



Institut für Stahlbau
Lehrstuhl für Stahlbau
und Leichtmetallbau

RWTHAACHEN
UNIVERSITY

Diese Arbeit wurde vorgelegt am Institut für Stahlbau.

Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Markus Feldmann

Masterarbeit

Mies-van-der-Rohe-Str. 1
52074 Aachen
GERMANY
Telefon: +49 241 80-25177
Fax: +49 241 80-22140

stahlbau@stb.rwth-aachen.de

Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von Gitterrosten aus metallischen Werkstoffen

Experimental and numerical investigations on the structural behaviour of metallic gratings

von Damian Händeler

(Matr.-Nr.: 366656)

Betreuer: M.Sc. Jonas Nonn

1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Benno Hoffmeister
2. Prüfer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann

Aachen, 9. Dezember 2021

Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Markus Feldmann

Mies-van-der-Rohe-Str. 1
52074 Aachen
GERMANY
Telefon: +49 241 80-25177
Fax: +49 241 80-22140

stahlbau@stb.rwth-aachen.de

Masterarbeit

Herr Damian Händeler, Matr.-Nr. 366656

Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von Gitterrosten aus metallischen Werkstoffen

Experimental and numerical investigations on the structural behaviour of metallic gratings

Einleitung

Numerische Voruntersuchungen zum statischen Tragverhalten von Gitterrosten weisen darauf hin, dass die derzeit gültige Bemessungsgrundlage für Gitterroste (RAL-GZ 638) zum Teil lückenhaft und mechanisch inkonsistent ist. Hier werden Biegespannungen und Durchbiegungen anhand einer vereinfachten Balkenstatik, unter Annahme eines gelenkig gelagerten Biegebalkens, elastischen Materialverhaltens und Theorie 1. Ordnung, bestimmt und mit Grenzsicherungen und Grenzdurchbiegungen verglichen. Bei Belastung des Gitterrostes durch eine konzentrierte Einzellast darf die mittragende Wirkung benachbarter Tragstäbe, die nicht unmittelbar belastet werden, in Rechnung gestellt werden. In der RAL-GZ ist hierfür eine Tabelle angegeben, aus der die Anzahl der mittragenden Stäbe für wenige ausgewählte Tragstabhöhen und Maschenteilungen abgelesen werden kann. Numerische Untersuchungen haben gezeigt, dass die angegebenen Kennwerte zum einen nicht ohne weiteres auf abweichende Konfigurationen übertragen werden können und zum anderen teilweise deutlich von den theoretischen Werten abweichen. Darüber hinaus ist es möglich, dass unter gewissen Umständen Stabilitätsversagen einzelner Tragstäbe auftreten kann, noch bevor die rechnerische Grenzsicherheit erreicht wird.

Aufgabenstellung

Um das Trag- und Verformungsverhalten von Gitterrosten im Hinblick auf die identifizierten Mängel der RAL-GZ 638 näher zu untersuchen, sollen im Rahmen der Masterarbeit zunächst umfangreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden. Validierte numerische Untersuchungen sind anschließend ergänzend heranzuziehen, um die genauen Mechanismen

des Tragverhaltens zu ergründen. Die Erkenntnisse dieser Arbeit sollen dabei helfen neue Bemessungsgrundlagen zu schaffen, die das Tragverhalten von Gitterrosten näherungsweise erfassen und die angesprochenen Lücken und Inkonsistenzen der derzeitigen Bemessungsgrundlage bereinigen.

Im Einzelnen sollen im Rahmen der Masterarbeit die folgenden Punkte bearbeitet werden:

- Literaturrecherche zum Tragverhalten und zur Bemessung von Gitterrosten
- Unterstützung bei der Planung, Durchführung und Auswertung experimenteller Untersuchungen an Gitterrosten. Es sollen Materialprüfungen, Biegeversuche an Gitterroststreifen sowie Traglastversuche an Gitterrostplatten durchgeführt werden.
- Vorbereitung und Validierung numerischer Modelle (Finite Elemente) zur Nachrechnung der Streifen- und Plattenversuche.
- Parameterstudien zum Trag- und Verformungsverhalten von Gitterrosten unter Verwendung der validierten FE-Modelle
- Voruntersuchungen zur Erstellung eines neuen Bemessungskonzeptes

Bearbeitung

Die Bearbeitungszeit der Masterarbeit beträgt 6 Monate.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Forschung	2
2.1	Definition und Nutzung von Gitterrosten	2
2.2	Eigenschaften von Gitterrostplatten	3
2.2.1	Aufbau und Abmessungen von Gitterrosten	3
2.2.2	Gitterrosttypen	4
2.2.3	Mindestabmessungen für Trag- und Querstäbe.....	5
2.3	Bemessung von Gitterrosten nach RAL-GZ [1]	6
2.3.1	Belastungsarten	7
2.3.2	Anzahl mittragender Tragstäbe und Abminderungsfaktoren.....	7
2.3.3	Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit	10
2.4	Durchgeführte Studie zu den mittragenden Stäben	11
2.5	Differentialgleichung zu anisotropen Platten unter Biegebeanspruchung.....	16
2.6	Stabilitätsversagen von Stahlbauteilen unter Momentenbeanspruchung	17
2.6.1	Biegedrillknicken	17
2.6.2	Plattenbeulen.....	19
2.7	Wahre Spannung und Dehnung	20
3	Experimentelle Untersuchungen	21
3.1	Versuchsmatrix.....	21
3.2	Materialproben.....	24
3.2.1	Versuchsaufbau.....	25
3.2.2	Gemessene Daten	26
3.3	Gitterroststreifen.....	26
3.3.1	Versuchsaufbau.....	27
3.3.2	Gemessene Daten	29
3.4	Gitterrostplatten.....	30
3.4.1	Versuchsaufbau.....	30
3.4.2	Gemessene Daten	34

