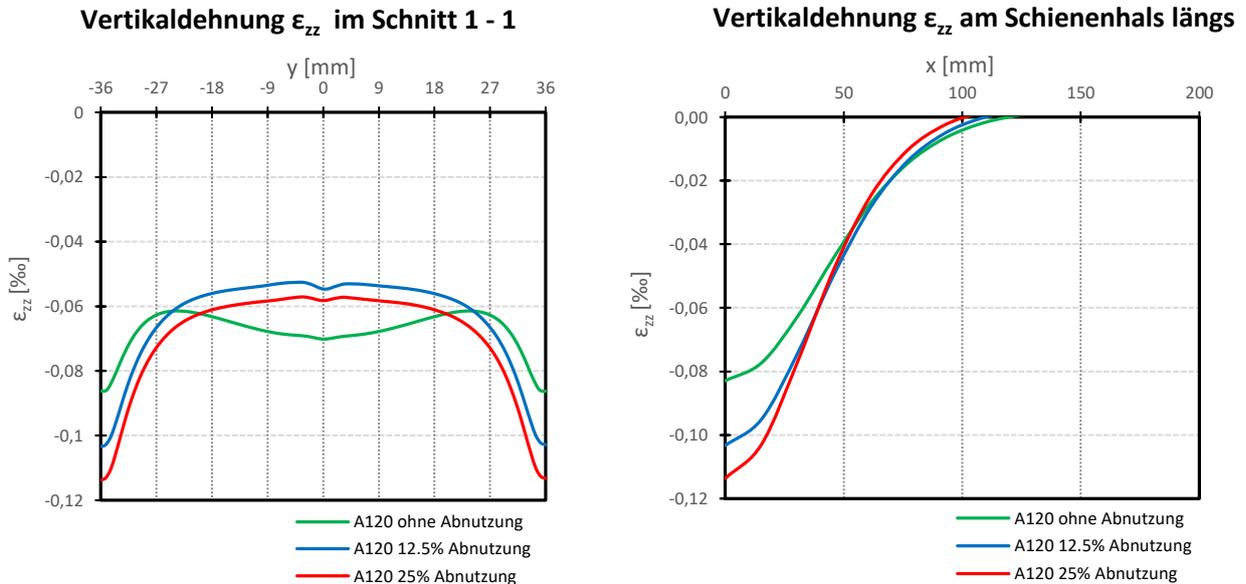
**Abbildung 2.48:** Gegenüberstellung der Vertikaldehnungen im Halsquerschnitt bei den verschiedenen Abnutzungsgraden für das Schienenprofil A 75, für eine Belastung von  $100 \text{ kN}$ , am Grundmodell mit starrer Stützung

c) Ergebnisse für das Schienenprofil A 100:



**Abbildung 2.49:** Gegenüberstellung der Vertikaldehnungen im Halsquerschnitt bei den verschiedenen Abnutzungsgraden für das Schienenprofil A 100, für eine Belastung von 100 kN, am Grundmodell mit starrer Stützung

d) Ergebnisse für das Schienenprofil A 120:



**Abbildung 2.50:** Gegenüberstellung der Vertikaldehnungen im Halsquerschnitt bei den verschiedenen Abnutzungsgraden für das Schienenprofil A 120, für eine Belastung von 100 kN, am Grundmodell mit starrer Stützung

### e) Zusammenfassung der Ergebnisse

In Tabelle 2.21 sind die Maximalwerte der vertikalen Dehnungen, an der Außenfläche der Schienenhäse, für die unterschiedlichen Abnutzungsgrade von 12,5% bzw. 25% reduzierter Kopfhöhe, zum Vergleich angeführt.

**Tabelle 2.21:** Vergleich der vertikalen Dehnungen bei allen Schienenprofilen für unterschiedliche Abnutzungsgraden, P = 100 kN, Schiene starr gelagert

Schienenprofil	Belastung [kN]	Maximale Dehnung Nennquerschnitt Schiene [‰]	Maximale Dehnung bei 12,5% Abnutzung [‰]	Maximale Dehnung bei 25% Abnutzung [‰]
A 55	100	-0,303	-0,330	-0,362
A 75	100	-0,158	-0,163	-0,184
A 100	100	-0,100	-0,105	-0,121
A 120	100	-0,083	-0,103	-0,114

Es ist für alle Schienenprofile ein Anstieg der Vertikaldehnungen am Messpunkt, in Abhängigkeit der Schienenkopfabnutzung, zu vermerken. Dies ist primär auf den Umstand zurückzuführen, dass durch die Abnutzung die konvexe Form der Schienenlauf­fläche verloren geht und somit das Rad eine höhere Aufstandsfläche in Querrichtung der Schiene hat. Die Last wird also schon mehr zum Rand des Halses hin eingeleitet, wodurch die Dehnungen an der Halsaußenfläche ansteigen.

# 3

## 3. Laborversuche

### 3.1. Vorbemerkungen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Versuchsreihe mit Kranschiene durchgeführt, um die vertikalen Dehnungen im Schienenhals unter einer bekannten Last zu messen. Durch die Messung realer Dehnungen ist es möglich, einen Referenzwert zu bestimmen, um die Zuverlässigkeit der FE-Analysen zu verifizieren. Im Versuch wurden Proben der untersuchten Schienenprofile A 55, A 75, A 100 und A 120 mit einer Länge von 400 mm in einer Prüfmaschine belastet, und die Dehnungen am vorher bestimmten Messpunkt mittels Dehnmessstreifen aufgenommen und in Verhältnis zur Belastung gestellt. Für jedes Schienenprofil wurde die Last dabei über die Länge an mehreren Positionen der Schiene aufgebracht, um den Längsverlauf der Dehnungen an der Außenfläche des Schienenhalses bei Belastung an einer Stelle darzustellen. Ebenfalls wurde, wie schon in der Parameterstudie, der Einfluss der Bettung der Schiene experimentell ermittelt. Dazu wurden die Schienen einmal auf einer starren Unterlage und einmal auf einem I-Profil aufgelagert.

### 3.2. Versuchskonzept

Für die Versuche stand für jedes untersuchte Schienenprofil eine Probe mit einer Länge von 400 mm zur Verfügung. Um möglichst viel anhand dieser Probekörper zu untersuchen, wurden die Ergebnisse der Parameterstudie zur Konzeptentwicklung herangezogen. Es wurde festgelegt, dass der Unterschied zwischen einer starr gebetteten und einer auf einem Kranbahnträger aufliegenden Schiene auch experimentell ermittelt werden soll. Dazu wurden die Probekörper im Versuch einmal starr und einmal auf einem Walzprofil mit bekannten Abmessungen (HEB-200) aufgelagert.

Zusätzlich sollte der Verlauf der Dehnungen im Schienenhals in Längsrichtung ermittelt werden. Dazu wurde die Position der Einzellast auf der Schiene in der Prüfmaschine in Längsrichtung verschoben, der Messpunkt bleibt jedoch weiterhin in Schienenmitte. Durch Auftragen der Messergebnisse, in Abhängigkeit der Entfernung zwischen Lasteinleitung und Messpunkt, lassen sich die Längsverläufe der Vertikaldehnungen ermitteln. Die Schienen wurden im Versuch zentrisch, ohne Exzentrizitäten des Kranrades, belastet.

## 3.3. Messtechnik

Die zu messenden Dehnungen sollten möglichst genau bestimmt werden und sind in einer Größenordnung von unter 1 ‰ zu erwarten. Deshalb wurde eine Messung der Dehnungen mittels Dehnmessstreifen festgelegt. Dehnmessstreifen bestehen aus einem Trägermaterial und einem Leiter. Der Leiter im Dehnmessstreifen hat einen bestimmten Ohm'schen Widerstand, welcher von seinem Durchmesser abhängt. Er wird an der Oberfläche des Probekörpers am Messpunkt kraftschlüssig angeklebt, wodurch er die Oberflächendehnungen mitmacht. Erfährt der Leiter im Dehnmessstreifen, nun eine Dehnung, verändert sich dadurch sein Durchmesser und folglich der gemessene Ohmsche Widerstand. Dadurch kann nach Gl. (1) auf die zutreffende Dehnung geschlossen werden. [4]

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R} \frac{1}{K} \quad (1)$$

R...Ohm'scher Widerstand

K....Materialkennwert des Leiters

Der Faktor K ist hier eine Materialkonstante des Leitermaterials, welcher vom Hersteller angegeben wird. Grundsätzlich gilt, je höher der Faktor K ist, desto geringere Unterschiede im Ohm'schen Widerstand reichen aus, um Dehnungen messen zu können. [4]

### 3.3.1. Applikation der Dehnmessstreifen

Im Versuch wurden Dehnmessstreifen mit einem Ohm'schen Widerstand von  $120 \Omega \pm 0,3 \%$  und einem K – Faktor von  $2,01 \pm 1 \%$  verwendet. Die Messgenauigkeit der zu erwartenden Dehnungen mit  $\varepsilon \approx 1 \text{ ‰}$  beträgt dabei ungefähr  $1,0 \%$  ( $= 0,01 \text{ ‰}$ ).

Der Dehnmessstreifen übernimmt die Dehnungen der Oberfläche, auf welcher haftet. Daher ist die Applikation von Dehnmessstreifen sehr sorgfältig durchzuführen, um die Genauigkeit der Messung nicht zu beeinflussen. Die Oberfläche muss zuvor geschliffen, und von Korrosion und Schmutz befreit werden. Anschließend wird der Dehnmessstreifen mittels eines Zwei-Komponenten-Klebstoffes auf Kunststoffbasis an der Oberfläche befestigt (Abbildung 3.1).



Abbildung 3.1: Applikation der DMS (Foto: Zauchner, Jänner 2019)

### 3.4. Versuchsaufbau

#### 3.4.1. Versuch 1 – starr gebettete Schiene

Im Versuch 1 werden jeweils die Schienenproben auf einer starren Unterlagsplatte in die Prüfmaschine eingebaut (Abbildung 3.2). Um sicherzustellen, dass die Schienenprofile vollflächig aufliegen, wurde die Unterseite des Schienenfußes zuvor plangefräst. Die Last wurde über eine sphärische Druckplatte von der Prüfmaschine auf die Probe aufgebracht, um eine zentrische, vertikale Lasteinleitung auf der konvexen Oberfläche der Schienenköpfe zu garantieren. Zur realistischen Lasteinleitung wurde, wie in den FE-Modellen, ein Kranradsegment mit einem Durchmesser von 300 mm (Radius  $r = 150$  mm, wie in FE-Berechnung) installiert, welches die Kraft auf die Schiene bringt. Wie die Abbildung 3.2 zeigt, wurden insgesamt sechs Einzelversuche, mit unterschiedlicher Lage der Einzellast (Position 1 bis 6) durchgeführt.

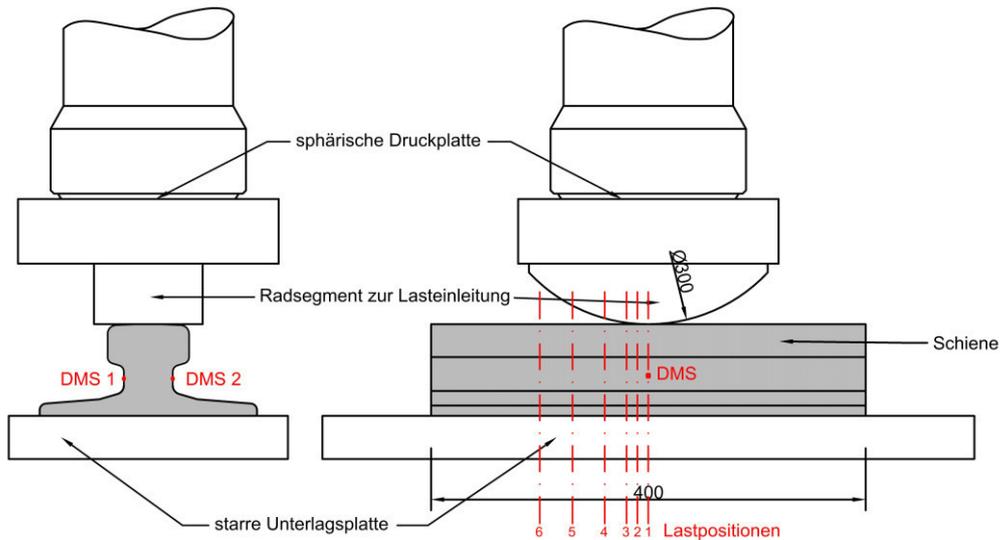


Abbildung 3.2: Versuchsaufbau Versuch 1 – starr gebettete Schiene

In Tabelle 3.1 sind die gewählten Positionen der Lasteinleitung angeführt. Die Schiene wird nach jedem Versuch längs verschoben. Dies ermöglicht, trotz der Messung an nur einer Stelle eine Bewertung der Dehnungen in einer bestimmten Entfernung von der Last, um so den Längsverlauf der Dehnungen ermitteln zu können.

Tabelle 3.1: Positionen der Lasteinleitung

Position der Lasteinleitung [-]	Abstand vom Messpunkt [mm]
1	0
2	10
3	20
4	40
5	70
6	100

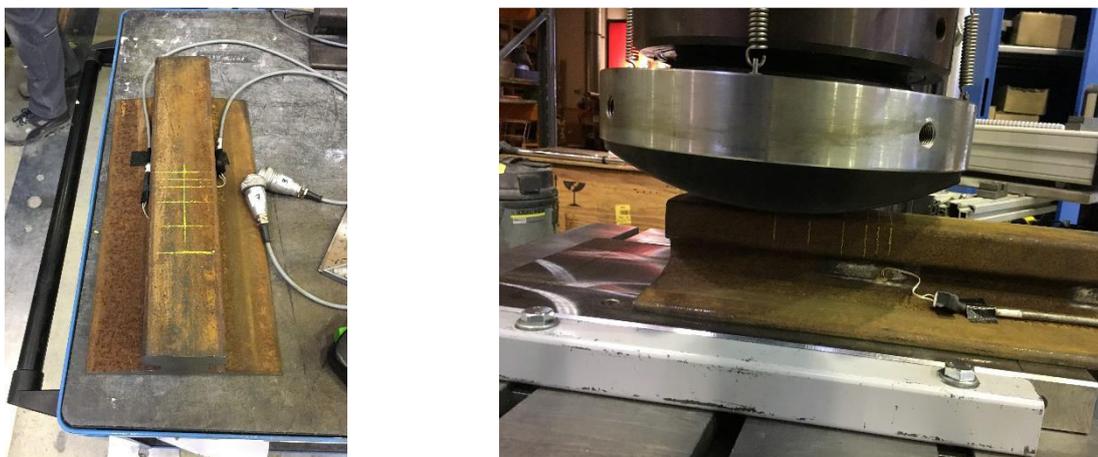
In Abbildung 3.3 ist der Versuchsstand zum Versuch 1 mit der starr gebetteten Schiene gezeigt. Zu sehen ist die erste Lastposition auf der Schiene, bei der die Last in der Mitte, direkt über dem Messpunkt, eingeleitet wird.



**Abbildung 3.3:** Versuchsaufbau für eine starr gebettete Schiene auf starrer Unterlage

(Foto: Zauchner, Jänner 2019)

Um den Längsverlauf der Dehnungen zu ermitteln, wurde, wie schon erwähnt, die Schiene im Laufe der Durchführung des Versuchs in Längsrichtung verschoben (siehe Abbildung 3.4). Der gemessene Maximalwert der Dehnungen bei jeder Lastposition wird, in Abhängigkeit des Abstandes von der Lasteinleitung zum Dehnmessstreifen, aufgetragen. Das so erhaltene Polynom soll sich dem Längsverlauf der Dehnungen am Schienenhals annähern.



**Abbildung 3.4:** Lastpositionen längs an der Schiene (links), Belastung an der äußersten Lastposition 6 (rechts) (Foto: Zauchner, Jänner 2019)

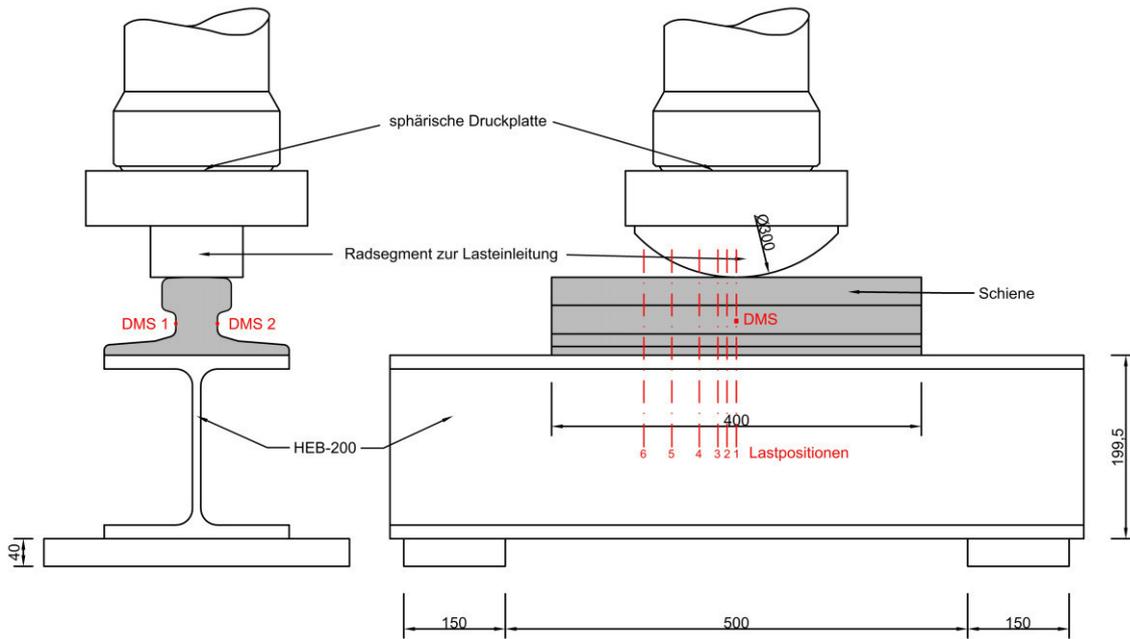
### 3.4.2. Versuch 2 – Schiene auf Walzprofil gelagert

Im zweiten Versuchsaufbau wurde die Schiene auf einem Walzprofil HEB-200 aufgelagert. Die Oberseite des Obergurtes, sowie die Unterseite der Schienenfüße, wurden plangefräst, um ein vollflächiges Aufliegen der Schiene auf dem Träger sicherzustellen. Der Träger wurde auf

### 3. Laborversuche

---

Auflagerplatten im lichten Abstand von  $L = 50\text{ cm}$  als Einfeldbalken aufgelagert (siehe Abbildung 3.5). Die Schiene wird im Zuge des Versuches wieder an den sechs Lastpositionen belastet, um die gewünschten Ergebnisse für eine Ermittlung der Vertikaldehnungen zu erhalten.



**Abbildung 3.5:** Versuchsaufbau Versuch 2 – Auf Walzprofil aufgelegte Schiene

In Abbildung 3.6 ist der Versuchsaufbau, vor der Durchführung des Versuchen zu sehen.



**Abbildung 3.6:** Versuchsaufbau für auf Walzprofil gebettete Schiene

(Foto: Zauchner, Jänner 2019)

### 3.5. Darstellung der Versuchsergebnisse

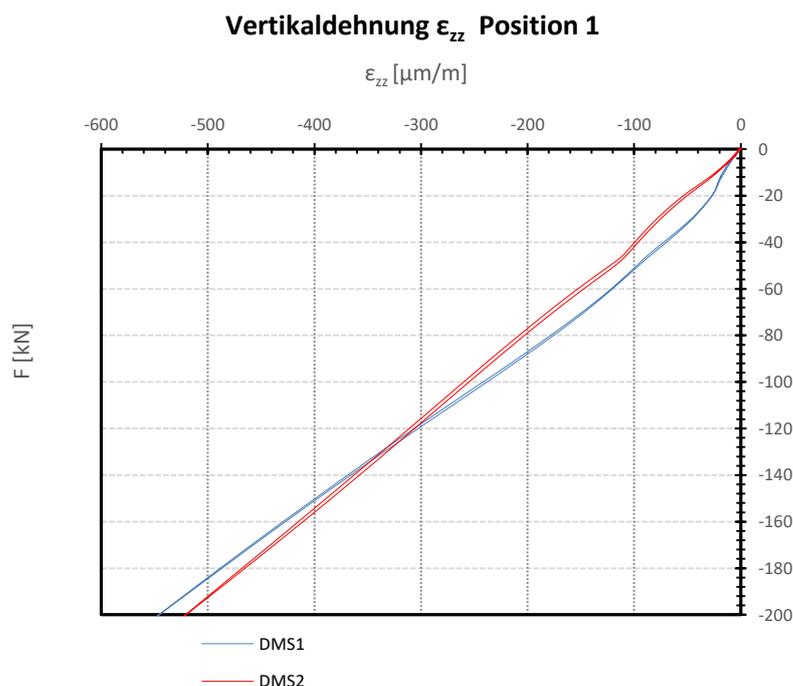
Die beschriebenen Versuche liefern die vertikalen Dehnungen am Schienenhals, an zwei Dehnmessstreifen (DMS) an den Halsaußenflächen, als Ergebnisse.

#### 3.5.1. Ergebnisse für das Schienenprofil A 55

Die Belastung für das Schienenprofil A 55 wurde mit  $F = 200 \text{ kN}$  festgelegt.

##### Versuch 1:

In Abbildung 3.7 ist das Last – Dehnungsverhalten während der Lastaufbringung an der Position 1, in der Mitte des Probekörpers, exemplarisch für das Schienenprofil A 55 dargestellt. Die Dehnungszunahme an den beiden Messpunkten verläuft, wie erwartet, annähernd linear. Die Messungen der beiden DMS weisen unterschiedliche Steigungen auf. Dies ist die Auswirkung von ungewollten Exzentrizitäten im Versuch, hervorgerufen durch die Schienenform bzw. der Einrichtung des Probekörpers in der Prüfmaschine.

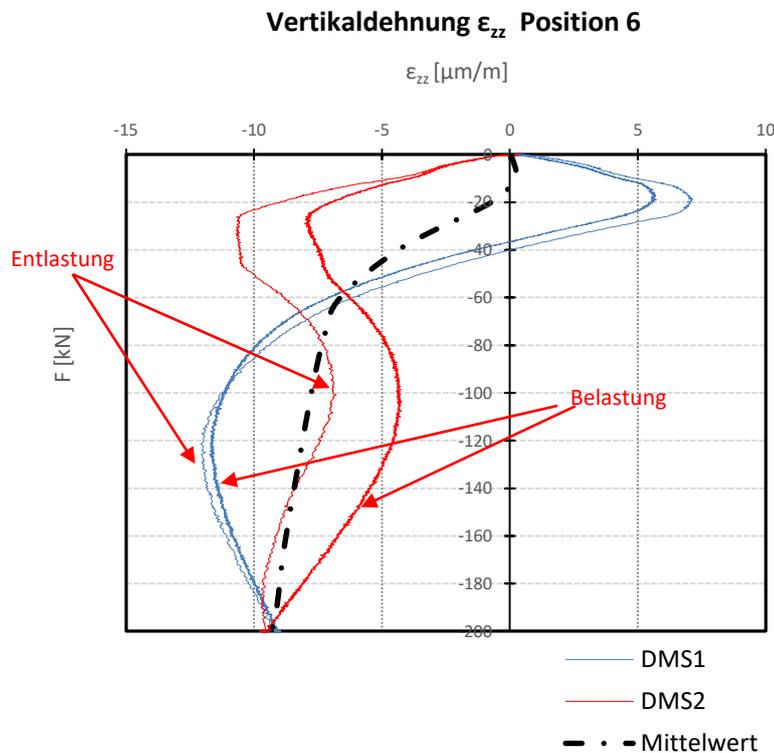


**Abbildung 3.7:** Last-Dehnungsdiagramm aus Versuch 1 (starr gebettete Schiene) für das Schienenprofil A 55, mit Lasteinleitung an Position 1

Je weiter die Belastung von den Messpunkten entfernt wird, desto mehr werden nichtlineare Last-Dehnungs-Verläufe an den Messpunkten festgestellt. In Abbildung 3.8 sind die Dehnungen an den Messpunkten bei Lasteinleitung an der äußersten Position im Viertelpunkt des Probekörpers, dargestellt. Es sind stark nichtlineare Verläufe der Dehnung  $\epsilon$ , und für sehr geringe Belastung sind

### 3. Laborversuche

an einer Seite sogar positive Dehnungen (Zug) zu erkennen, die mit zunehmender Belastung in eine Druckdehnung übergehen. Der Mittelwert zeigt eine nahezu lineare Zunahme der Dehnungen ab einer Belastung von 60 kN.



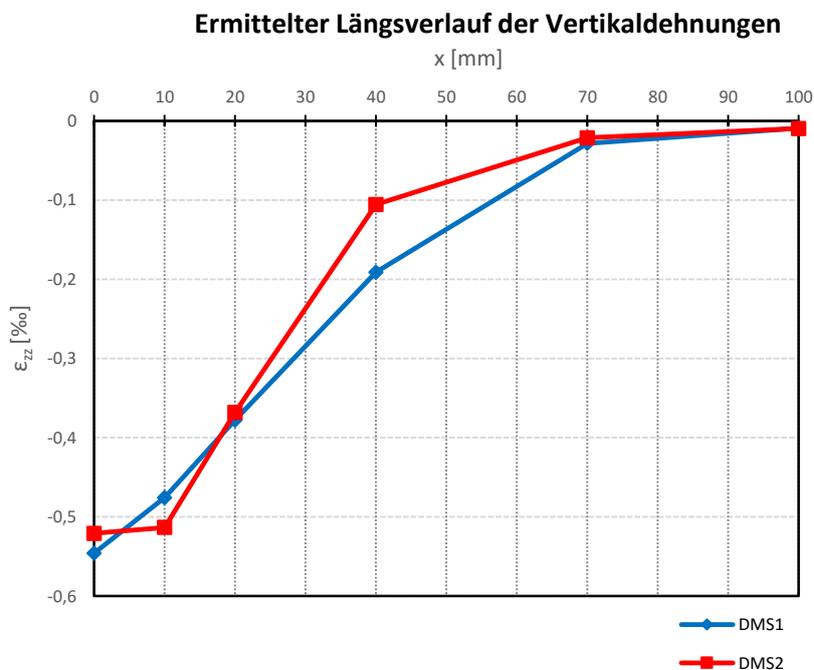
**Abbildung 3.8:** Last-Dehnungsdiagramm aus Versuch 1 (starr gebettete Schiene) für das Schienenprofil A 55 mit Lasteinleitung an Position 6

Ziel der Messungen bei verschiedenen Lasteinleitungspunkten ist es, den Längsverlauf der Dehnungen am Schienenhals abzubilden. Dazu werden aus jedem Versuch nur die Maximalwerte als Ergebnisse herangezogen. In Tabelle 3.2 sind diese Maximalwerte an den beiden Messpunkten angeführt.

**Tabelle 3.2:** Maximaldehnungen bei  $F = 200 \text{ kN}$  an den Messpunkten, Schienenprofil A 55, starr gestützt

Position der Lasteinleitung [-]	Abstand vom Messpunkt [mm]	Vertikaldehnungen $\epsilon_{zz}$ [‰]	
		DMS 1	DMS 2
1	0	-0,546	-0,521
2	10	-0,476	-0,513
3	20	-0,378	-0,368
4	40	-0,191	-0,106
5	70	-0,028	-0,021
6	100	-0,009	-0,01

Die experimentell ermittelten Längsverläufe der vertikalen Dehnungen ergeben sich durch Auftragen der maximalen Dehnungen, in Abhängigkeit des Abstandes zwischen Lasteinleitung und Messpunkten (Abbildung 3.9). Da eine zentrische Belastung vorliegt, sollten die Ergebnisse der beiden DMS ident sein. Es ist daher klar ersichtlich, dass auch bei einer Messung unter idealen Bedingungen im Labor, ungewollte Einflüsse und Exzentrizitäten mitaufgenommen werden.



**Abbildung 3.9:** Maximale Stauchungen, in Abhängigkeit des Abstandes der Last vom Messpunkt, bei einer Belastung von  $F = 200 \text{ kN}$  des Schienenprofils A 55, bei starrer Lagerung

#### Versuch 2:

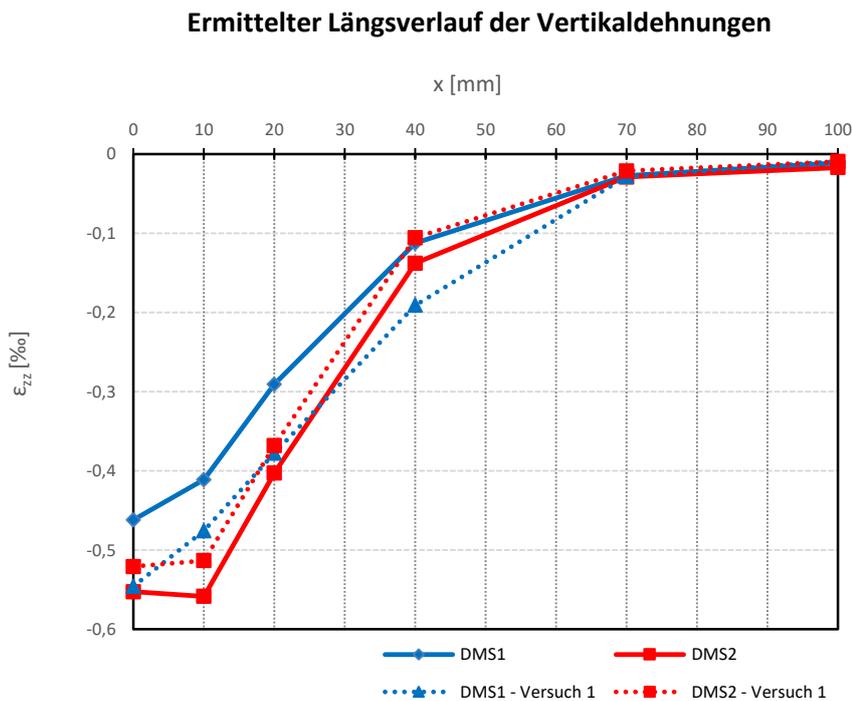
Im zweiten Versuch wurde die Schiene nicht starr gebettet, sondern auf einem gewalzten HEB-200 Profil gelagert. Die Versuchsdurchführung erfolgte analog zum ersten Aufbau. Die Last wurde an den verschiedenen Lastpositionen aufgebracht und die maximal gemessenen Dehnungen, in Abhängigkeit des Abstandes von der Lasteinleitung zur Lage der DMS aufgetragen, um einen ermittelten Längsverlauf darzustellen. Die Ergebnisse für die maximal gemessenen Dehnungen, unter einer Belastung von  $F = 200 \text{ kN}$  sind in Tabelle 3.3 aufgelistet.

### 3. Laborversuche

**Tabelle 3.3:** Maximaldehnungen bei  $F = 200 \text{ kN}$  an den Messpunkten, Schienenprofil A 55 auf Träger HEB- 200

Position der Lasteinleitung [-]	Abstand vom Messpunkt [mm]	Vertikaldehnungen $\epsilon_{zz}$ [‰]	
		DMS 1	DMS 2
1	0	-0,462	-0,553
2	10	-0,411	-0,558
3	20	-0,291	-0,403
4	40	-0,113	-0,138
5	70	-0,027	-0,029
6	100	-0,011	-0,017

In Abbildung 3.10 sind diese maximalen Dehnungen, in Abhängigkeit des Abstandes der Messpunkte von der Lasteinleitung, als Diagramm dargestellt. Es sind Abweichungen von bis zu 17% zwischen den Messwerten der beiden DMS zu vermerken.



**Abbildung 3.10:** Maximale Stauchungen, in Abhängigkeit des Abstandes der Last vom Messpunkt, unter einer Belastung von  $F = 200 \text{ kN}$  für das Schienenprofil A 55, auf HEB-200 gelagert

### 3.5.2. Ergebnisse für das Schienenprofil A 75

Für das Schienenprofil A 75 wurde eine Probelastung von  $F = 300 \text{ kN}$  festgelegt. Die Versuche wurden, wie beschrieben, durchgeführt und lieferten die folgenden Ergebnisse.

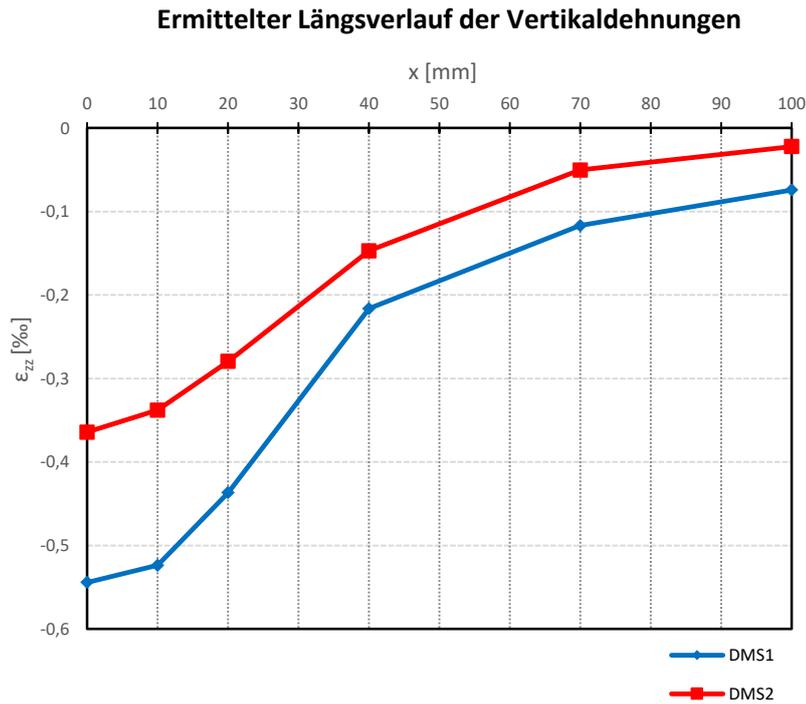
#### Versuch 1:

In Tabelle 3.4 sind die Ergebnisse für Versuch 1, mit der starr gebetteten Schiene, ersichtlich. Als Ergebnisse werden die maximal aufgenommene Dehnung in vertikaler Richtung, unter der festgelegten Belastung von  $F = 300 \text{ kN}$ , an den beiden DMS, in den verschiedenen Lastpositionen, herangezogen. Es ist eine Abweichung von mehr als 30% zwischen den Ergebnissen der beiden DMS zu vermerken. Dies ist auf ungewollte Exzentrizitäten im Versuch zurückzuführen, welche von der Schienenform abhängen.

**Tabelle 3.4:** Maximaldehnungen bei  $F = 300 \text{ kN}$  an den Messpunkten, Schienenprofil A 75, starr gelagert

Position der Lasteinleitung [-]	Abstand vom Messpunkt [mm]	Vertikaldehnungen $\epsilon_{zz}$ [%]	
		DMS 1	DMS 2
1	0	-0,544	-0,364
2	10	-0,524	-0,338
3	20	-0,437	-0,279
4	40	-0,216	-0,147
5	70	-0,117	-0,050
6	100	-0,074	-0,022

In Abbildung 3.11 wurden die maximal gemessenen Dehnungen, in Abhängigkeit der Entfernung der Lasteinleitung zum Messpunkt, aufgetragen. Dadurch ergibt sich der im Versuch ermittelte Längsverlauf der Vertikaldehnungen. Es ist zu erkennen, dass auch bei einem Versuch ohne Träger, die Dehnungen in 10 cm Entfernung von der Lasteinleitung noch eher hoch sind. Um wirklich die Lasteinleitungslänge zu ermitteln, reichen die 400 mm langen Probekörper in diesem Versuch, zumindest bei den größeren Schienenprofilen, offenbar nicht aus.



**Abbildung 3.11:** Maximale Stauchungen, in Abhängigkeit des Abstandes der Last vom Messpunkt, unter einer Belastung von  $F = 300 \text{ kN}$  für das Schienenprofil A 75, bei starrer Lagerung

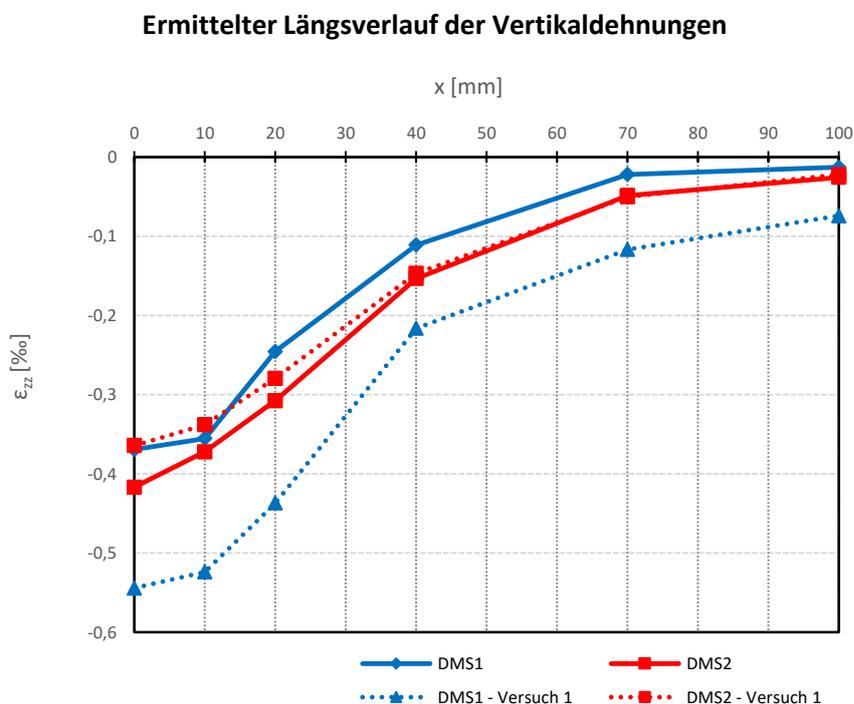
Versuch 2:

Im Versuch 2 wurden die Schienen wieder auf dem Walzprofil HEB-200 aufgelegt. Als Ergebnisse hierzu werden wieder die Maximaldehnungen bei  $F = 300 \text{ kN}$  in den verschiedenen Lastpositionen in Tabelle 3.5 angeführt.