4	Auswertung der Versuchsergebnisse	36
4.1	Materialproben	36
4.1.1	Tragstabmaterialien	36
4.1.2	Querstabmaterialien	39
4.1.3	Wahre Spannungen und Dehnungen	39
4.2	Gitterroststreifen	40
4.2.1	Effektive Biegesteifigkeiten	41
4.2.2	Effektive Querschnittshöhe	47
4.3	Gitterrostplatten	49
4.3.1	Traglastkurven	49
4.3.2	Effektive Biegesteifigkeit und mittragende Stäbe n	52
5	Numerische Untersuchungen	59
5.1	Genutzte Software	59
5.2	Entwicklung eines parametrisierten Modells	60
5.2.1	ADPL Befehlssprache	60
5.2.2	Aufbau des Modellskripts	61
5.3	Validierung des numerischen Modells	64
5.3.1	Vergleich von experimentellen und numerischen Ergebnissen	65
5.3.2	Abbildung des Stabilitätsversagens	69
5.4	Parameterstudien	72
5.4.1	Durchgeführte Studien	72
5.4.2	Ergebnisse der Parameterstudien	73
5.4.3	Auswertung der numerischen Ergebnisse	79
6	Vorüberlegungen zu einem Bemessungskonzept	83
6.1	Ermittlung einer Formel für die effektive Höhe	83
6.2	Berechnung von elastischen und plastischen Tragfähigkeiten	88
6.3	Ermittlung der vorhandenen Schlankheit	90
6.3.1	Ersatzstab	91
6.3.2	Ermittlung der kritischen Verzweigungslast	92
6.3.3	Elastische und Plastische Schlankheit	99

6.4	Definition der elastischen und plastischen Grenzschlankheit	102
6.5	Vorgehen mithilfe eines neuen Bemessungskonzeptes.....	104
7	Schlussfolgerung und Ausblick	107
	Literaturverzeichnis.....	110
	Nomenklatur.....	112
	Abbildungsverzeichnis.....	116
	Tabellenverzeichnis.....	120
A	Anhang	121
A.1	Übersicht über alle ermittelten Werte der Gitterroststreifenversuche	121
A.2	Übersicht über alle ermittelten Werte der Gitterrostplattenversuche	122
A.3	Spannungs-Dehnungs-Kurven der relevanten Tragstabmaterialproben	124
A.4	Spannungs-Dehnungs-Kurven der relevanten Querstabmaterialproben	131
A.5	Vergleich der effektiven Tragstabhöhen aus den Streifenversuchen	134
A.6	Gitterrostplattenversuche mit FE-Berechnungen und Tragfähigkeiten.....	141
A.7	Vergleich der mittragenden Stäbe m infolge Spannungsansatz	177
A.8	Graphische Darstellung der Ergebnisse zu den Parameterstudien.....	178

1 Einleitung

In Deutschland hergestellte Gitterroste können mit dem Gütezeichen der Gütegemeinschaft Gitterroste e.V. versehen werden, wenn sie den Bestimmungen der aktuell gültigen RAL-GZ 638 für Gitterroste [1] entsprechen. Zum einen wird dadurch eine Chancengleichheit unter den Herstellern erwirkt, da viele Randbedingungen für die Berechnung und Produktion der Gitterroste beachtet werden müssen, und zum anderen gibt das Gütezeichen dem Nutzer eine Qualitätssicherheit für das gelieferte Gitterrost.

Inzwischen beruhen die Annahmen und Berechnungsgrundlagen der RAL-GZ [1] jedoch auf über 30 Jahre alten Versuchen und Untersuchungen, sodass einige Bestandteile der Bemessung als konservativ, veraltet und teilweise nicht ausreichend erfasst gelten. Dazu gehört insbesondere die Tragfähigkeit der Gitterroste, welche für einwirkende Einzellasten mit einem vereinfachten Balkenmodell unter Berücksichtigung der mittragenden Wirkung benachbarter Tragstäbe berechnet wird. Die Werte für diese Tragwirkung sind tabellarisch für verschiedene Tragstabhöhen und eine einzige Maschenteilung aufgeführt, sodass viele andere Konfigurationen und Einflussparameter wie abweichende Maschenteilungen, die Gitterrostabmessungen und die Querschnitte der Stäbe in Querrichtung nicht in die Bestimmung einfließen. Dadurch entsteht möglicherweise eine unwirtschaftliche oder teilweise sogar unsichere Bemessung der Gitterroste, weswegen diese Einflüsse näher untersucht und die Wissens- und Bemessungslücken in einem neuen Konzept geschlossen werden sollen.

Dazu sind in einem Forschungsprojekt eine Vielzahl an experimentellen Untersuchungen an verschiedenen Gitterrosten durchzuführen, auf die sowohl analytische als auch numerische Auswertungen folgen. Somit soll eine bessere Einschätzung der Tragfähigkeit durch eine genauere Berechnung der Anzahl mittragender Tragstäbe entstehen und weitere Einflüsse wie ein mögliches Stabilitätsversagen bei höheren Maschenteilungen untersucht werden. Zielvorgabe dieses Projektes ist, dass die Ergebnisse die Grundlage für ein neues Bemessungskonzept zur Berechnung von Gitterrosten darstellen sollen.