**Tabelle 3.5:** Maximaldehnungen bei  $F = 300 \text{ kN}$  an den Messpunkten, Schienenprofil A 75 auf Träger HEB- 200

Position der Lasteinleitung [-]	Abstand vom Messpunkt [mm]	Vertikaldehnungen $\epsilon_{zz}$ [‰]	
		DMS 1	DMS 2
1	0	-0,369	-0,417
2	10	-0,355	-0,372
3	20	-0,246	-0,308
4	40	-0,111	-0,153
5	70	-0,022	-0,049
6	100	-0,013	-0,026

In Abbildung 3.12 sind die maximalen Dehnungen an den Lastpositionen aufgetragen und somit lässt sich der Längsverlauf der Dehnungen abbilden.



**Abbildung 3.12:** Maximale Stauchungen, in Abhängigkeit des Abstandes der Last vom Messpunkt, unter einer Belastung von  $F = 300 \text{ kN}$  für das Schienenprofil A 75, auf HEB-200 gelagert

### 3.5.3. Ergebnisse für das Schienenprofil A 100

Für das Schienenprofil A 100 wurde eine Probebelastung von  $F = 400 \text{ kN}$  festgelegt. Die Ergebnisse der beiden Versuche sind nachfolgend angeführt.

#### Versuch 1:

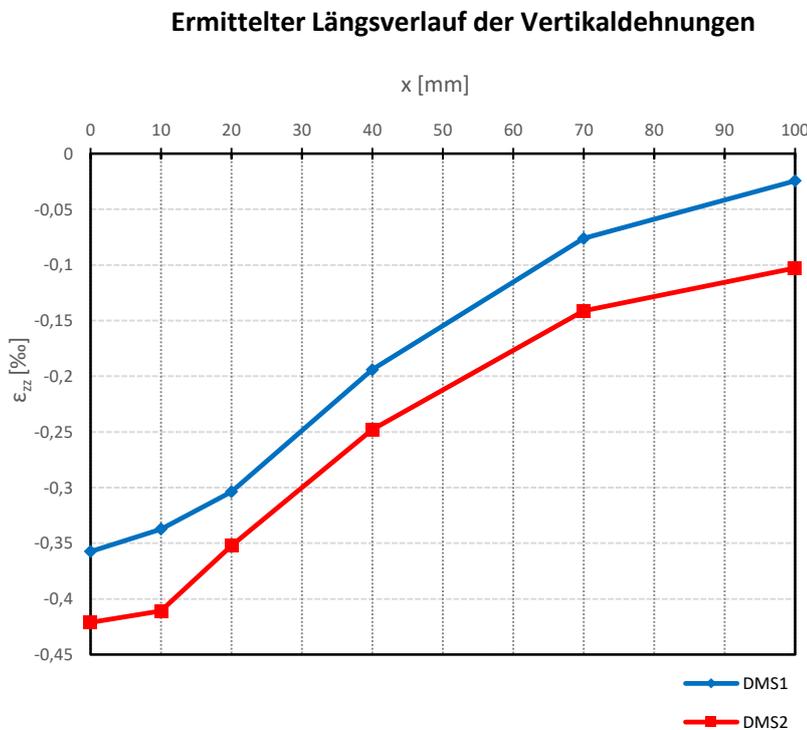
Der erste Versuch, mit der starr gebetteten Schiene, liefert die in Tabelle 3.6 angeführten maximalen Stauchungen für die verschiedenen Lasteinleitungspunkte. Dabei ist eine Abweichung der Ergebnisse der beiden DMS von ca. 15% zu vermerken.

### 3. Laborversuche

**Tabelle 3.6:** Maximaldehnungen bei  $F = 400 \text{ kN}$  an den Messpunkten, Schienenprofil A 100, starr gelagert

Position der Lasteinleitung [-]	Abstand vom Messpunkt [mm]	Vertikaldehnungen $\epsilon_{zz}$ [‰]	
		DMS 1	DMS 2
1	0	-0,357	-0,421
2	10	-0,337	-0,411
3	20	-0,303	-0,352
4	40	-0,194	-0,248
5	70	-0,076	-0,141
6	100	-0,024	-0,102

In Abbildung 3.13 ist der ermittelte Längsverlauf der Vertikaldehnungen, als Ergebnis der maximal gemessenen Dehnungen, in Abhängigkeit der Entfernung der Lasteinleitung von den Messpunkten, dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Dehnungen bei 100 mm Entfernung der Lasteinleitung noch einen signifikanten Wert aufweisen. Dieser ist noch höher als beim Schienenprofil A 75. Um eine exakte Lasteinleitungslänge zu ermitteln sind für diesen Versuch die Schienenstücke mit einer Länge von 400 mm, offenbar zu kurz. Es können aus diesem Versuch der Maximalwert der vertikalen Dehnungen, sowier der Abfall der Dehnungen in den ersten 100 mm, ermittelt werden.



**Abbildung 3.13:** Maximale Stauchungen, in Abhängigkeit des Abstandes der Last vom Messpunkt, unter einer Belastung von  $F = 400 \text{ kN}$  für das Schienenprofil A 100, bei starrer Lagerung

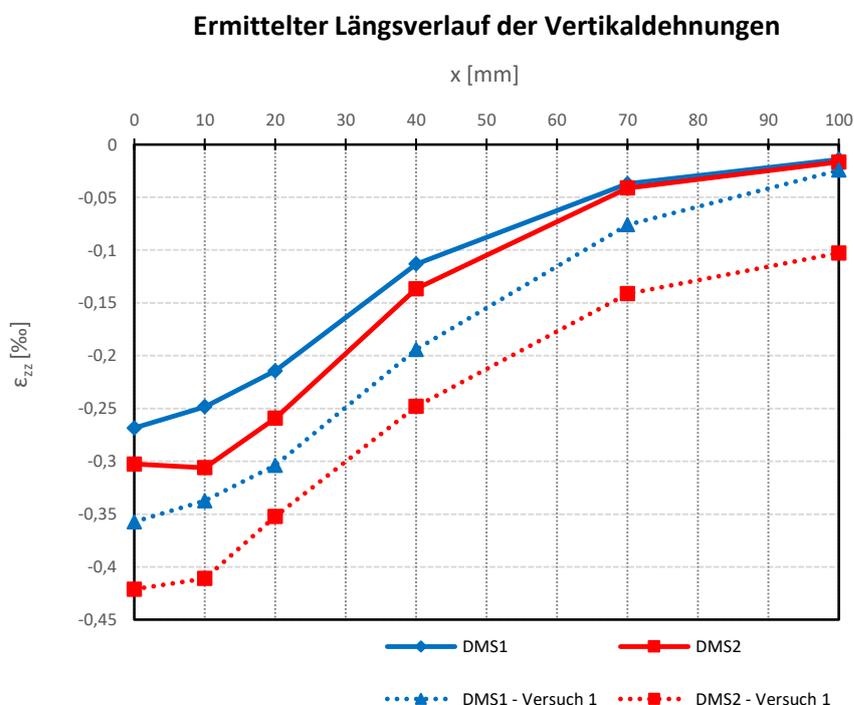
Versuch 2:

Im zweiten Versuch wurde die Schiene auf dem Walzprofil HEA-200 aufgelagert. Im Versuch wurde die Last wieder an den verschiedenen Lasteinleitungspunkten aufgebracht. Dies liefert die Ergebnisse für die maximalen Dehnungen in Tabelle 3.7.

**Tabelle 3.7:** Maximaldehnungen bei  $F = 400 \text{ kN}$  an den Messpunkten, Schienenprofil A 100 auf Träger HEB- 200

Position der Lasteinleitung [-]	Abstand vom Messpunkt [mm]	Vertikaldehnungen $\epsilon_{zz}$ [‰]	
		DMS 1	DMS 2
1	0	-0,268	-0,303
2	10	-0,248	-0,306
3	20	-0,214	-0,259
4	40	-0,113	-0,137
5	70	-0,037	-0,041
6	100	-0,014	-0,017

In Abbildung 3.14 werden die Messergebnisse aus den Versuchen wieder in einem Diagramm aufgetragen, was den im Versuch ermittelten Längsverlauf der Dehnungen ergibt.



**Abbildung 3.14:** Maximale Stauchungen, in Abhängigkeit des Abstandes der Last vom Messpunkt, unter einer Belastung von  $F = 400 \text{ kN}$  für das Schienenprofil A 100, auf HEB-200 gelagert

#### 3.5.4. Ergebnisse für das Schienenprofil A 120

Für das Schienenprofil A 120 wurde eine Versuchsbelastung von  $F = 500 \text{ kN}$  festgelegt. Die bei der Durchführung des Versuchs gemessenen Dehnungen an den Messpunkten liefern folgende Ergebnisse:

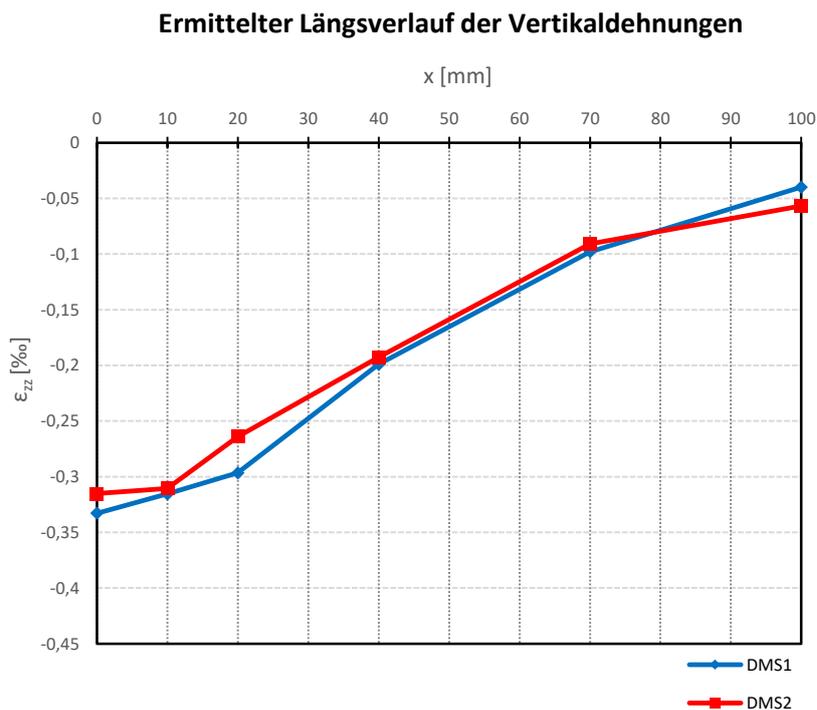
##### Versuch 1:

Die Ergebnisse des ersten Versuches, mit der starr gebetteten Schiene bei einer Belastung von  $F = 500 \text{ kN}$ , sind in Tabelle 3.8 angeführt. Die Messungen der beiden DMS weist eine Abweichung von 5 % auf. Daraus ist festzustellen, dass das Messen von ungewollten Exzentrizitäten bei den größeren Schienenprofilen A 100 und A 120 weniger ins Gewicht fällt, als bei den kleineren Profilen A 55 und A 75.

**Tabelle 3.8:** Maximaldehnungen bei  $F = 500 \text{ kN}$  an den Messpunkten, Schienenprofil A 120, starr gelagert

Position der Lasteinleitung [-]	Abstand vom Messpunkt [mm]	Vertikaldehnungen $\epsilon_{zz}$ [‰]	
		DMS 1	DMS 2
1	0	-0,333	-0,315
2	10	-0,316	-0,311
3	20	-0,297	-0,264
4	40	-0,199	-0,193
5	70	-0,098	-0,091
6	100	-0,040	-0,057

In Abbildung 3.15 sind die Ergebnisse der Dehnungen an den Messpunkten an den unterschiedlichen Lastpositionen in Diagrammform aufgetragen. Wie schon bei den Schienenprofilen zuvor, kann in diesem Versuch keine Aussage über die tatsächliche Lasteinleitungslänge getroffen werden.



**Abbildung 3.15:** Maximale Stauchungen, in Abhängigkeit des Abstandes der Last vom Messpunkt, unter einer Belastung von  $F = 500 \text{ kN}$  für das Schienenprofil A 120, bei starrer Lagerung

### Versuch 2:

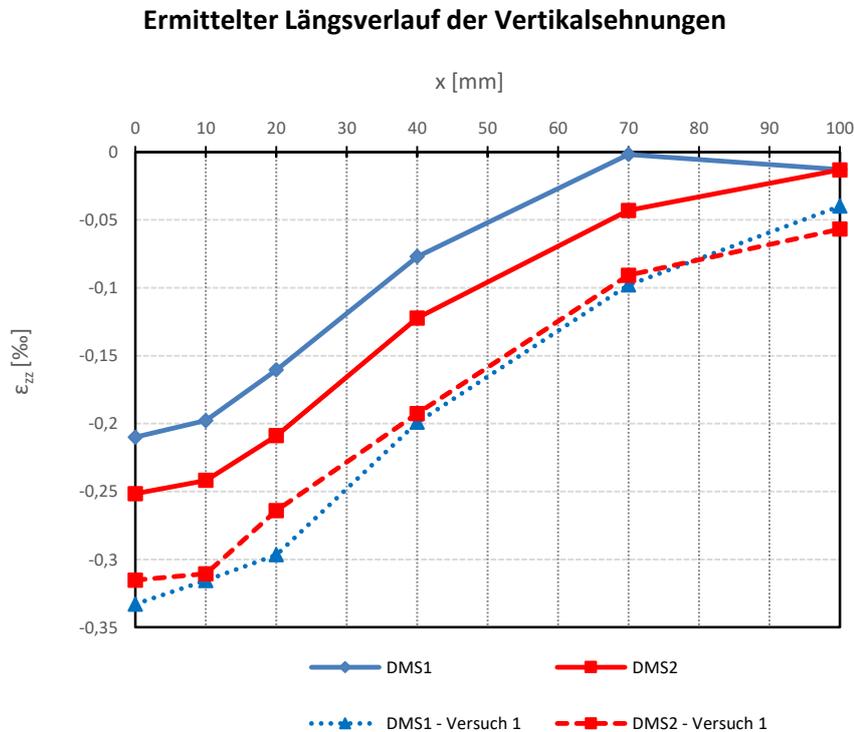
Im zweiten Versuch, mit der auf dem Walzprofil HEB-200 gelagerten Schiene, ergeben sich die Dehnungen, wie in Tabelle 3.9 angeführt.

**Tabelle 3.9:** Maximaldehnungen bei  $F = 500 \text{ kN}$  an den Messpunkten, Schienenprofil A 120 auf Träger HEB- 200

Position der Lasteinleitung [-]	Abstand vom Messpunkt [mm]	Vertikaldehnungen $\epsilon_{zz}$ [‰]	
		DMS 1	DMS 2
1	0	-0,210	-0,252
2	10	-0,198	-0,242
3	20	-0,160	-0,209
4	40	-0,077	-0,122
5	70	-0,002	-0,043
6	100	-0,013	-0,013

### 3. Laborversuche

In Abbildung 3.16 sind die Ergebnisse des zweiten Versuchs in Diagrammform aufgetragen, um den im Versuch ermittelten Längsverlauf der Vertikaldehnungen darzustellen.



**Abbildung 3.16:** Maximale Stauchungen, in Abhängigkeit des Abstandes der Last vom Messpunkt, unter einer Belastung von  $F = 500 \text{ kN}$  für das Schienenprofil A 120, auf HEB-200 gelagert

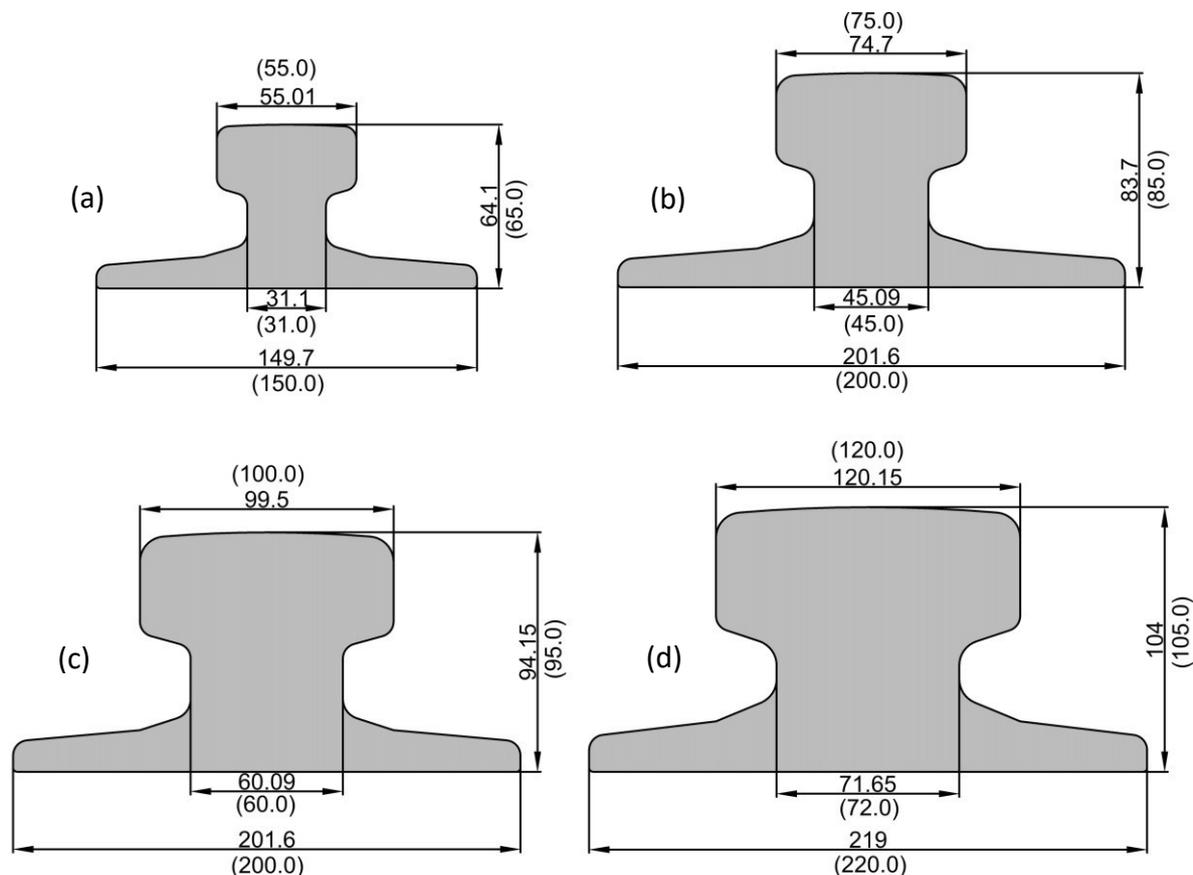
## 3.6. Vergleichsrechnungen zu den Versuchen mittels FE-Analyse

Um die Zuverlässigkeit der Ergebnisse aus den FE-Analysen zu überprüfen, wurden die Versuchsaufbauten zu Versuch 1 und Versuch 2 ebenfalls modelliert, um die Ergebnisse aus Messung und numerischer Berechnung zu vergleichen. Dadurch können gegebenenfalls Korrekturen vorgenommen werden, um Abweichungen und Unsicherheiten auszugleichen. Verglichen wird der gemessene und der berechnete Längsverlauf der Dehnungen am Schienenhals. Dabei werden die Messungen der Dehnmessstreifen gemittelt, um zu sehen, ob die Messung von ungewollten Exzentrizitäten im Versuch, durch Bildung des Mittelwertes, eliminiert werden kann.