Die vorliegende Abschlussarbeit soll bei dem Projekt unterstützend mitwirken, indem zur Versuchsdurchführung, deren Auswertung sowie den numerischen Untersuchungen und der Konzepterstellung ein Beitrag geleistet wird. Zunächst ist dazu eine Literaturrecherche zu der aktuellen Bemessungsnorm, bereits durchgeführten Studien sowie hilfreichem theoretischen Wissen vorzunehmen, die bei der allgemeinen Bestimmung der Tragfähigkeit von Gitterrosten genutzt werden können. Anschließend sind die durchgeführten Versuche inklusive des Aufbaus zu beschreiben und auszuwerten. Um die experimentellen Untersuchungen in Grenzen zu halten, wird anhand dieser Versuche ein Finite-Elemente-Modell kalibriert, das für weiterführende und ergänzende Untersuchungen dienen soll. Zuletzt werden die Ergebnisse genutzt, um ein mögliches Bemessungskonzept zu erarbeiten, welches in Anlehnung an die aktuelle RAL-GZ für Gitterroste [1] weiterhin anwenderfreundlich bleiben soll.

2 Stand der Forschung

Die aktuelle RAL-GZ für Gitterroste [1] basiert auf einfachen, durchdachten Annahmen und Konzepten zur Planung und Bemessung von Gitterrostplatten aus Stahl, Edelstahl, Aluminium und Messing. Die simplen Annahmen resultieren jedoch in sehr konservativen, teils unwirtschaftlichen Bemessungen der Bauteile, dessen zugrundeliegenden Formeln in diesem Kapitel näher beleuchtet werden. Zudem sollen weitere Grundlagen, die zur Beurteilung der Tragfähigkeit notwendig sind, erfasst und näher erläutert werden. Dazu gehört insbesondere das Stabilitätsversagen, welches in der Bemessung von Stahlbauteilen häufig vorkommt und daher auch bei Gitterrosten aus metallischen Werkstoffen wichtig ist.

2.1 Definition und Nutzung von Gitterrosten

Gitterroste sind plattenförmige, tragende Bauteile, die sowohl begehbar als auch befahrbar ausgebildet werden können. Die Tragrichtungen werden durch die Anordnung von Trag- und Querstäben mit unterschiedlichen Abmessungen bestimmt, sodass durch die Abstände zwischen diesen Stäben Öffnungen entstehen [1]. Das Raster aus Trag- und Querstäben erzeugt bei geringem Eigengewicht eine hohe Tragfähigkeit, wogegen die Öffnungen für eine gute Luft- und Lichtdurchlässigkeit sorgen. Daher finden sich Gitterroste in unterschiedlichster Variation sowohl in tragender Funktion als auch aus ästhetischen Gründen in architektonischen Anwendungen wieder [2].

Die häufigsten Anwendungsgebiete sind Bühnen, Laufstege, Treppenpodeste- und stufen sowie die Abdeckung von Schächten [2]. In diesen Anwendungen wirkt hauptsächlich eine Personenlast, wogegen im Einsatz bei Industrieböden auch hohe Radlasten von verkehrenden Maschinen auf die Gitterroste wirken können und daher Schwerlastroste hergestellt und verwendet werden [3].



Abbildung 2-1: Einsatz von Gitterrosten als Bodenfläche in einem Kraftwerk [4]

Des Weiteren sind insbesondere Treppenpodeste und -stufen bei vielen Bauwerken für die Verwendung als Notfalltreppe oder dauerhaft genutzte Stahltreppe zu finden. Dort kommen sowohl Gitterrostplatten für die Podeste als auch schmalere Gitterroststreifen für die Treppenstufen zum Einsatz, die sowohl widerstandsfähig als auch rutschfest sein müssen. [5]

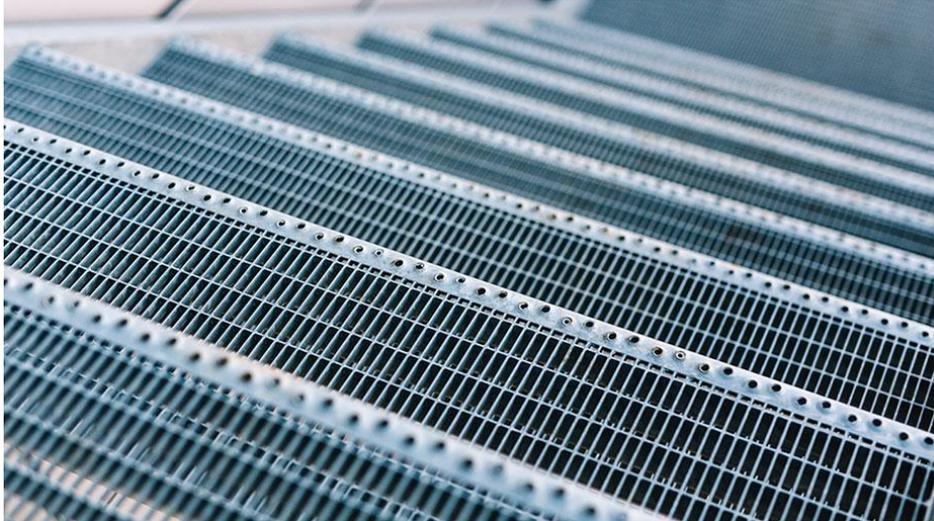


Abbildung 2-2: Treppenstufen aus schmalen Gitterrostplatten [5]