### 3.6.1. Modellbildung der Versuche

Für die Modellbildung wurden die selben Annahmen, wie für die FE-Modelle der Parameterstudie, getroffen (siehe Abschnitt 2.4). Es wurden die Querschnittsabmessungen der Schienen im Modell jenen der Probekörper angepasst, da diese geringfügig von den Abmessungen nach DIN 536-1 [1]

abweichen. Die vor dem Versuch aufgenommenen Abmessungen der Schienenprofile sind in Abbildung 3.17 dargestellt. Die Abweichungen sind so gering, dass kein wesentlicher Einfluss, gegenüber den Berechnungen mit den idealen Abmessungen, zu erwarten ist.



**Abbildung 3.17:** Abmessungen der im Versuch geprüften Schienenprofile A 55 (a), A 75 (b), A 100 (c) und A 120 (d) und Vergleich mit den Nennwerten nach DIN 536-1 [1] (Klammerwerte)

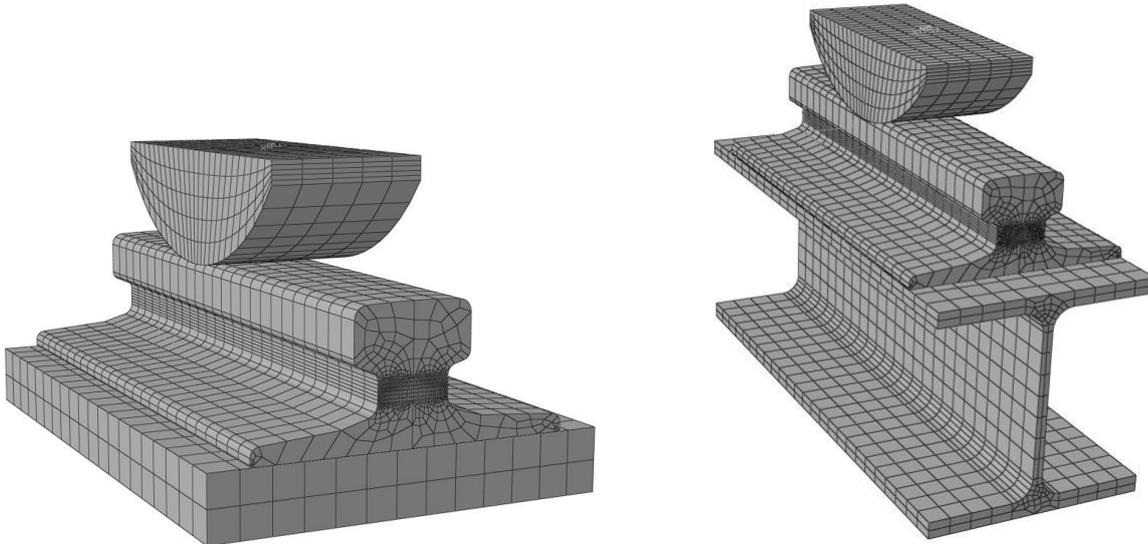
Die Abmessung mit den größten Abweichungen ist bei jedem Profil die Schienenhöhe. Hierbei ist nach DIN 536-1, Blatt 1 [1] eine Toleranz von  $\pm 1,0$  mm zulässig.

Es wurden für jedes Schienenprofil zwei FEM-Modelle, entsprechend der beiden Versuchsaufbauten (mit und ohne Träger HEB-200), angefertigt. Dabei wurden als Ergebnisse die Vertikaldehnungen an der Schienenhalsaußenfläche ausgegeben und mit den Messungen der Dehnungen im Versuch verglichen.

Da das HEB-200 Profil an der Oberfläche abgefräst wurde, beträgt die Flanschstärke anstatt 14,0 mm nur 13,5 mm. Dies wurde im FEM-Modell berücksichtigt.

Die Modellierung der Trägersauflagerung nach Abbildung 3.5 erfolgt in vereinfachter Form, wobei im FEM-Modell eine freie Trägerverdrehung in Trägerlängsrichtung ermöglicht wurde, mit einer Stützweite von  $L = 500$  mm. Dies entspricht der Innenlichte der Auflagerleisten im Versuch. Eines der beiden Linienlager wurde als längsverschieblich angesetzt.

### 3. Laborversuche



**Abbildung 3.18:** Modell der FE-Rechnung der Versuchsaufbauten von Versuch 1 (links) und Versuch 2 (rechts), beispielsweise für das Schienenprofil A 75

In Tabelle 3.10 werden die maximalen Vertikaldehnungen am Schienenhals unter dem Kranrad aus den Grundmodellen der Parameterstudie, mit jenen aus den FE-Modellen der Versuchsaufbauten, verglichen. Es ist hier festzuhalten, dass die geringfügige Abänderung der Schienengeometrie in den Modellen nur bei dem Schienenprofil A 100 eine Änderung der Dehnung von ca. 5% bewirkt. Bei dem Schienenprofil A 75 fällt die Änderung der Dehnung mit 3% geringer aus. Bei dem Schienenprofil A 55 und A 120 ist die Änderung unter 1%. Die Abweichung der realen Schienengeometrie von den Nominalwerten nach DIN 536-1 [1] wird in jedem Fall berücksichtigt werden müssen, um zutreffende Radlasten zu prognostizieren.

**Tabelle 3.10:** Vergleich der maximalen vertikalen FEM-Dehnungen aus Grundmodell und Versuchsmodell für Versuch 1 (beide starr gestützt)

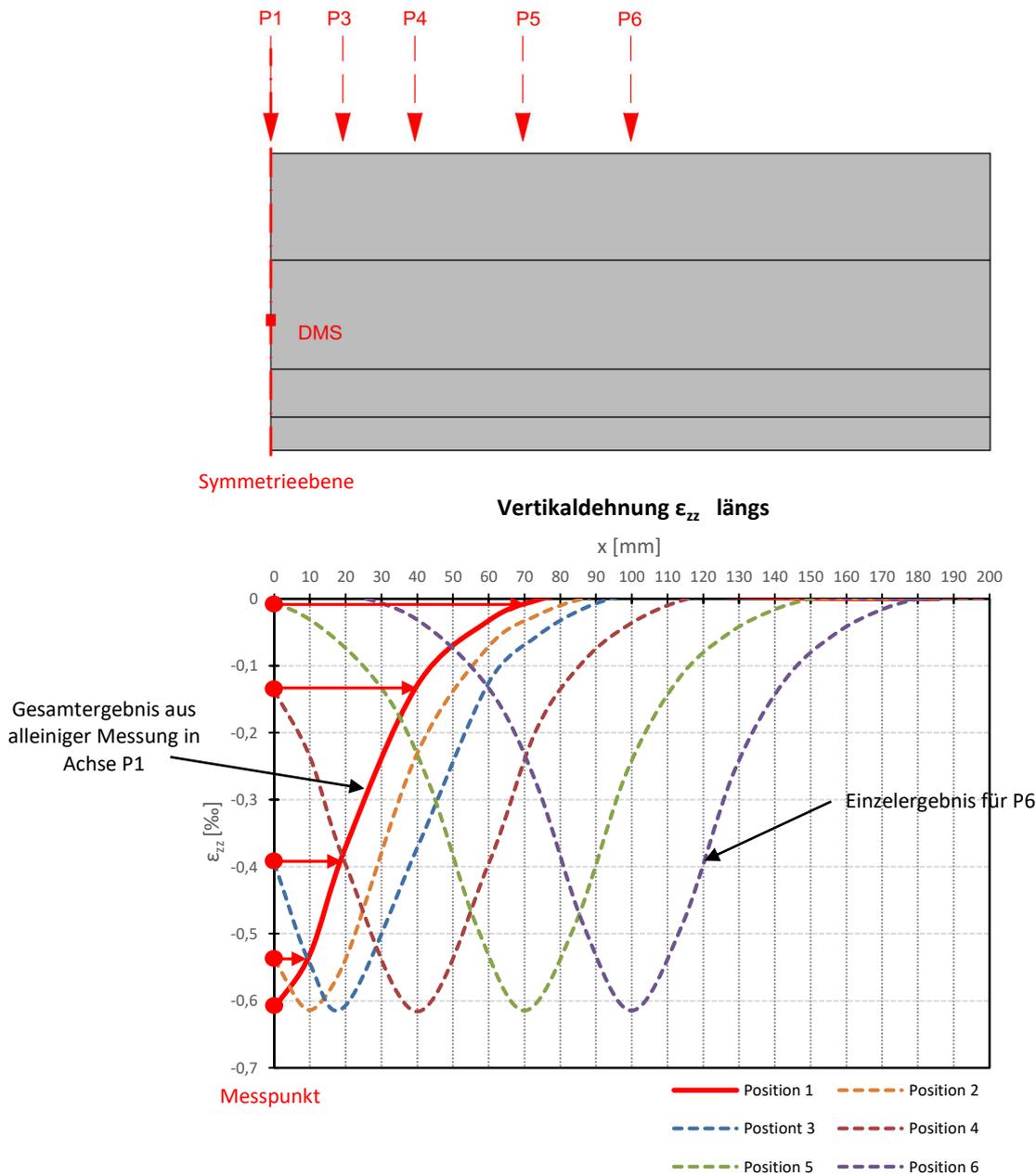
Schienenprofil [-]	Belastung [kN]	Vertikaldehnungen aus FE-Analyse $\epsilon_{zz}$ [‰]		Abweichung [%]
		Grundmodell	Versuch 1	
A 55	200	-0,605	-0,611	1,0
A 75	300	-0,475	-0,486	2,3
A 100	400	-0,398	-0,419	5,0
A 120	500	-0,432	-0,436	1,0

### 3.6.2. Vergleich der Vertikaldehnungsverläufe aus Versuch und FE-Analyse

Es wurden für alle Schienenprofile die Längsverläufe der Vertikaldehnungen in der FE-Analyse ausgegeben und in einem Diagramm dargestellt. Diese Ergebnisse werden mit den in den Versuchen ermittelten Längsverläufen verglichen. Da in den zuvor dargestellten Ergebnissen der Versuche ersichtlich wurde, dass die Messwerte der beiden DMS, auch bei zentrischer Belastung, teilweise erheblich voneinander abweichen können, was auf ungewollte Exzentrizitäten im Versuch zurückzuführen ist, werden als Vergleichswert die ermittelten Verläufe aus den Versuchen gemittelt und mit den Ergebnissen aus der FE-Analyse verglichen.

Abbildung 3.19 zeigt den Grundgedanken, wie durch das Aufbringen der Last an verschiedenen Positionen im Versuch, der Verlauf der Dehnungen für eine diskrete Laststellung ermittelt werden kann, welcher sich unter dem Rad einstellt. Die Dehnungen werden immer in der Mitte der Schiene gemessen, während die Lasteinleitung sich immer weiter vom Messpunkt entfernt. An jeder Lasteinleitungsposition stellt sich eine Dehnungsverteilung, wie in der Abbildung 3.19 strichliert dargestellt, ein. Der an den Dehnmesstreifen abgelesene Wert der Dehnung entspricht dabei demselben Wert, den die Dehnung bei Lastaufbringung in Schienenmitte (in Längsrichtung gesehen), in der entsprechenden Entfernung aufweist. Somit kann, durch Auftragen der gemessenen Werte der Dehnungen für jede Lastposition, in der entsprechenden Entfernung vom Messpunkt, die Längsverteilung der Dehnungen unter dem Rad ermittelt werden.

### 3. Laborversuche

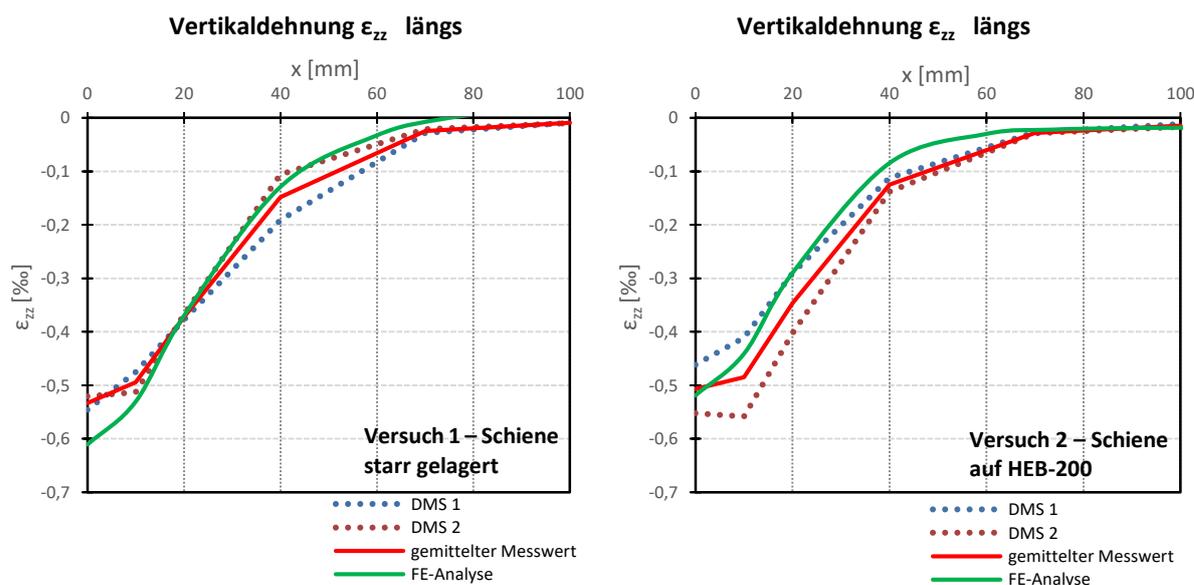


**Abbildung 3.19:** Ergebnisse der Längsverteilung der Vertikaldehnungen bei Aufbringen der Last an den verschiedenen Lastpositionen

Somit ist es möglich durch alleinige Messung an einer Stelle der Schiene, einen Längsverlauf der Vertikaldehnungen, welcher bei direkter Belastung in Position 1 – unmittelbar über dem DMS – auftritt, abzuleiten. In weiterer Folge werden diese messtechnisch ermittelten Längsverläufe, jenen mittels einer FE-Analyse berechneten Längsverläufen (für jedes Schienenprofil), gegenübergestellt. Dies erfolgt für beide Versuchsaufbauten (starr gebettete Schiene bzw. auf HEB-200 gelagerte Schiene).

a) Ergebnisse für das Schienenprofil A 55:

Für das Schienenprofil A 55 wurden die numerischen Modelle der beiden Versuche auf einem Lastniveau von  $F = 200$  kN zentrisch belastet, und die Ergebnisse für die Vertikaldehnungen längs der Schienenhalsaußenfläche ausgegeben. Diese werden in Abbildung 3.20 den ermittelten Längsverläufen aus den Versuchen gegenübergestellt. Dabei ist ersichtlich, dass die gemittelten Versuchsergebnisse relativ gut mit den FE-Ergebnissen zusammenpassen. Lediglich der Maximalwert im Versuch 1 weicht deutlich von dem berechneten Wert ab. Dies könnte durch einen nicht exakt positionierten DMS erklärt werden.

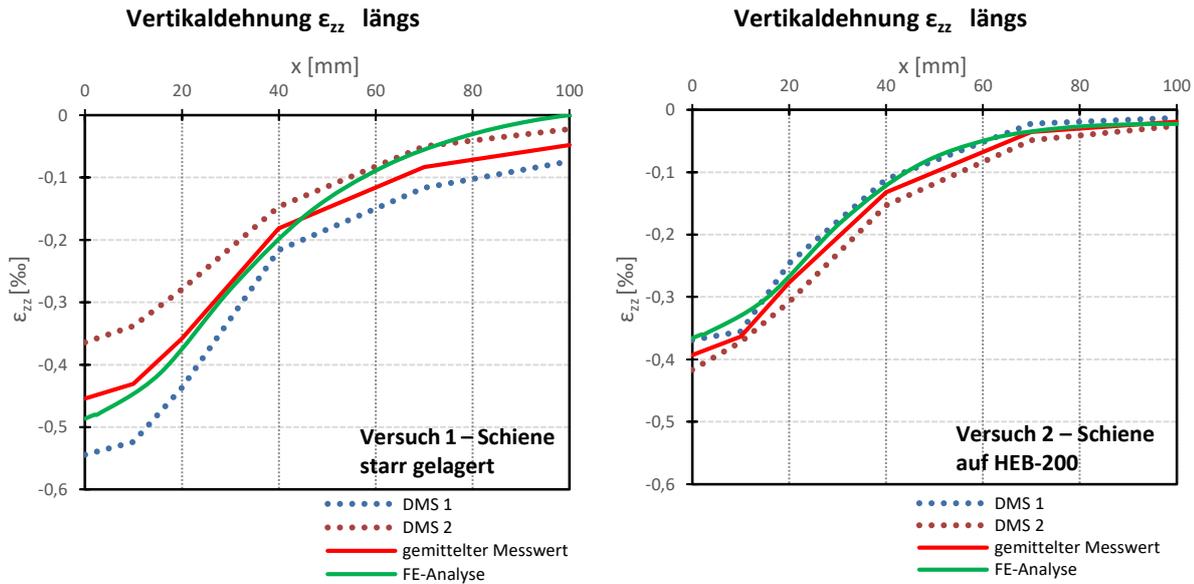


**Abbildung 3.20:** Vergleich der Längsverteilung der Vertikaldehnungen aus dem Versuch 1 (links) und dem Versuch 2 (rechts) mit den jeweiligen FE-Analysen für das Schienenprofil A 55, unter einer Belastung von  $F = 200$  kN

b) Ergebnisse für das Schienenprofil A 75:

Die numerischen Modelle für das Schienenprofil A 75 wurden für die Nachrechnung des Versuches zentrisch mit einer Last von  $F = 300$  kN belastet. Als Ergebnisse werden wieder die Verläufe der Dehnungen an der Schienenhalsaußenfläche dargestellt. In Abbildung 3.21 ist der Vergleich dieser Verläufe mit den in den Versuchen ermittelten Längsverläufen der Dehnungen verglichen. Dazu werden die gemittelten Messwerte zum Vergleich herangezogen. Die Diagramme zeigen, dass die gemittelten Messwerte sehr gut mit jenen der FE-Analyse zusammenpassen. Im Versuch 1, der starr gebetteten Schiene, ist ersichtlich, dass der Abfall der Dehnungen in der numerischen Berechnung schneller stattfindet. Der Messwert aus dem Versuch zeigt jedoch auch in der äußersten Laststellung noch eine Dehnung in Schienenmitte an, was damit erklärt werden kann, dass sich durch den Einfluss des einseitig zu kurzen „Schienenendes“ im Versuch die Dehnungen zum Messpunkt hin umlagern.