Um eine langlebige Nutzung der Gitterroste im Außenbereich oder in feuchten Umgebungen ohne zusätzliche Wartung und Instandhaltung zu gewährleisten, wird für Gitterroste aus rostfähigen Materialien ein gleichmäßiger Korrosionsschutz durch die Feuerverzinkung erzielt. Dazu werden die hergestellten Gitterroste durch eine vollständige Eintauchung in ein Zinkbad unter hoher Temperatur mit dieser Schutzschicht überzogen. [6]

2.2 Eigenschaften von Gitterrostplatten

Gitterroste folgen wie viele andere Bauteile im Bauwesen bestimmten mechanischen Eigenschaften, die für die vorgesehene Nutzung effektiv genutzt werden. So besitzen die meisten Gitterroste eine primäre Tragachse bestehend aus den Tragstäben und eine sekundäre Tragachse aus den Querstäben, die die Lasten auf benachbarte Tragstäbe übertragen. Die Ränder der Platte werden durch eine umlaufende, an den Ecken verschweißte Randeinfassung stabilisiert, welche meist dieselben Abmessungen wie die Tragstäbe besitzt. Im Folgenden werden diese Eigenschaften anhand des Aufbaus der üblichen Gitterrostarten nach RAL-GZ [1] näher erläutert.

2.2.1 Aufbau und Abmessungen von Gitterrosten

Die unterschiedlichen Abmessungen lassen sich in die Querschnittsgrößen der Stäbe, die Abstände der Stäbe untereinander und die äußeren Gesamtlängen der Platte eingrenzen. Für die Querschnittsgrößen der Tragstäbe und Querstäbe werden rechteckige Abmessungen bestimmt. Dabei ist die Höhe eines Stabes für gewöhnlich wesentlich größer im Vergleich zur

Breite. Eine Ausnahme bildet dabei der Querstab bei Schweißpressrosten, der einen quadratischen oder kreisförmigen Querschnitt besitzt.

Bei den Abständen zwischen einzelnen Stäben wird zwischen der Maschenweite und der Maschenteilung unterschieden. Erstere gibt bei Gitterrosten die lichte Weite zwischen den Stäben an, wogegen letztere die Achsabstände beschreibt. Alle genannten Abmessungen sind in der Abbildung 2-3 mit den im Folgenden verwendeten Bezeichnungen dargestellt.

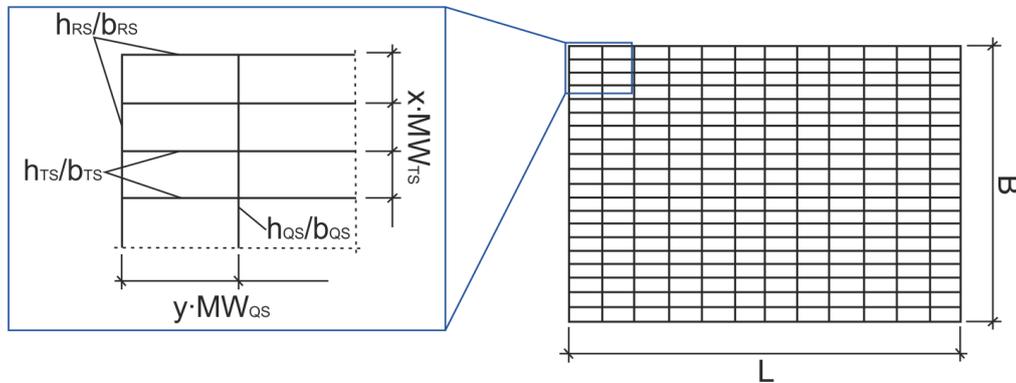


Abbildung 2-3: Abmessungen eines typischen Gitterrostes

2.2.2 Gitterrosttypen

In der RAL-GZ für Gitterroste [1] werden verschiedene Arten von Gitterrosten unterschieden, die sich hauptsächlich in der Art der Querschnitte von den Querstäben und deren Verbindung mit den Tragstäben unterscheiden.

- **Schweißpressrost:**

Der erste Typ ist das bereits genannte Schweißpressrost, welches aus nicht geschlitzten Tragstäben besteht, welche durch verdrehte Vierkant- oder Rundstäbe verbunden werden. Die Verbindung zwischen den beiden Stabachsen wird durch Einpressen und anschließendes Anschweißen an der Oberkante der Tragstäbe hergestellt. Die Querschnittsabmessungen der Querstäbe sind bei diesem Gitterrost sehr klein im Vergleich zu den Tragstäben.