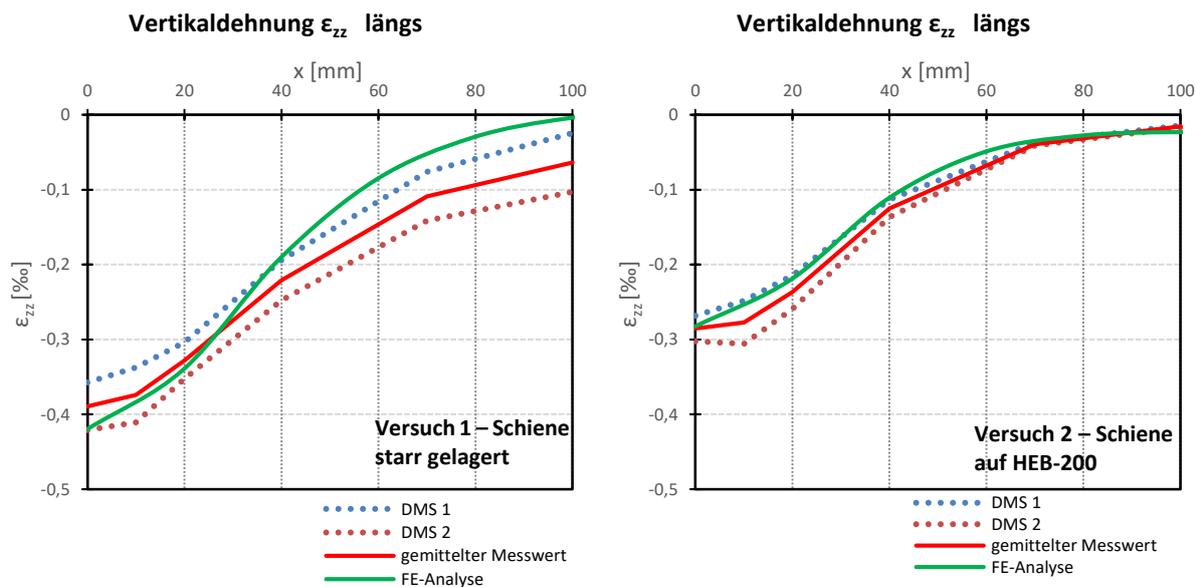
### 3. Laborversuche



**Abbildung 3.21:** Vergleich der Längsverteilung der Vertikaldehnungen aus dem Versuch 1 (links) und dem Versuch 2 (rechts) mit den jeweiligen FE-Analysen für das Schienenprofil A 75 unter einer Belastung von  $F = 300 \text{ kN}$

#### c) Ergebnisse für das Schienenprofil A 100:

Die Modelle zur Nachbildung der Versuche für das Schienenprofil A 100 wurden in der Mitte der Schiene mit  $F = 400 \text{ kN}$  belastet. Als Vergleichswerte wurden wieder die Längsverteilungen der Dehnungen aus den Messungen gegenübergestellt. Dabei wurde aus den Messergebnissen der Versuche auch wieder der Mittelwert gebildet, um so die Unsicherheiten des Versuchsaufbaus und in der Schienengeometrie wieder zu eliminieren. In Abbildung 3.22 sind die ermittelten Verläufe aus den Versuchsergebnissen und die Ergebnisse aus der FE-Analyse dargestellt. Wie schon zuvor beim Profil A 75, ist im Versuch 1 ersichtlich, dass die Dehnungen auch an der äußersten Lastposition noch vorhanden sind, jedoch in der numerischen Berechnung die Dehnungen in diesem Punkt fast Null sind. Dies ist, wie schon beim Profil A 75 angemerkt, darauf zurückzuführen, dass ein Einfluss im Versuch aus dem einseitig zu kurzen Schienenende vorhanden ist.

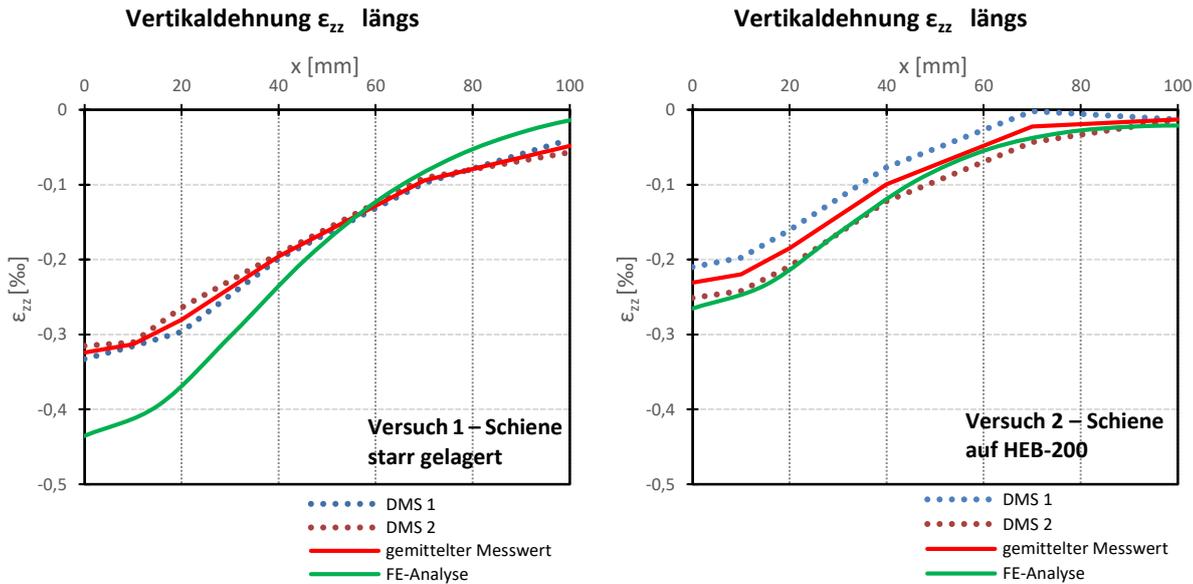


**Abbildung 3.22:** Vergleich der Längsverteilung der Vertikaldehnungen aus dem Versuch 1 (links) und dem Versuch 2 (rechts) mit den jeweiligen FE-Analysen für das Schienenprofil A 100 unter einer Belastung von  $F = 400$  kN

d) Ergebnisse für das Schienenprofil A 120:

Bei den Modellen für die Versuchsnachrechnung des Schienenprofils A 120 wurde in der Mitte der Schiene, zentrisch, eine Last von  $F = 500$  kN aufgebracht. Die Ergebnisse für die Dehnungen wurden längs an der Halsaußenfläche ausgegeben und mit den gemittelten Messwerten aus den Versuchen verglichen. Die Längsverläufe aus den FE-Analysen, sowie die aus den Versuchen ermittelten Längsverläufe, sind in Abbildung 3.23 dargestellt. Im Vergleich der Ergebnisse aus der FE-Rechnung mit den gemessenen Werten aus Versuch 1 zeigt sich eine enorme Abweichung des Maximalwertes der vertikalen Dehnungen um einen Faktor von ca. 1,3.

### 3. Laborversuche



**Abbildung 3.23:** Vergleich der Längsverteilung der Vertikaldehnungen aus den Versuch 1 (links) und den Versuch 2 (rechts) mit den jeweiligen FE-Analysen für das Schienenprofil A 120 unter einer Belastung von 500 kN

#### 3.6.3. Schlussfolgerungen aus den Versuchsergebnissen

Grundsätzlich hat sich in den Versuchen gezeigt, dass die Messung der Vertikaldehnungen durch eine rein zentrische Belastung fast nicht möglich ist. Es sind immer Abweichungen in den Messwerten der beiden Dehnmessstreifen vorhanden. Dies ist auf die Kopfform der Schiene, sowie auf das Einrichten der Schiene in der Prüfmaschine zurückzuführen. Es zeigen auch schon kleinste ungewollte Exzentrizitäten teils große Abweichungen der beiden DMS-Werte. Die gemittelten Werte der Messergebnisse stimmen in den meisten Fällen sehr gut mit den numerischen Ergebnissen überein. Eine Abweichung von bis zu 10% ist im zweiten Versuch, der Kran­schiene A 120 auf dem HEB-Profil zu vermerken. Der erste Versuch der starr gebetteten Kran­bahnschiene A 120 kann nicht berücksichtigt werden, da die Dehnungen im Versuch um bis zu 30 % von den FE-Ergebnissen abweichen. Da die übrigen Messergebnisse jedoch besser mit der FE-Analyse übereinstimmen, ist davon auszugehen, dass hier Fehler in den Messdaten vorliegt.

Es kann davon ausgegangen werden, dass durch Mittelwertbildung von zwei gegenüberliegenden Messergebnissen, das Mitmessen von ungewollten Exzentrizitäten größtenteils eliminiert werden kann und dieser Mittelwert somit zur Ermittlung der zutreffenden Radlast herangezogen werden kann.

Desweiteren ist durch die Ergebnisse des Versuches gezeigt, dass die Modellbildung relativ gut mit der Realität übereinstimmt. Somit kann festgehalten werden, dass die Ergebnisse aus dem Kapitel 2 der Parameterstudie, für die weiterfolgende Ausarbeitung einer Vorgehensweise zur Bestimmung von vorhandenen Radlasten aus gemessenen Dehnungen, herangezogen werden können.

## 4

## 4. Ermittlung der Radlast aus Vertikaldehnungen am Schienenhals

### 4.1. Vorbemerkung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus Parameterstudie und Versuch in eine übersichtliche Form gebracht. Ziel ist es eine Methode herzuleiten, welche es ermöglicht, aus gemessenen Vertikaldehnungen an einer Kranschiene, aus einem Insitu-Versuch, auf die vorhandene Radlast auf der Kranschiene schließen lässt. Dazu wird in einem ersten Schritt ein mechanischer Ansatz, zur Ermittlung der Radlast aus gemessenen Dehnungen, beschrieben. Dieser wird dann vereinfacht und es wird versucht einen Basiswert  $R_{ref}$  der Radlast zu ermitteln, welcher dann skaliert werden soll. Für die Ermittlung dieser Skalierungsfaktoren sollen die Ergebnisse der Parameterstudie eine Grundlage bilden.

### 4.2. Mechanischer Ansatz

In Abbildung 4.1 ist der Verlauf der Vertikalspannungen, längs und quer, entlang einer horizontalen Schnittebene durch die Mitte des Schienenhalses dargestellt. Diese vertikalen Spannungen lassen sich aus den gemessenen vertikalen Dehnungen ermitteln.

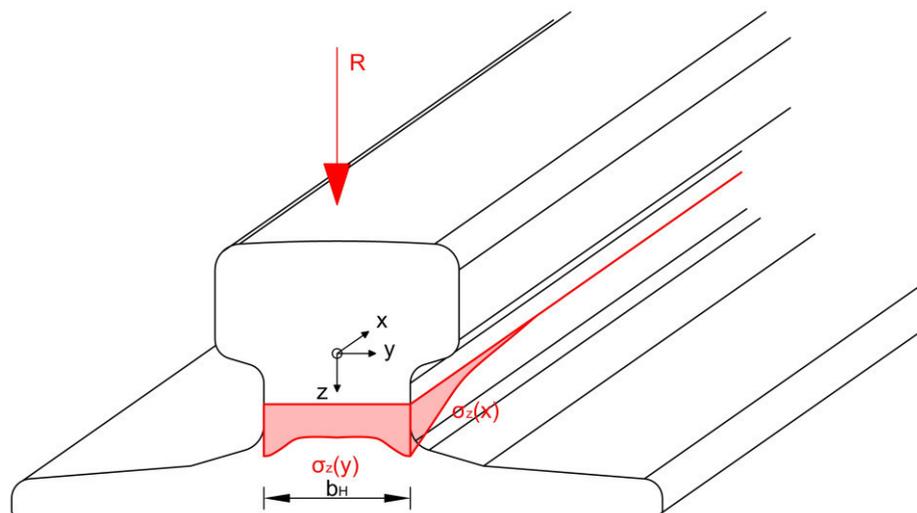


Abbildung 4.1: Spannungsverlauf längs und quer im Horizontalschnitt durch den Schienenhals

#### 4. Ermittlung der Radlast aus Vertikaldehnungen am Schienenhals

---

Durch das Bilden der Gleichgewichtsbedingung in vertikaler Richtung, lässt sich die Radlast durch das Integral über den Vertikalspannungsverlauf darstellen.

$$R = \int_A \sigma_z(x, y) dA \quad (2)$$

Im Kapitel 2, Numerische Vorstudie - Parameterstudie, wurde bereits gezeigt, dass ein linearer Bezug zwischen Spannungen und Dehnungen besteht. Da die vertikalen Dehnungen gemessen werden, wird als erstes eine Umrechnung von den Vertikalspannungen in Gl. (2) auf die Vertikaldehnungen durchgeführt. Als Umrechnung dient hier vereinfacht nur der E-Modul (Anmerkung: nur bei einachsigem Spannungszustand, ohne Querdehnungsbehinderung, zutreffend). Er ist ein konstanter Faktor und wird vor das Integralzeichen herausgezogen. Die Annahme, dass ein lineares Umrechnen von Spannungen auf Dehnungen durchgeführt werden kann, wird hier zur Vereinfachung getroffen. In der Realität ist abzuklären, ob sich auch durch den Einfluss eines zweiten Rades, eine Behinderung der Längsdehnung einstellt und somit die Umrechnung linear zu ungenau wird.

$$R = E \int_A \varepsilon_z(x, y) dA \quad (3)$$

Damit sei die mechanische Grundlage zur Ermittlung der Radlast gezeigt. Es folgt nun die Beschreibung, wie das Integral durch Trennung in x- und y-Richtung näherungsweise gelöst werden kann.

### 4.3. Näherungslösung für die Dehnungsverläufe

Um das Integral nach Gl. (3) lösen zu können, müssen die exakten Verläufe bekannt sein. Daher wird hier versucht, eine Funktion zur Näherung des Längsverlaufes zu verifizieren. Der Querverlauf wird in erster Annahme konstant gesetzt und mit der Differenz der außenliegenden Maximalwerte der Dehnungen zum Mittelwert skaliert. Der erste Versuch zur Ermittlung der Radlasten bezieht sich auf das Grundmodell der starr gebetteten Schiene. Dazu werden hier die ermittelten Referenzdehnungen  $\varepsilon_{z,0}$  der Grundmodelle am Messpunkt eingesetzt.

#### 4.3.1. Längsverlauf

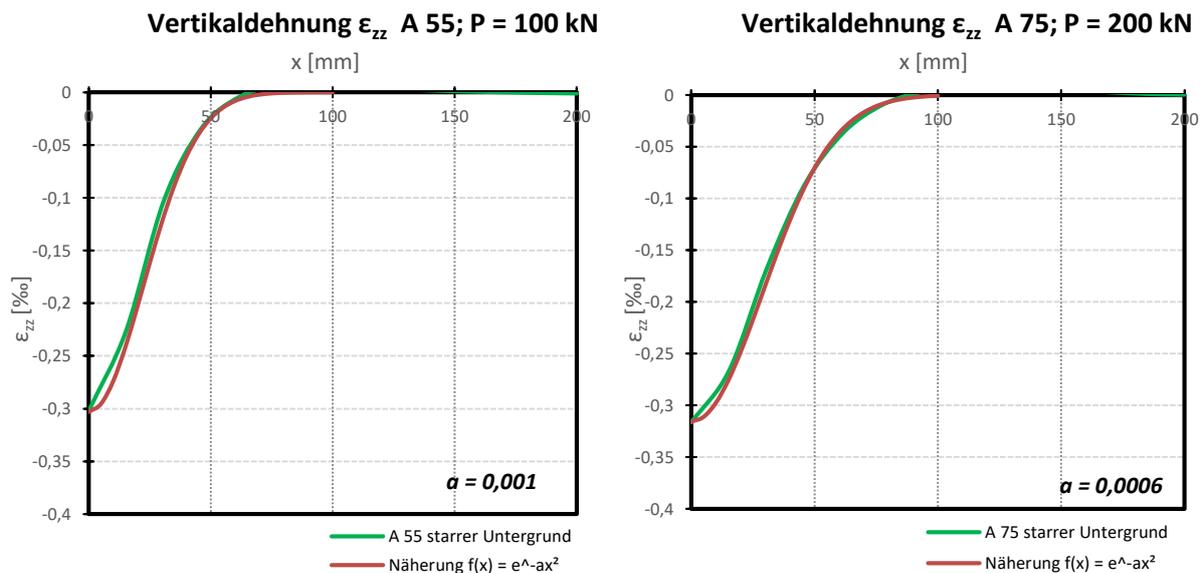
Der Längsverlauf ist aus einem Insitu-Versuch bekannt, und kann somit auch für jeden spezifischen Fall angeglichen werden. Es wurde nach einer Funktion gesucht, die dann auch einfach angepasst werden kann.

In Abbildung 4.3 sind die Längsverläufe für alle vier untersuchten Schienenprofile, am jeweiligen Grundmodell, mit starrer Schienenlagerung, dargestellt. Weiters ist eine Näherungsfunktion eingetragen, welche den Verlauf sehr gut widerspiegelt. Die Funktion die den Verlauf in Längsrichtung am Besten trifft ergibt sich zu:

$$\varepsilon_z(x) = \varepsilon_{z,0} \cdot e^{-ax^2} \quad (4)$$

Die Dehnung  $\varepsilon_{z,0}$  ist hier die maximal mögliche Dehnung an der Außenseite des Schienenhalses, die sich direkt unter der Last, bei einer starr gebetteten Schiene, einstellt. Das entspricht den Werten, die an den vier Grundmodellen ermittelt wurden.