Abbildung 2-4: Schweißpressrost mit angeschweißten, verdrehten Verteilerstäben [4]

- **Press- und Vollrost:**

Eine weitere Art von Gitterrosten stellt das häufig verwendete Pressrost dar, bei dem ungeschwächte, rechteckige Querstäbe in vorab geschlitzte Tragstäbe eingepresst werden. Die Schlitzte sind zu diesem Zweck etwas schmaler als die Querstäbe und besitzen häufig einen gezackten oder trichterförmigen Umriss, um einen ausreichend guten Formschluss zu gewährleisten. Lediglich die Verbindung zu der Randeinfassung und je nach Größenverhältnis der Gitterrostplatte auch teilweise die Verbindung zum ersten Tragstab wird zur Lagesicherung mit einer zusätzlichen Verschweißung hergestellt. Die Querstabhöhen können bei diesem Typ variieren zwischen kleinen Abmessungen im Vergleich zum Tragstab bis hin zur selben Höhe. Letztere Variante wird entsprechend als sogenanntes „Vollrost“ bezeichnet, bei dem nicht mehr zwischen primärer und sekundärer Tragachse unterschieden wird und die Trag- sowie die Querstäbe bis zur halben Querschnittshöhe geschlitzt ineinandergreifen.

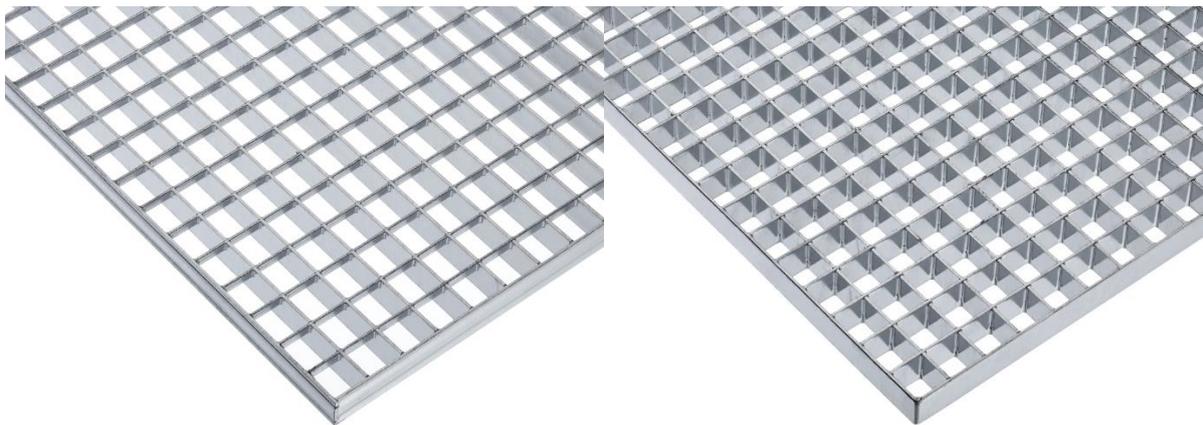


Abbildung 2-5: Pressrost und Vollrost mit eingepressten Querstäben und Randeinfassung [2]

- **Steckrost:**

Der letzte Gitterrosttyp, mit dem sich die RAL-GZ [1] beschäftigt, sind Steckroste, die ihren Namen von den in Löcher oder Schlitzte eingesteckten Querstäben haben. Nach dem Einstecken wird die feste Verbindung durch Stauchung, Reibschluss, Verklemmen oder Verschweißen hergestellt. Diese Art von Gitterrosten wird seltener hergestellt und deshalb im Rahmen dieser Abschlussarbeit nicht weiter behandelt.

2.2.3 Mindestabmessungen für Trag- und Querstäbe

Für die Press- und Schweißpressroste sind in der RAL-GZ [1] voneinander abhängige Mindestabmessungen der Trag- und Querstäbe gegeben. So sind für die Schweißpressroste in Tabelle 2-1 die verdrehten, quadratischen Querstäbe mit einem Mindesteckmaß in Abhängigkeit der Tragstabdicke gegeben. Das Eckmaß beschreibt dabei die diagonale Länge zwischen zwei Eckpunkten des quadratischen Querschnitts, sodass sich die Seitenlängen mithilfe von dem Satz des Pythagoras ermitteln lassen.

Tabelle 2-1: Mindestmaße der Querstäbe von Schweißpressrosten [1]

Tragstabdicke [mm]	Querstabmaß über Eck gemessen [mm]
2 und 3	mind. 4,9
4	mind. 5,7
5	mind. 5,7

Analog dazu werden auch die Mindestmaße der Querstäbe von Pressrosten festgelegt. Die Querstabhöhe muss dabei nach Tabelle 2-2 für verschiedene Tragstabhöhen unterschiedliche Mindestwerte besitzen.

Tabelle 2-2: Mindestmaße der Querstabhöhen von Pressrosten [1]

Tragstabhöhe [mm]	Querstabhöhe [mm]
20 bis 60	mind. 9
61 bis 80	mind. 14
81 bis 100	mind. 19

Genauso werden auch die Querstabdicken anhand der vorab gewählten Tragstabdicken gemäß Tabelle 2-3 bestimmt.

Tabelle 2-3: Mindestmaße der Querstabdicken von Pressrosten [1]

Tragstabdicke [mm]	Querstabdicke [mm]
2	mind. 1,5
3	mind. 1,9
4 und 5	mind. 2,75

Aufgrund der angegebenen Tragstababmessungen und der davon abhängigen Querstababmessungen ist durch die Norm vorgesehen, dass zunächst die Maße der Tragstäbe für die vorgesehene Belastung bestimmt und darauf basierend die Querstäbe im Hinblick auf die Mindestmaße festgelegt werden.

2.3 Bemessung von Gitterrosten nach RAL-GZ [1]

Die RAL-GZ für Gitterroste [1] gibt die Nachweisführung analog zum Eurocode 0 [7] über die Grenzzustände der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit vor. Dabei wird die Einwirkung auf das Bauteil dem Widerstand des Bauteils beziehungsweise des Materials inklusive Sicherheitsfaktoren gegenübergestellt. Um diese für die Gitterroste zu ermitteln, werden in dem Dokument sowohl für das vorhandene statische System als auch für die Widerstandswerte Formeln an die Hand gegeben, um diese Nachweise führen zu können. Das allgemeine Vorgehen zur Bemessung nach der RAL-GZ für Gitterroste [1] wird im Folgenden näher erläutert.

2.3.1 Belastungsarten

Generell wird neben dem ständig wirkenden Eigengewicht bei Gitterrostplatten zwischen einer Verkehrslast bestehend aus flächig wirkenden Nutzlasten oder auf einer Lasteinleitungsfläche wirkenden Einzellast unterschieden. Die flächigen Nutzlasten orientieren sich dabei an den anzusetzenden Einwirkungen, die abhängig von der vorgesehenen Nutzung der Gitterrostplatte sind. Die anzusetzende Einzellast wird dagegen nochmal unterschieden für begehbare und befahrbare Gitterroste. Bei begehbaren Gitterrostplatten wird an der ungünstigsten Laststellung eine Kraft von 1,5kN angesetzt, die auf einer Lastangriffsfläche von 200x200mm wirkt. Die ungünstigste Laststellung liegt bei einer zweiseitig gelagerten Platte am freien Rand mittig zwischen den Auflagern und ist mit variabel gehaltenen Lasteinleitungslängen in Abbildung 2-6 dargestellt.

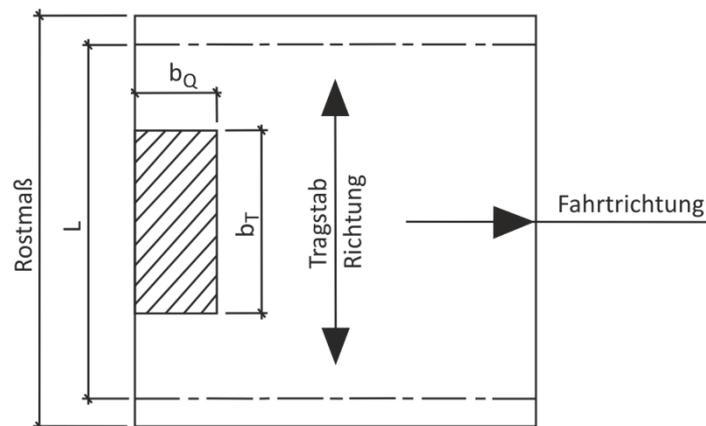


Abbildung 2-6: Maßgebende Laststellung infolge Einzellast auf eine zweiseitig gelagerte Platte [1]

Diese Randbedingungen gelten ebenso für befahrbare Gitterroste, wobei sich dort die Höhe der Einzellast sowie die Lastangriffsfläche je nach vorhandenem Fahrzeug unterscheiden können.

2.3.2 Anzahl mittragender Tragstäbe und Abminderungsfaktoren

Die Gitterrostplatten besitzen ein unterschiedliches Tragverhalten für die beiden zuvor genannten Belastungsarten. Während das beidseitig gelagerte Gitterrost unter einer gleichmäßig verteilten Nutzlast wie ein Einfeldträger mit einer Querschnittsfläche von x Tragstäben gerechnet werden kann und daher kein Einfluss durch die Querverteilung vorhanden ist, muss bei einer Einzellast mit einer beliebig großen Lasteinleitungsfläche die Verteilung durch die Querstäbe erfasst werden.

Dafür gibt die RAL-GZ [1] die Anzahl mittragender Tragstäbe m an, die neben den Tragstäben unter der Lasteinleitungsfläche zusätzlich die infolge der Querverteilung am Lastabtrag beteiligten Tragstäbe angibt. Einige Werte für die Anzahl mittragender Stäbe werden in Tabelle 2-4 in Abhängigkeit der Tragstabhöhe und des Gitterrosttyps mit bestimmter Maschenteilung gegeben. Die Höhe der Werte nimmt für eine steigende Tragstabhöhe nahezu linear ab und ist für die Schweißpressroste generell kleiner als für die Press- oder Steckroste.

Tabelle 2-4: Anzahl der mittragenden Tragstäbe [1]

Tragstabhöhe [mm]	Anzahl „m“ der durch die Lastverteilung der Querstäbe mittragenden Tragstäbe		
	Schweißpressroste Maschenteilung (ca. 34 x 38)	Pressroste Maschenteilung (ca. 33 x 33)	Steckroste Maschenteilung (ca. 33 x 33)
20	2,25	3,33	3,50
25	2,19	3,25	3,38
30	2,13	3,17	3,25
35	2,06	3,08	3,13
40	2,00	3,00	3,00
45	1,94	2,92	2,88
50	1,88	2,83	2,75
55	1,81	2,75	2,63
60	1,75	2,67	2,50
65	1,69	2,58	2,38
70	1,63	2,50	2,25
75	1,56	2,42	2,13
80	1,50	2,33	2,00
85	-	2,25	1,88
90	-	2,17	1,75
95	-	2,08	1,63
100	-	2,00	1,50

Im Falle von abweichenden Abmessungen der Maschenteilungen oder der Tragstäbe können die Werte entsprechend sinnvoll angepasst werden, wobei die RAL-GZ [1] keine genaueren Richtwerte vorgibt und daher eine Abschätzung der Werte auf Grundlage der Erfahrungen des Anwenders geschehen muss.