Die Belastung jeder Schiene wurde aus der Parameterstudie übernommen und beträgt für die Schiene A 55,  $P = 100$  kN, für die Schiene A 75,  $P = 200$  kN und für die Schienen A 100 und A 120 jeweils  $P = 300$  kN. In Abbildung 4.3 und Abbildung 4.3 sind die Längsverläufe der Vertikaldehnungen aus den Grundmodellen jedes Schienenprofils abgebildet. Zusätzlich ist der angenäherte Verlauf mit der oben angeführten Funktionsgleichung (Gl. (4)) gegenübergestellt. Die zutreffenden Werte für den Parameter  $a$  sind der Tabelle 4.1 zu entnehmen.



**Abbildung 4.2:** Berechnete numerische Längsverläufe der Vertikalspannungen und die jeweilige zutreffende Näherungsfunktion nach Gl. (4) für die Schienenprofile A 55 (links) und A 75 (rechts)

4. Ermittlung der Radlast aus Vertikaldehnungen am Schienenhals

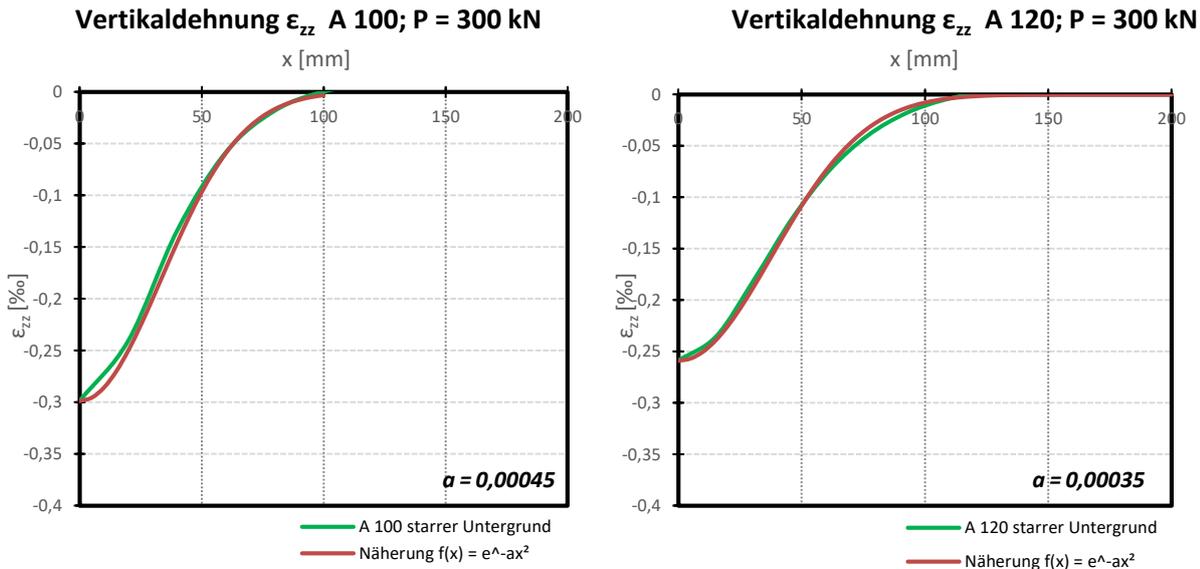


Abbildung 4.3: Berechnete numerische Längsverläufe der Vertikalspannungen und die jeweilige zutreffende Näherungsfunktion nach Gl. (4) für die Schienenprofile A 100 (links) und A 120 (rechts)

Die gewählte Näherungsfunktion trifft die Verläufe bei allen Schienenprofilen sehr gut und kann über den Faktor  $\alpha$  reguliert werden. In Tabelle 4.1 sind die gewählten Faktoren  $\alpha$  für das jeweilige Schienenprofil angeführt. Es sei noch erwähnt, dass die Belastung keinen Einfluss auf den Verlauf, sondern nur auf den Maximalwert der Funktion hat. Der Verlauf, und somit der Faktor  $\alpha$ , ändert sich aufgrund des linear-elastischen Verhaltens, bei Belastungssteigerung nicht.

Tabelle 4.1: Zutreffende Faktoren  $\alpha$  und maximale Vertikaldehnungen am Grundmodell in Abhängigkeit des Schienenprofils, Schiene starr gelagert

Schienenprofil	Belastung [kN]	Maximale Dehnung am Grundmodell $\epsilon_{z,0}$ [%]	Faktor $\alpha$ [-]
A 55	100	-0,303	0,001
A 75	200	-0,316	0,0006
A 100	300	-0,299	0,00045
A 120	300	-0,259	0,00035

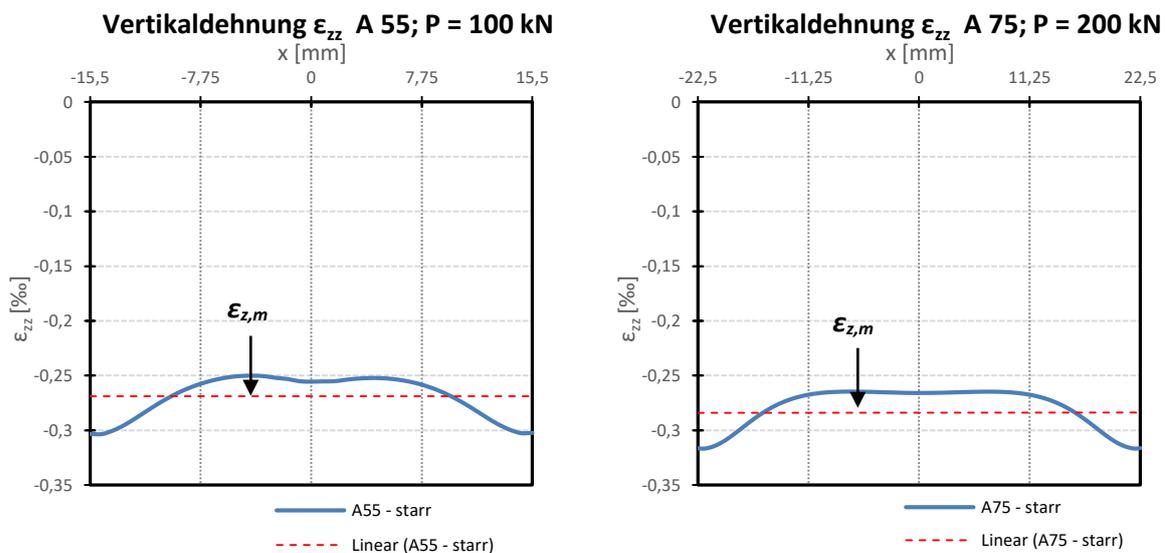
Somit kann der Längsverlauf der vertikalen Dehnungen, welcher sich in den Grundmodellen, bei starr gebetteter Schiene einstellt, sehr gut abgebildet werden. Die Standardlösung für den Integralteil in Längsrichtung, beidseits der Radlast, ergibt sich somit zu:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \epsilon_z(x) dx = \epsilon_{z,0} \sqrt{\frac{\pi}{a}} \tag{5}$$

Die Lösung des Integrals zeigt, dass bei dieser Vorgehensweise die Lasteinleitungslänge keine Rolle spielt, sondern nur der Verlauf, welcher durch den Faktor  $a$  repräsentiert wird. In einem Insitu-Versuch könnten die Dehnungen bei einer Kranüberfahrt in mehreren Querschnitten gemessen werden, wodurch auch der Verlauf mitgemessen wird. Es kann dann also der Verlauf für jeden konkreten Fall, individuell mit einem neuen Faktor  $a$  angeglichen werden.

### 4.3.2. Querverlauf

Im nächsten Schritt müssen die Querverläufe für jedes untersuchte Schienenprofil angenähert werden. Die Querverläufe sind nur aus den numerischen FE-Analysen der Parameterstudie bekannt und können nicht mit einem Versuch abgedeckt werden (Dehnungen nur an den Außenseiten messbar). Da diese zwar nicht konstant, aber zumindest symmetrisch sind, wurde festgelegt, den aus den FE-Analysen ermittelten Mittelwert für die Berechnung heranzuziehen. In Abbildung 4.5 und Abbildung 4.5 sind die ermittelten Querverläufe für alle vier untersuchten Schienenprofile dargestellt, welche am jeweiligen Grundmodell mit starrer Schienenlagerung ermittelt wurden.



**Abbildung 4.4:** Vertikaldehnungen im Querschnitt durch den Schienenhals für die Schienenprofile A 55 (links) und A 75 (rechts), und gleichwertige mittlere Dehnungen, für Schiene starr gelagert

4. Ermittlung der Radlast aus Vertikaldehnungen am Schienenhals

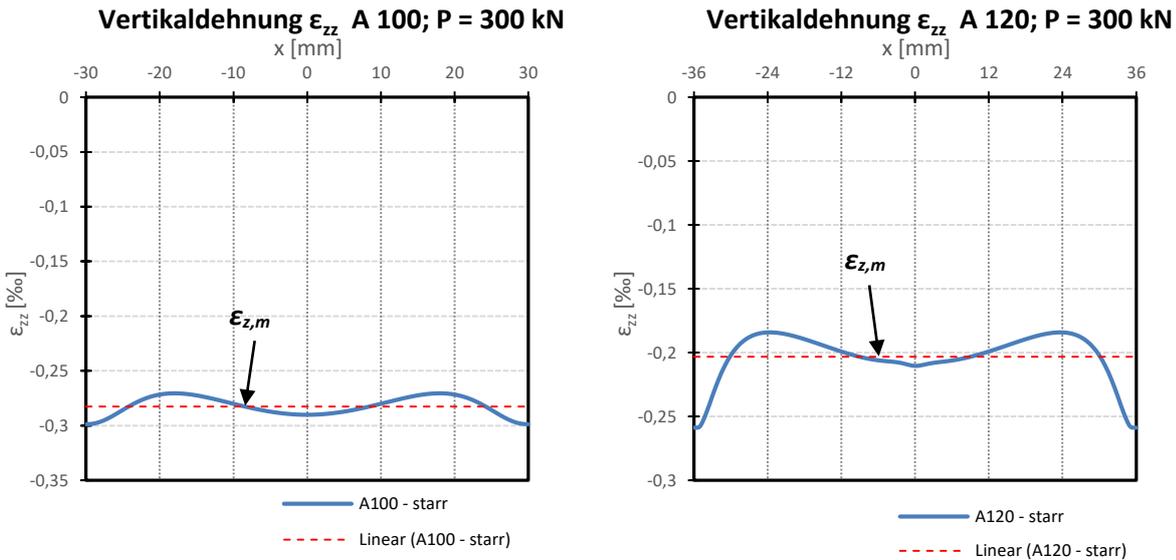


Abbildung 4.5: Vertikaldehnungen im Querschnitt durch den Schienenhals für die Schienenprofile A 100 (links) und A 120 (rechts), und gleichwertige mittlere Dehnungen, für Schiene starr gelagert

Es wurden also für die Ermittlung des Einflusses in Querrichtung die Mittelwerte der Verläufe aus der FE-Analyse herangezogen (Werte  $\epsilon_{z,m}$ ) und mit der Halsbreite multipliziert. Damit ist das vertikale Gleichgewicht erfüllt. Es wurde nun ein Faktor  $\alpha$  eingeführt, um das Verhältnis zwischen gemessener Maximaldehnung  $\epsilon_{z,0}$  und der mittleren Dehnung  $\epsilon_{z,m}$  zu bestimmen. Daraus folgt  $\alpha$  zu:

$$\alpha = \frac{\epsilon_{z,m}}{\epsilon_{z,0}} \tag{6}$$

Für die Lösung des Integrals in Querrichtung ergibt sich also folgend:

$$\int_{-b_H/2}^{+b_H/2} \epsilon_z(y) dy = \epsilon_{z,m} \cdot b_H = \epsilon_{z,0} \cdot \alpha \cdot b_H \tag{7}$$

Der Faktor  $\alpha$  ist in Tabelle 4.2 für das jeweilige Schienenprofil angeführt und ergibt sich aus der Auswertung von Gl. (6) und (7)

Tabelle 4.2: Faktor  $\alpha$  zur Korrektur des Querverlaufes der Vertikaldehnungen, starr gelagerte Schiene

Schienenprofil	Schienenhalsbreite $b_H$ [mm]	Maximale Dehnung $\epsilon_{z,0}$ [‰]	Mittlere Dehnung im Querschnitt $\epsilon_{z,m}$ [‰]	Faktor $\alpha = \frac{\epsilon_{z,m}}{\epsilon_{z,0}}$ [-]
A 55	31	-0,303	-0,269	0,89
A 75	45	-0,316	-0,284	0,90
A 100	60	-0,299	-0,283	0,95
A 120	72	-0,259	-0,203	0,79

### 4.3.3. Einfluss der Abnutzung der Schiene

Gemäß der in Kapitel 2.5.8 Parameterstudie – Einfluss der Schienenabnutzung auf vertikale Dehnungen, ermittelten erhöhten Werte der Dehnungen bei abgenützter Schiene, werden Korrekturfaktoren für die Abnutzung für jedes einzelne Schienenprofil angegeben. Dazu werden die Dehnungen der idealen Schiene (mit Nennabmessungen), jenen bei einem Abnutzungsgrad von 12,5% der Kopfhöhe, aus der numerischen Parameterstudie (siehe Kapitel 2.5), gegenübergestellt. Diese Gegenüberstellung führt zu einem Korrekturfaktor  $k_a$  nach Gl. (8) für jedes Schienenprofil, welcher in Tabelle 4.3 angeführt ist.

$$k_a = \frac{\varepsilon_{z,0}^{12,5\%}}{\varepsilon_{z,0}} \quad (8)$$

**Tabelle 4.3:** Korrekturfaktor  $k_a$  für eine Abnutzung der Schiene von 12,5%

Schienenprofil	Belastung [kN]	Maximale Dehnung ideale Schiene $\varepsilon_{z,0}$ [%]	Maximale Dehnung bei 12,5% Abnutzung $\varepsilon_{z,0}^{12,5\%}$ [%]	Korrekturfaktor $k_a$ [-]
A 55	100	-0,303	-0,330	0,92
A 75	100	-0,158	-0,163	0,97
A 100	100	-0,100	-0,105	0,95
A 120	100	-0,083	-0,103	0,81

### 4.4. Referenzwert der Radlast bei starrer Bettung

Aus dieser Herleitung lässt sich nun ein Basiswert der Radlast  $R_{ref}$  berechnen, welcher aus den Grundmodellen für jedes Schienenprofil, d.h bei starrer Lagerung abgeleitet wurde. Somit gilt dieser Referenzwert auch nur bei sehr starr gebetteten Schienen, z.B. bei Messung der Dehnungen oberhalb einer Aussteifung eines Auflagerpunktes.

$$R_{ref} = E \cdot \varepsilon_{z,0} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{a}} \cdot \alpha \cdot b_H \cdot k_a \quad (9)$$

Mit:

$R_{ref}$  ..... Referenzwert der zu ermittelnden Radlast bei starr gebetteter Schiene

$E$  ..... Elastizitätsmodul,  $E = 210\,000\text{ N/mm}^2$

$\varepsilon_{z,0}$  ..... Maximalwert der Vertikaldehnungen am Messpunkt an den Grundmodellen

$a$  ..... Beiwert für den Längsverlauf

$\alpha$  ..... Beiwert für den Querverlauf

$b_H$  ..... Schienenhalsbreite

#### 4. Ermittlung der Radlast aus Vertikaldehnungen am Schienenhals

---

$k_a$  ..... Korrekturfaktor der Schienenabnutzung; ohne Abnutzung  $k_a = 1,0$ ; für Abnutzungsgrad von 12,5 % der Kopfhöhe siehe Tabelle 4.3

Mit dieser hergeleiteten Formel nach Gl. (9) ist es nun möglich, die Radlasten an den Grundmodellen zu reproduzieren.

##### 4.4.1. Prognose der Radlast – Auswertung der Ergebniswerte für das FE-Grundmodell

Zur Überprüfung der Genauigkeit der Formel (9) werden nachfolgend die Referenzwerte der Radlast  $R_{ref}$  bei der Berechnung für die untersuchten Schienenprofile (siehe Tabelle 2.1) anhand der errechneten maximalen Dehnungen  $\varepsilon_{z,0}$  aus der FE-Analyse ermittelt. Diese Ergebnisse können dann mit den tatsächlichen Radlasten der FEM-Berechnungen verglichen werden, um die Treffsicherheit der Prognose zu beurteilen. Für den E-Modul wurde für Stahl  $210 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$  angesetzt. Die entsprechenden Schienenhalsbreiten und Faktoren sind Tabelle 4.1 bzw. Tabelle 4.2 entnommen.

In Tabelle 4.4 sind die ermittelten Radlasten  $R_{ref}$  an den vier numerischen FEM-Modellen der starr gebetteten Schienen angeführt. Die nominelle Radlast  $R_{nom}$  ist hier die auf die Modelle aufgebraachte Belastung.

**Tabelle 4.4:** Ergebnisse der ermittelten Radlasten für das Grundmodell der starr gebetteten Schiene

Schienenprofil	Maximale Dehnung $\varepsilon_{z,0}$ im Messpunkt [%]	Zugehörige Belastung im Modell $R_{nom}$ [kN]	Ermittelte Radlast $R_{ref}$ [kN]	Abweichung $1 - (R_{nom}/R_{ref}) \cdot 100$ [%]
A 55	-0,303	100	99,50	-0,5%
A 75	-0,316	200	194,50	<b>-2,8%</b>
A 100	-0,299	300	299,00	-0,3%
A 120	-0,259	300	296,81	-1,1%

##### 4.4.2. Prognose der Radlast – Auswertung aus den Versuchsergebnissen

Im nächsten Schritt werden die Prognose der Radlast  $R_{ref}$  im Versuch 1, mit den starr gebetteten Schienen ermittelt. Die Ergebnisse der Messungen hierzu sind in Tabelle 4.5 aufgelistet, wobei hier für den Maximalwert der Vertikaldehnung  $\varepsilon_{z,0}$  der Mittelwert aus den Messwerten der beiden DMS in Lastposition 1, Last zentrisch über DMS (siehe Abbildung 3.2), eingesetzt wird, und die nominelle Radlast der Versuchslast entspricht.

**Tabelle 4.5:** Ergebnisse der ermittelten Radlasten für die vier Versuche mit den starr gebetteten Schienen

Schienenprofil	Maximale Dehnung $\varepsilon_{z,0}$ im Messpunkt [%o]	Zugehörige Belastung im Versuch $R_{nom}$ [kN]	Ermittelte Radlast $R_{ref}$ [kN]	Abweichung $1-(R_{nom}/R_{ref})*100$ [%]
A 55	-0,533	200	175,00	-14%
A 75	-0,454	300	279,40	-7%
A 100	-0,389	400	389,00	-2,8%
A 120	-0,324	500	371,30	-35%

Die große Abweichung beim Schienenprofil A 120 lässt sich so erklären, dass der im Versuch ermittelte Verlauf und auch der Maximalwert der Dehnung  $\varepsilon_{z,0}$ , nicht mit dem Verlauf und dem Maximalwert aus der FE-Analyse übereinstimmt (siehe Abbildung 3.23).