Mithilfe des ermittelten Werts der Anzahl mittragender Stäbe m können im Anschluss die insgesamt mittragenden Tragstäbe n ermittelt werden, indem die Tragstäbe unter der Lastangriffsfläche nach Gleichung (2.1) hinzugerechnet werden.

$$n = \frac{\text{Belastungsbreite}}{\text{Tragstabteilung}} + m \quad (2.1)$$

Der erste Term teilt dazu die Belastungsbreite quer zu den Tragstäben durch die Maschenteilung zwischen den Tragstäben, sodass für eine direkt am Rand liegende Lasteinleitungsfläche ein Tragstab weniger als wirklich vorhanden aus dieser Berechnung resultiert. Der Grund hierfür ist in dem Forschungsbericht [8] des staatlichen Materialprüfungsamts von Nordrhein-Westfalen aus dem Jahr 1989 zu finden, der die Grundlage für die aktuelle RAL-GZ [1] bildet. Die Druckplatte, mit der die Gitterrostplatten belastet wurden, ist aufgrund der einzigen, getesteten Maschenteilung von 33mm immer ein Vielfaches von dieser Maschenteilung und wurde bei jedem Probekörper um eine halbe Maschenweite versetzt auf diesen aufgesetzt. Zur Verdeutlichung ist ein Versuchsaufbau in Abbildung 2-7 dargestellt, bei dem die Druckplatte um eine halbe Maschenweite vom Rand aus nach innen versetzt aufgebracht wurde.

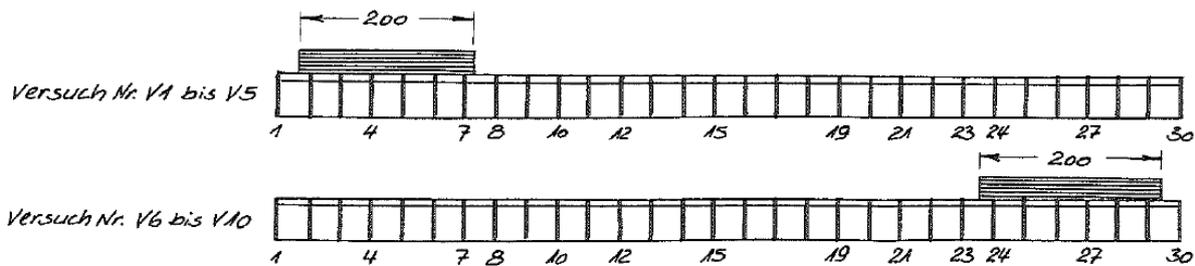


Abbildung 2-7: Lastwürfelposition bei den ersten zehn Versuchskörpern [8]

Die Ermittlung der mittragenden Stäbe n für die gezeigte Einzellasteinleitung geschieht dabei über eine Spannungsermittlung mithilfe von Dehnmessstreifen, die an dem eingezeichneten Stab 4 mittig unter der Druckplatte angebracht worden sind. Die Spannungen wurden parallel zu der vorhandenen Prüfkraft aufgenommen und bei zwei verschiedenen Spannungswerten von 140 und 160 N/mm² gegenübergestellt. Aus diesen Werten kann daraufhin das Widerstandsmoment der gesamten Gitterrostplatte mithilfe der Systemabmessungen ermittelt werden, indem nach Gleichung (2.2) das aus der Kraft P ermittelte, vorhandene Moment durch die zugehörige Spannung σ geteilt wird. Die Systemmaße in der Formel sind die Stützweite L und die Druckplattenbreite b in Tragstabrichtung.

$$W = \frac{M}{\sigma} = \frac{P}{4 \cdot \sigma} \cdot \left(L - \frac{b}{2} \right) \quad (2.2)$$

Zur Berechnung der insgesamt mittragenden Stäbe n in Gleichung (2.3) wurde im Vorhinein ein effektives Widerstandsmoment W_{eff} eines einzelnen Tragstabes ermittelt und ins Verhältnis zum Gesamtwiderstandsmoment nach Gleichung (2.2) gesetzt. Die Widerstandsermittlung eines einzelnen Tragstabes geschah dabei an einem Referenzprobekörper, der in der Breite quer zu den Tragstäben der Lasteinleitungsfläche entspricht und dadurch den Einfluss aus der Querverteilung eliminiert.

$$n = \frac{W}{W_{eff}} \quad (2.3)$$

Die mittragenden Stäbe m werden im letzten Schritt umgekehrt zur Gleichung (2.1) über die vorhandene Belastungsbreite quer zu den Tragstäben zurückgerechnet. Dies ist für alle vorhandenen Probekörper nach [8] durchgeführt und im Anschluss getrennt nach den Gitterrosttypen und der Tragstabhöhe in Diagramme, die in Abbildung 2-8 dargestellt sind, eingezeichnet worden. Zwecks einer sicheren Bemessung sind die vorhandenen Werte mit einem darunter liegenden, linearen Verlauf abgeschätzt und anschließend für die verschiedenen Tragstabhöhen in die Tabelle 2-4 eingetragen worden.