Die große Abweichung bei der Schiene A 55 lässt sich, wie bereits in Kapitel 3.6.2 erläutert, auf die Abweichung des Maximalwerts der Dehnung zwischen Versuch und FE-Berechnung zurückführen (siehe Abbildung 3.20). Es wird hier eine zu ungenaue Position der DMS vermutet, weshalb die gemessenen Dehnungen bei der Lasteinleitung direkt über den DMS zu gering ausfallen.

Da für die Ermittlung der Radlast  $R_{ref}$  eine Näherungsfunktion für den Längsverlaufes der Dehnungen festgelegt wurde (siehe 4.3.1), wird hier noch versucht, aus den anderen Messwerten im Versuch den Messwert an Lastposition 1 zu extrapolieren, um zu überprüfen, ob so auf eine korrekte Radlast geschlossen werden kann. Mit dem der Schiene A 55 angedachten Verlauf mit dem Faktor  $a = 0,001$  (vgl. Abbildung 4.2), wird ein extrapoliertes Messwert für die Lastposition 1, aus beispielsweise der Lastposition 3 ermittelt. Dazu wird der gemittelte Messwert an Position 3, welcher sich zu -0,373 ‰ ergibt (siehe Tabelle 3.2), in die Näherungsfunktion eingesetzt.

$$\varepsilon_z(x) = \varepsilon_{z,0} \cdot e^{-ax^2} \tag{10}$$

Eingesetzt ergibt sich:

$$\varepsilon_z(20) = \varepsilon_{z,0} \cdot e^{-0,001 \cdot 20^2} = -0,373 \tag{11}$$

und somit daraus für  $\varepsilon_{z,0}$  der Wert -0,556 ‰. Der mit der Formel (11) ermittelte Wert ist in Abbildung 4.6 graphisch dargestellt.

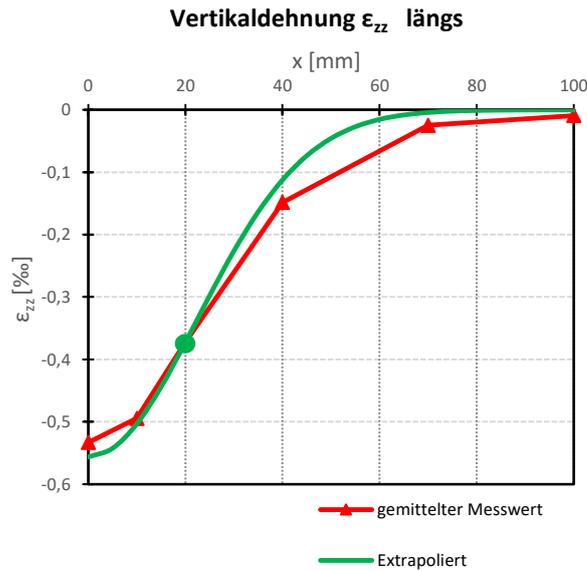


Abbildung 4.6: Mit Näherungsfunktion extrapolierte Verlauf für den Versuch 1 der Schiene A 55

Damit würde sich die Radlast zu 182,55 kN ergeben und hätte somit immer noch eine Abweichung von ca. -9%.

### 4.5. Ermittlung der Radlast bei auf Kranbahnträger gelagerter Schiene

Um den Einfluss eines Kranbahnträgers abzudecken, werden die Ergebnisse der Parameterstudie zum Einfluss der Flanschstärke (siehe 2.5.5, Einfluss der Flanschstärke des Kranbahnträgers) und der Stegstärke (siehe 2.5.6, Einfluss der Stegblechstärke des Kranbahnträgers) herangezogen. Es wird eine lineare Zunahme der Dehnungen, bei Erhöhung der Blechstärken, vorausgesetzt. Eine nähere Untersuchung, ob ein linearer Einfluss zutrifft, wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

Der bisher ermittelte Basiswert der Radlast  $R_{ref}$  bezieht sich auf den Referenzwert der maximal auftretenden Vertikaldehnung bei starrer Bettung der Schiene. Wie sich in der Parameterstudie herausgestellt hat, nehmen die Dehnungen in der Schiene bei Lagerung auf einem Kranbahnträger ab. Zur Ermittlung einer Radlast  $R_{ref}$  werden daher in die Formel nicht die maximalen Referenzdehnungen  $\varepsilon_{z,0}$  für starre Lagerung eingesetzt, sondern die tatsächlich gemessenen, bzw. ermittelten Dehnungen  $\varepsilon_{z,meas}$ . Da in diesem Fall die Radlast  $R_{ref}$  unterschätzt wird, weil die Dehnungen kleiner sind als die Referenzdehnungen bei starrer Lagerung, werden die Dehnungen mit einem Faktor multipliziert, um diesen Umstand auszugleichen. Dies wird hier als erste Annahme mit einem Linearfaktor  $k_t$ , welcher von den Blechstärken  $s$  und  $t$ , von Steg und Flansch, abhängt, ausgeglichen. Der Faktor  $k_t$  kann, aufgrund der Ergebnisse der durchgeführten Parameterstudie, nur

als linear angenommen werden. Um eine genauere Aussage treffen zu können, sind weitere Untersuchungen erforderlich.

##### 4.5.1. Einfluss der Blechstärken auf die maximale Dehnung $\varepsilon_{z,meas}$

Es wird hier der Faktor  $k_t$  eingeführt, welcher die Lagerung auf dem Kranbahnträger berücksichtigt. Wie in der Parameterstudie gezeigt, hängen die Dehnungen maßgeblich von den Blechstärken  $s$  und  $t$ , des Steges und des Flansches des Kranbahnträgers ab. D.h. der Faktor  $k_t$  hängt von diesen Dimensionen ab.

Die Ermittlung der Radlast  $R$  soll nach demselben Prinzip wie die Ermittlung der Referenzradlast  $R_{ref}$  erfolgen, und um den Faktor  $k_t$  erweitert werden. Die Referenz-Radlast  $R_{ref}$  bezieht sich auf die vertikale Dehnung  $\varepsilon_{z,0}$ , welche bei starrer Bettung auftritt. Bei einer Messung sollen nun die tatsächlich auftretenden Dehnungen  $\varepsilon_{z,meas}$  in die Formel (9) eingesetzt werden. D.h. in der Formel (9) muss der Wert von  $\varepsilon_{z,0}$  durch den tatsächlichen Wert  $\varepsilon_{z,meas}$  ersetzt werden, wodurch die Formel eine Korrektur mit den Faktor  $k_t$  benötigt.

Daraus ergibt sich der folgende Zusammenhang:

$$R = R_{ref} \cdot \frac{\varepsilon_{z,meas}}{\varepsilon_{z,0}} \cdot k_t \quad (12)$$

Der Faktor  $k_t$  kann folgendermaßen ermittelt werden:

$$k_t = \frac{\varepsilon_{z,0}}{\varepsilon_{z,meas}^*} \quad (12)$$

Der Wert  $\varepsilon_{z,meas}^*$  repräsentiert hier eine fiktive Dehnung, welche aus den in der Parameterstudie untersuchten Modellen mit Kranbahnträger abgeleitet wurde, und von den dabei verwendeten Blechstärken  $s^*$  und  $t^*$  des Kranbahnträgers abhängt.

In der Parameterstudie wurden Untersuchungen mit jeweils 3 verschiedenen Kranbahnträgern, pro Schiene, durchgeführt. Die Abmessungen der untersuchten Träger sind in Tabelle 4.6 nochmals angeführt und nun neu mit T1\*, T2\* und T3\* bezeichnet. Dabei ist der Träger T1\* der jeweilige Ausgangsträger für die Studie, der jeweiligen Schiene, T2\* ist der Träger mit erhöhter Flanschstärke  $t$  und T3\* ist der Träger mit erhöhter Stegstärke  $s$ . Anzumerken ist, dass für das Schienenprofil A 55 die jeweiligen Blechstärken zweimal erhöht (siehe Abbildung 2.24) wurden, woraus aber ein annähernd linearer Verlauf abgelesen werden kann, weshalb auch hier nur drei FEM-Modelle zur Ermittlung von  $\varepsilon_{z,meas}^*$  herangezogen werden.

#### 4. Ermittlung der Radlast aus Vertikaldehnungen am Schienenhals

**Tabelle 4.6:** Abmessungen der modellierten Kranbahnträger zur Ermittlung von  $\varepsilon_{z,meas}^*$

Schienenprofil	Abmessungen der modellierten Kranbahnträger											
	T1*				T2*				T3*			
	h1	b1	s1	t1	h2	b2	s2	t2	h3	b3	s3	t3
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
A 55	300	300	8	14	300	300	8	40	300	300	25	14
A 75	500	400	15	25	500	400	15	50	500	400	40	25
A 100	1000	400	15	25	1000	400	15	50	1000	400	40	25
A 120	1000	400	20	30	1000	400	20	60	1000	400	50	30

Es werden für jedes Schienenprofil als Ausgangsbasis jeweils die maximale Dehnung und die Abmessungen des jeweils angenommenen Ausgangsträgers T1\*, mit den Blechstärken s1 und t1, angenommen. Über eine „Ebenengleichung“ nach Gl. (14) wird die Änderung linear sowohl für Erhöhung der Stegstärke, als auch für Erhöhung der Flanschstärke, angegeben.

$$\varepsilon_{z,meas}^* = \varepsilon_{z,ref(s=s1,t=t1)} + (s - s1)k_s + (t - t1)k_f \quad (14)$$

Wobei  $k_s$  und  $k_f$  den ermittelten Steigungen der Dehnung bei Variation von Trägerquerschnitt T1\* auf T2\* bzw. T1\* auf T3\* entsprechen.

In Tabelle 4.7 sind die errechneten konstanten Werte für  $\varepsilon_{z,ref}$ ,  $k_s$  und  $k_f$  angeführt, wodurch sich der Faktor  $\varepsilon_{z,meas}^*$  nur noch in Abhängigkeit des Schienenprofils, und der tatsächlich vorhandenen Blechstärken anschreiben lässt. Die Werte der maximalen Dehnungen für die Modelle mit den jeweiligen Trägern T1\* bis T3\* sind aus Kapitel 2.5.5 bzw. 2.5.6 übernommen.

**Tabelle 4.7:** maximale Dehnungen am Messpunkt der Träger T1 bis T3 und daraus ermittelte Steigungen

Schienenprofil	Referenzdehnung $\varepsilon_{z,ref}$ ermittelt mit s1 und t1 [%]	Ermittelte Dehnungen mit dem Träger T2 [%]	Ermittelte Dehnungen mit dem Träger T3 [%]	Steigung $k_f$ [-]	Steigung $k_s$ [-]
A 55	-0,250	-0,270	-0,265	-0,0008	-0,0009
A 75	-0,278	-0,298	-0,293	-0,0008	-0,0006
A 100	-0,243	-0,285	-0,261	-0,0017	-0,0007
A 120	-0,207	-0,256	-0,223	-0,0016	-0,0006

Somit lassen sich die Faktoren  $\varepsilon_{z,meas}^*$  für jedes Schienenprofil separat anschreiben zu:

Schienenprofil A 55:

$$\varepsilon_{z,meas}^{*A55} = 0,250 + [(s - 8) \cdot 0,9 + (t - 14) \cdot 0,8] \cdot 10^{-3} \quad (15)$$

Schienenprofil A 75:

$$\epsilon_{z,meas}^{*A75} = 0,278 + [(s - 15) \cdot 0,6 + (t - 25) \cdot 0,8] \cdot 10^{-3} \quad (16)$$

Schienenprofil A 100:

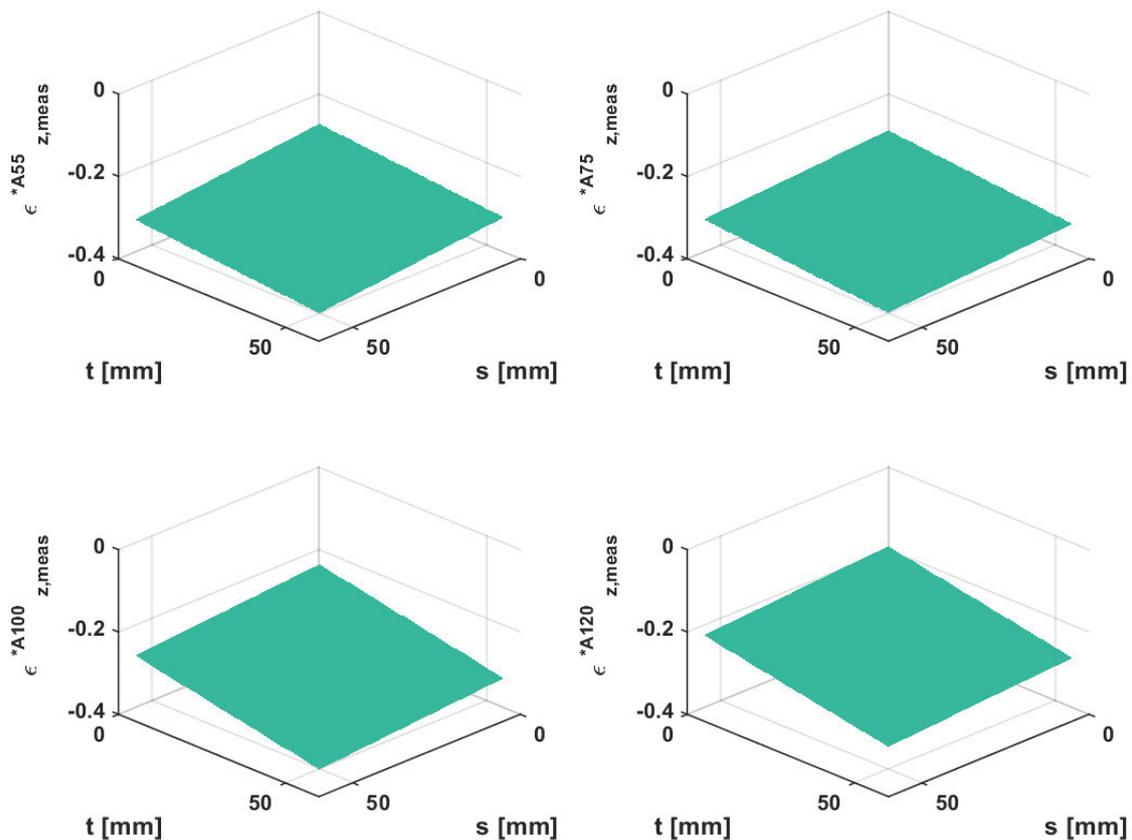
$$\epsilon_{z,meas}^{*A100} = 0,243 + [(s - 15) \cdot 0,7 + (t - 25) \cdot 1,7] \cdot 10^{-3} \quad (17)$$

Schienenprofil A 120:

$$\epsilon_{z,meas}^{*A120} = 0,207 + [(s - 20) \cdot 0,6 + (t - 30) \cdot 1,6] \cdot 10^{-3} \quad (18)$$

Für die Werte s und t sind die Blechstärken des Stegs und des Flansches, des jeweiligen Kranbahnträgers, in Millimeter einzusetzen.

In Abbildung 4.7 sind die Werte  $\epsilon_{z,meas}^*$  für alle vier Schienenprofile, in Abhängigkeit der Blechstärken s und t, graphisch dargestellt.



**Abbildung 4.7:** Graphische Darstellung des Wertes  $\epsilon_{z,meas}^*$  für die untersuchten Schienenprofile A 55 (links oben), A 75 (rechts oben), A 100 (links unten) und A 120 (rechts unten)

### 4.5.2. Vorschlag zur Ermittlung der Radlast $R$ aus gemessenen Vertikaldehnungen

Für die zu ermittelnde Radlast  $R$  aus einer tatsächlich gemessenen Dehnung  $\varepsilon_{z,meas}$  unmittelbar unter der Radlast am Schienenhals ergibt sich der nachfolgende Zusammenhang:

$$R = E \cdot \varepsilon_{z,meas} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{a}} \cdot \alpha \cdot b_H \cdot k_a \cdot k_t \quad (19)$$

mit

$$k_t = \frac{\varepsilon_{z,0}}{\varepsilon_{z,meas}^*} \quad (20)$$

Dabei sind:

$R$  ..... Zu ermittelnde Radlast

$E$  ..... Elastizitätsmodul,  $E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$

$\varepsilon_{z,meas}$  ... Gemessener Maximalwert der Vertikalehnungen am Messpunkt

$\varepsilon_{z,0}$  ..... Maximalwert der Vertikalehnungen am Messpunkt an den Grundmodellen mit starrer Bettung der Schiene

$\varepsilon_{z,meas}^*$  ... Fiktiver Maximalwert der Vertikalehnungen am Messpunkt in Abhängigkeit der Blechstärken  $s$  und  $t$  des Kranbahnträgers

$a$  ..... Beiwert für den Längsverlauf

$\alpha$  ..... Beiwert für den Querverlauf

$b_H$  ..... Schienenhalsbreite

$k_a$  ..... Korrekturfaktor der Schienenabnutzung; ohne Abnutzung  $k_a = 1,0$ ; für Abnutzungsgrad von 12,5 % der Kopfhöhe siehe Tabelle 4.3

$k_t$  ..... Korrekturfaktor des Einflusses der Blechstärken  $s$  und  $t$  des Kranbahnträgers

### 4.5.3. Auswertung der Radlasten für die FE-Modelle

Um die Richtigkeit der Herleitung der Gl. (19) zur Ermittlung der zutreffenden Radlast  $R$  zu überprüfen, sowie den Fehler durch die getroffenen Annahmen abzuschätzen, wurde zunächst versucht, die Radlasten aus den FE-Modellen zu reproduzieren.

In Tabelle 4.8 sind die berechneten Werte der Radlasten für die FE-Modelle mit den Kranbahnträgern angeführt. Der Wert  $\varepsilon_{z,meas}$  ist hier der in der FE-Analyse ermittelte Wert der Dehnungen am Messpunkt, der sich nur durch Rundungsfehler der Parameter  $k_f$  und  $k_s$  von den

Rechenwert  $\varepsilon_{z,meas}^*$  nach Gl (15) bis (18) unterscheidet. Als Wert für die nominelle Radlast  $R_{nom}$  wird wieder die auf das Modell aufgebrachte Belastung betrachtet. Es ist eine maximale Abweichung von 3,17% zu vermerken.

**Tabelle 4.8:** Berechnete Ergebnisse der Radlasten anhand der Dehnungen an den FE-Modellen

Schienenprofil	Kranbahnträger T	Flanschstärke $t_i$	Stegstärke $s_i$	$\varepsilon_{z,meas}^*(s_i, t_i)$	$\varepsilon_{z,0}$	$\varepsilon_{meas}$	$k_T$	$k_a$	$R_{nom}$	R	$1-(R_{nom}/R)*100$
		[mm]	[mm]	[‰]	[‰]	[‰]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[%]
A 55	T1*	14	8	0,250	0,303	0,250	1,21	1	100	98,40	-1,63
	T2*	20	8	0,255	0,303	0,251	1,19	1	100	96,93	<b>-3,17</b>
	T2a* <sup>1</sup>	40	8	0,271	0,303	0,270	1,12	1	100	98,11	-1,93
	T3*	14	14	0,252	0,303	0,253	1,20	1	100	98,63	-1,39
	T3a* <sup>2</sup>	14	25	0,257	0,303	0,256	1,18	1	100	98,09	-1,95
A 75	T1*	25	15	0,278	0,316	0,278	1,14	1	200	194,47	<b>-2,84</b>
	T2*	50	15	0,298	0,316	0,298	1,06	1	200	194,47	<b>-2,84</b>
	T3*	25	40	0,293	0,316	0,293	1,08	1	200	194,47	<b>-2,84</b>
A 100	T1*	25	15	0,243	0,299	0,243	1,23	1	300	299,04	-0,32
	T2*	50	15	0,286	0,299	0,285	1,05	1	300	298,52	-0,50
	T3*	25	40	0,261	0,299	0,261	1,15	1	300	299,62	-0,13
A 120	T1*	30	20	0,207	0,259	0,207	1,25	1	300	293,10	-2,35
	T2*	60	20	0,255	0,259	0,256	1,02	1	300	294,25	-1,95
	T3*	30	50	0,225	0,259	0,223	1,15	1	300	290,50	<b>-3,27</b>

<sup>1</sup>) Abmessungen Träger T2a\*: h = 300 mm, b = 300 mm, s = 8,0 mm, t = 40 mm

<sup>2</sup>) Abmessungen Träger T3a\*: h = 300 mm, b = 300 mm, s = 25 mm, t = 14 mm

#### 4.5.4. Auswertung der Radlasten für die Versuche der Schienen auf dem Walzprofil

In einer weiteren Kontrolle werden die Radlasten  $R$  aus dem zweiten Versuchsaufbau mit dem Walzprofil HEB-200 ermittelt. Hier sei gleich an dieser Stelle angemerkt, dass bei einem Walzprofil mit einem (bedingt durch die Ausrundungsradien) steiferen Lasteinleitungsbereich gerechnet wird (siehe Abschnitt 2.5.2). Es muss davon ausgegangen werden, dass der, an geschweißten Profilen ermittelte Faktor  $k_t$  nicht ganz zutrifft.

In Tabelle 4.9 sind die berechneten Radlasten  $R$  zusammengefasst, welche sich aus den gemessenen Dehnungen aus dem zweiten Versuch, mit einer auf einem HEB-200 Profil gelagerten Schiene, ergeben. Der Wert  $\varepsilon_{z,meas}$  ist hier der gemittelte Messwert der beiden DMS an Lastposition 1, Last direkt über DMS (siehe 3.4.2), die nominelle Radlast entspricht der maximal aufgebrachten Last im Versuch. Die hier zu erkennenden Abweichungen spiegeln sich auch schon im Vergleich der

#### 4. Ermittlung der Radlast aus Vertikaldehnungen am Schienenhals

Versuchsergebnisse mit den FE-Rechnungen wider (siehe Kapitel 3.6.2). Da der Faktor  $k_t$  auf den FE-Analysen basiert, ist die Abweichung der Radlast im gleichen Ausmaß zu erwarten.

**Tabelle 4.9:** Berechnete Radlasten  $R$  anhand der gemessenden Dehnungen aus dem Versuch

Schienenprofil	Kranbahnträger T	Flanschstärke $t_i$	Stegstärke $s_i$	$\varepsilon_{z,meas}^*(s_i, t_i)$	$\varepsilon_{z,0}$	$\varepsilon_{meas}$	$k_T$	$k_a$	$R_{nom}$	$R$	$1-(R_{nom}/R)*100$
		[mm]	[mm]	[‰]	[‰]	[‰]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[%]
A 55	HEB-200	13,5	9	0,250	0,303	0,507	1,21	1	200	199,39	-0,30
A 75	HEB-200	13,5	9	0,267	0,316	0,393	1,18	1	300	286,03	-4,88
A 100	HEB-200	13,5	9	0,219	0,299	0,286	1,36	1	400	390,09	-2,54
A 120	HEB-200	13,5	9	0,174	0,259	0,324	1,49	1	500	545,78	8,39

Damit ist ein Vorschlag erarbeitet, wie aus den bisher durchgeführten Untersuchungen eine Radlast  $R$  aus gemessenen vertikalen Dehnungen an einer Kranschiene ermittelt werden kann. Die teilweise hohen Abweichungen der Treffsicherheit sollten über genauere Untersuchungen der Einflüsse aus den Blechstärken verringert werden. Der Wert  $\varepsilon_{z,meas}^*$  sollte über eine erweiterte Parameterstudie mit verschiedenen Blechstärken bzw. eventuell auch unter Berücksichtigung exzentrischer Lasteinleitung und Seitenführungskräfte bestätigt bzw. neu ermittelt werden um genauere Ergebnisse zu erzielen.

#### 4.6. Ermittlung der Radlast $R$ bei gemessener Dehnung oberhalb einer Queraussteifung

Wird die Messung der vertikalen Dehnungen in der Kranschiene oberhalb einer Queraussteifung, bzw. oberhalb eines ausgesteiften Auflagerpunktes durchgeführt, kann davon ausgegangen werden, dass die Steifigkeit im Lasteinleitungsbereich so hoch ist, dass der Einfluss aus dem Kranbahnträger vernachlässigt werden kann. Dies wird in der Ermittlung der Radlast berücksichtigt, in dem der Faktor  $kt = 1,0$  gesetzt wird.

In Tabelle 4.10 sind die berechneten Radlasten  $R$  aus den FEM-Modellen mit einer Queraussteifung, bzw. mit ausgesteiftem Auflagerpunkt (siehe 2.5.7) angeführt. Als fiktiv gemessener Wert der Dehnungen wird als  $\varepsilon_{z,meas}$  die maximale Dehnung am Messpunkt im FE-Modell angegeben. Die nominelle Radlast bezieht sich auf die Belastung im Modell.

**Tabelle 4.10:** Berechnete Radlasten  $R$  anhand der Dehnungen aus FE-Modellen

Schienenprofil	Kranbahnträger T	$\epsilon_{meas}$	$k_T$	$k_a$	$R_{nom}$	$R$	$1-(R_{nom}/R)*100$
		[‰]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[%]
A 55	T1 + Aussteifung	0,269	1,0	1,0	100	87,36	-14,47
	T1 + Auflagerpunkt	0,295	1,0	1,0	100	95,80	-4,38
A 75	T1 + Aussteifung	0,302	1,0	1,0	200	185,86	-7,61
	T1 + Auflagerpunkt	0,321	1,0	1,0	200	197,55	-1,24
A 100	T1 + Aussteifung	0,295	1,0	1,0	300	295,04	-1,68
	T1 + Auflagerpunkt	0,309	1,0	1,0	300	309,04	2,93
A 120	T1 + Aussteifung	0,257	1,0	1,0	300	290,84	-3,15
	T1 + Auflagerpunkt	0,272	1,0	1,0	300	307,81	2,54

Es ist zu sehen, dass der ermittelte Wert der Radlast  $R$  oberhalb der Quersteife (ohne zusätzliche Lagerung) zum Teil starkt abweicht. Die Annahme, dass die Messung über einer Quersteife den Einfluss des Kranbahnträgers vollständig eliminiert, trifft deshalb nicht ganz zu. Die Steifigkeit ist erst bei Messung oberhalb eines Auflagerpunktes hoch genug, um die Aussage  $k_t = 1,0$  - gleichwertig zum Verhalten bei starrer Schienenlagerung – zu bestätigen.



# 5

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

### 5.1. Zusammenfassung

In dieser Masterarbeit wurden erste grundlegende Untersuchungen durchgeführt, welche die experimentelle Ermittlung von Radlasten auf Kranschienen ermöglichen sollen, auf Basis gemessener Dehnungen. Es wurde die Idee verfolgt, vertikale Dehnungen an den Außenflächen des Schienenhalses zu messen und einen Zusammenhang zwischen gemessener bzw. experimentell ermittelter Dehnung bei Laststellung direkt über dem DMS und der vorhandenen Radlast herzustellen. Zu diesem Zweck wurde eine Parameterstudie zum Verhalten der vertikalen Dehnungen im Schienenhals von vier untersuchten Schienenprofilen durchgeführt. Als erster Ansatz wurde ein Grundmodell erstellt, bei dem die Kranschienen starr gelagert wurden, um sich das Verhalten der vertikalen Dehnungen, ohne Einflüsse aus dem statischen System, vorstellen zu können. Die am Grundmodell ermittelten Dehnungen an den Messpunkten werden als Referenzwerte betrachtet. Es wurde gezeigt, dass die Dehnungen vom statischen System, bestehend aus Schiene, Kranbahnträger, Lagerung und Stützweite teilweise stark beeinflusst werden und diese Effekte bei einer Ermittlung der Radlasten berücksichtigt werden müssen. Dabei stellte sich heraus, dass der größte Einfluss aus den Blechstärken der Flansche und Stege des jeweiligen Kranbahnträgers kommt. Zumindest für das Schienenprofil A 55 haben die Untersuchungen auch einen Einfluss der Stützweite ergeben. Bei den anderen, höheren, Schienenprofilen war im untersuchten Bereich kein Einfluss der Stützweite auszumachen. Bei noch höheren Stützweiten könnte sich aber durchaus noch ein Einfluss ergeben. Es kann gesagt werden, dass die reduzierte Steifigkeit in vertikaler Richtung im Lasteinleitungsbereich infolge Schiene und Kranbahnträger, die Größenordnung und Verteilung der vertikalen Dehnungen bestimmt.

Weiters wurde untersucht ob bei der Messung an einer Stelle, an der der Kranbahnträger ausgesteift bzw. gelagert ist, die Einflüsse aus der Trägerlagerung, unberücksichtigt bleiben können. Hier wurde gezeigt, dass die zu messenden Dehnungen an solchen Stellen stark zunehmen und sich dem Referenzfall der starren Schienenlagerung annähern.

Außerdem wurde eine Untersuchung durchgeführt, welche den Einfluss der Abnutzung der Schienen aufzeigt. Da davon ausgegangen werden kann, dass jede Schiene, die einer Messung der Dehnungen unterzogen wird, zu einem gewissen Grad abgenutzt sein wird, muss dies auch in der Ermittlung der Radlast berücksichtigt werden. Es wurden Beiwerte für die Grenzfälle der

Abnutzungsgrade der Grenzfälle nach ÖNORM EN 1993-6 [2] untersucht, welche ein Ansetzen einer Abnutzung von 25% der Schienenkopfhöhe im Traglastzustand, bzw. 12,5% im Gebrauchszustand vorschreiben.

In weiterer Folge wurden im Zuge dieser Arbeit Versuche durchgeführt, um die Ergebnisse der FE-Berechnungen zu bestätigen. Für die Versuche stand für jedes untersuchte Schienenprofil ein Probekörper mit einer Länge von 400 mm zu Verfügung. An diesen Probekörpern wurden Dehnmessstreifen in der Mitte der Schienenhäse appliziert und die vertikalen Dehnungen unter einer definierten Prüflast gemessen. Es wurden an den Schienen in Längsrichtung mehrere Lasteinleitungspunkte definiert. Die Schiene wurde dann im Zuge der Versuche in Längsrichtung verschoben und die Last an mehreren Punkten aufgebracht. Die Messung der Dehnungen erfolgte immer an der selben Stelle, in der Mitte der Schiene. Durch Auftragen der Messergebnisse der Dehnmessstreifen, in Abhängigkeit der Entfernung zwischen Lasteinleitung und Messpunkt, lassen sich Längsverläufe der Vertikaldehnungen, die sich in der Schiene unter einer stationären Radlast einstellen, abbilden.

Für den ersten Versuchsaufbau wurde die Schiene auf einer starren Platte gelagert. Um eine ebene Auflagefläche zu garantieren, wurden die Unterseiten der Probekörper plangefräst. Der erste Versuch soll, wie schon in dem Grundmodell der Parameterstudie, Referenzwerte der Dehnung liefern, welche keinen Einflüssen aus einem Kranbahnträger unterliegen.

Bei dem zweiten festgelegten Versuchsaufbau wurden die Schienen auf einem gewalzten I-Profil HEB-200 gelagert. Die Oberfläche des Profilobergurtes wurde ebenfalls plangefräst, um ein vollständiges Aufliegen der Schiene zu garantieren. Aus den Ergebnissen der beiden Versuche lassen sich die Einflüsse eines Kranbahnträgers experimentell ermitteln und darstellen. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Messergebnisse der beiden DMS auch bei zentrischer Lasteinleitung teilweise stark von einander abweichen. Es kann davon ausgegangen werden, dass durch die imperfekte Schienengeometrie eine exakt zentrische Lasteinleitung nur schwer möglich ist, und immer ungewollte Exzentrizitäten mitgemessen werden. Durch Mittelwertbildung der Messergebnisse, lassen sich die Dehnungen aus den FE-Berechnungen relativ genau reproduzieren.

Aus den Ergebnissen aus Parameterstudie und Versuch wurde ein Vorschlag für die Rückrechnung auf die Radlast  $R$  aus den gemessenen, bzw. numerisch ermittelten Dehnungen erarbeitet. Dafür wurden mehrere Annahmen getroffen, welche in weiterer Folge überprüft werden mussten. Die erste Annahme bezieht sich auf den linearen Zusammenhang zwischen vertikalen Spannungen und Dehnungen in der Schiene. Durch mögliche Behinderungen der Längsdehnungen infolge Reibschluss zwischen Schienenfuß und Kranbahnträger, oder durch eine mögliche Beeinflussung aus einem zweiten Kranrad, könnten Fälle eintreten, in denen diese Annahme nicht zutrifft.

Eine weitere Annahme bezieht sich auf den Einfluss der Blechstärken der Kranbahnträger. Da in dieser Arbeit keine weiteren Untersuchungen vorhanden sind, wurde von einem linearen Zusammenhang der Dehnungen und der Blechstärken ausgegangen, und ein Korrekturfaktor für die Berücksichtigung des Einflusses der Blechstärken entwickelt. Die Richtigkeit dieser Annahme sollte in weiterer Folge mit einer ergänzenden Studie, die das Verhalten der Dehnungen bei Variation der Blechstärken behandelt, überprüft und gegebenenfalls verbessert werden.

Der erarbeitete Vorschlag zur Ermittlung der Radlast  $R$  wurde überprüft, indem aus den ermittelten Dehnungen der FE-Berechnungen, sowie aus den tatsächlich gemessenen Dehnungen im Versuch, die zugehörige Radlast  $R$  ermittelt wurde. Dabei kann gesagt werden, dass die Radlasten sich im Großteil der Fälle, mit einer Abweichung von unter 10%, ermitteln lassen. In der Regel wurden die tatsächlichen Radlasten unterschätzt. Für eine exakte Aussage ist die Streuung noch zu groß, auch in Hinblick auf den Umstand, dass alle Ergebnisse unter idealen Bedingungen, entweder aus FE-Rechnung, oder im Labor, ermittelt wurden. Es ist also abschließend festzustellen, dass für eine genaue Ermittlung der Radlast weitere Untersuchungen erforderlich sind.

### 5.2. Ausblick

Die vorgeschlagene Ermittlung der Radlast  $R$  eines Krans, aus gemessenen Dehnungen der Kranschiene, soll als erster Ansatz gesehen werden, und bedarf weiterer Untersuchungen.

Der erste zukünftige Schritt ist eine Messung der Dehnungen aus Kranbetrieb an einer echten Kranbahn, bei der die Radlasten bekannt sind, um zu sehen, welche Einflüsse sich aus einer Messung unter „nicht idealen“ Bedingungen ergeben und wie genau man die Radlast mit der vorgeschlagenen Methode bestimmen kann. Dadurch können auch bis jetzt unbedachte Umstände, die ein Insitu-Versuch mit sich bringt, erkannt und berücksichtigt werden.

Es sollten auch alle hier getroffenen Annahmen überprüft werden. Insbesondere der Einfluss eines zweiten oder mehrerer Kranräder, bzw. auch die Lagerung der Schiene auf dem Kranbahnträger. Der Einfluss weiterer Kranräder wird sich, aufgrund der kurzen Lasteinleitungslängen nicht auf die Vertikaldehnungen auswirken, kann aber in Hinblick auf eine Behinderung der Längsdehnungen einen Einfluss auf den Dehnungszustand in der Schiene haben, was sich auf die Annahme der linearen Umrechnung von Vertikalspannungen auf Vertikaldehnungen auswirken kann. Weiters wurde in dieser Arbeit eine in Längsrichtung schubweiche, vertikale starre Lagerung der Schiene auf dem Kranbahnträger berücksichtigt. Es sollten weitere Untersuchungen durchgeführt werden, wie sich eine elastische Unterlage zwischen Schiene und Kranbahnträger, oder eine schubstarre Verbindung der Schiene mit dem Kranbahnträger, auf die Dehnungen im Schienenhals auswirkt.

Ebenfalls sollte eine detailliertere Parameterstudie zum Thema Blechstärken der Flansche und Stege der Kranbahnträger durchgeführt werden, um die Annahme des linearen Zusammenhanges

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

---

zwischen Vertikaldehnungen und der Blechstärke von Flansch und Steg zu überprüfen, und den hier vorgeschlagenen Faktor unter Umständen noch zu korrigieren.

Als erster Ansatz wurde in dieser Arbeit eine ideal zentrische Lasteinleitung vorgenommen. Daher sollten weiterführende Untersuchungen das Dehnungsverhalten bei exzentrischer Lasteinleitung beleuchten, um die Annahme einer Mittelwertbildung aus den Messwerten an den Außenflächen der Schienenhäse, zur Eliminierung der Effekte von Exzentrizitäten, zu bestätigen. Aus demselben Grund sollte auch die Auswirkung von zusätzlichen horizontalen Seitenführungskräften überprüft werden.

# 6

## 6. Literaturverzeichnis

- [1] **DIN 536-1: 1991-09:** Kranschiene; Maße, statische Werte, Stahlsorten für Kranschiene mit Fußflansch Form A. Ausgabedatum 1991-09, 1991-09.
- [2] **ÖNORM EN 1993-6, Eurocode 3:** Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten; Teil 6: Kranbahnen. Wien. Österreichisches Normungsinstitut. Ausgabe: 2010-08-15“.
- [3] **Kraus M., Mämpel S.:** Kennwerte neuer und abgenutzter Kranschiene für die Bemessung von Kranbahnträgern. Stahlbau 86, 2017.
- [4] **Lienhart. W.:** Messtechnik für Bauingenieure - Unterlagen zur Vorlesung, 2016-09.



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