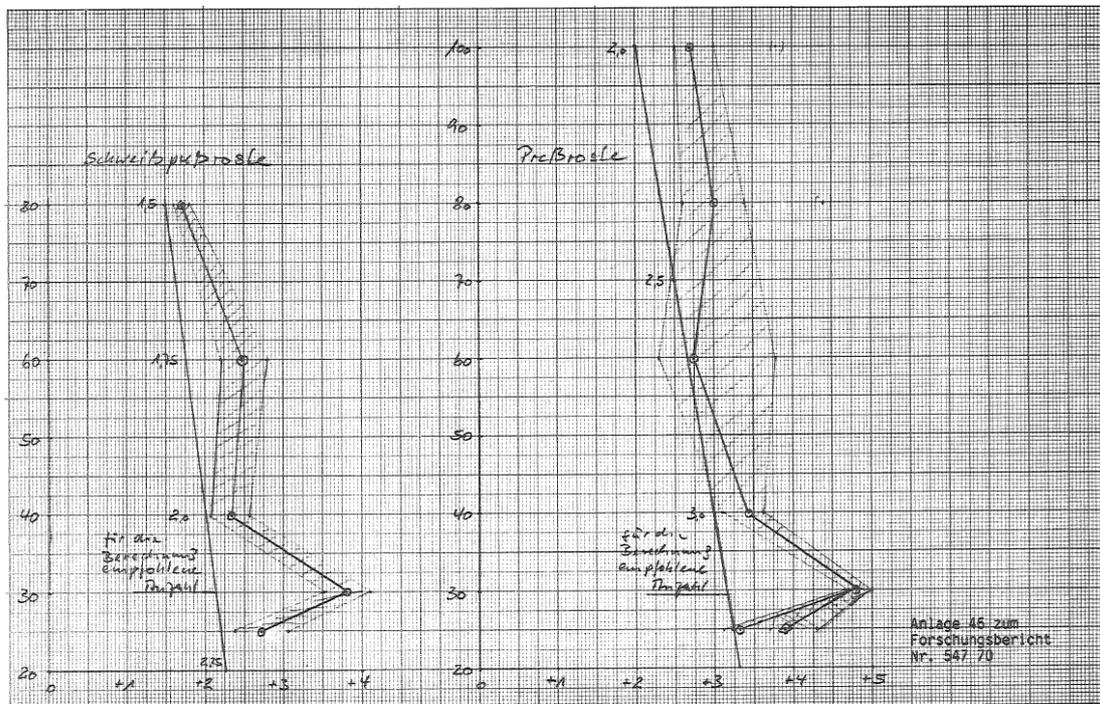


Abbildung 2-8: Diagramme zur Ermittlung der Werte für die mitttragenden Stäbe m [8]

Zusätzlich zu diesen Erkenntnissen sind Unterschiede in den effektiven Widerstandsmomenten W_{eff} der einzelnen Tragstäbe je nach Gitterrosttyp aufgefallen. So wird in [8] beschrieben, dass die Schweißpressroste ungeschwächte Tragstäbe besitzen und mit den vollen Querschnittswerten angesetzt werden können. Dagegen erfahren die Tragstäbe von Pressrosten und auch Steckrosten infolge der Schlitzung für die Querstäbe eine Schwächung der Querschnitte, die bei den Pressrosten etwa 10 und bei den Steckrosten sogar 15 Prozent betragen. Daher wird eine Abminderung der Flächenträgheitsmomente und Widerstandsmomente der Tragstäbe für diese Gitterrosttypen von $\nu = 0,9$ beziehungsweise $\nu = 0,85$ vorgesehen. Diese Werte finden sich entsprechend auch in der RAL-GZ [1] wieder.

2.3.3 Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Die Nachweisführung nach RAL-GZ [1] für den Grenzzustand der Tragfähigkeit geschieht über den Spannungsvergleich der Einwirkung und des verwendeten Materials. Als Einwirkung auf Gitterrostplatten können nach Kapitel 2.3.1 sowohl Flächen- als auch Einzellasten vorkommen, die mithilfe des statischen Systems einer zweiseitig gelagerten Platte in eine Momenteinwirkung umgerechnet werden. Für die flächige Nutzlast wird in Gleichung (2.4) ein innenliegender Tragstab betrachtet, der jeweils die halbe Flächenlast F_v [kN/m^2] der beiden angrenzenden Maschenweiten t [cm] auf einer Länge L [cm] zwischen den Auflagern aufnimmt.

$$M_k = \frac{F_v \cdot t \cdot L^2}{8 \cdot 10^4} \text{ [kNcm]} \quad (2.4)$$

Bei der Berechnung infolge einer Einzellast F_p [kN], die auf eine Lastangriffsfläche gemäß Abbildung 2-6 wirkt, wird das Moment auf die mittragenden Tragstäbe gemäß Gleichung (2.5) ermittelt.

$$M_k = \frac{F_p \cdot \left(L - \frac{b_T}{2}\right)}{4} \text{ [kNcm]} \quad (2.5)$$

Das Bemessungsmoment ergibt sich für beide Belastungsarten nach Gleichung (2.6), in welcher der Sicherheitsfaktor für die Verkehrslast $\gamma_Q = 1,50$ beträgt.

$$M_d = \gamma_Q \cdot M_k \text{ [kNcm]} \quad (2.6)$$

Um das Moment im nächsten Schritt in eine Bemessungsspannung umzurechnen, wird das vorhandene, elastische Widerstandsmoment W_{vorh} eines beziehungsweise aller mittragenden Tragstäbe benötigt. In dieses fließt sowohl der Abminderungsfaktor ν für den Gitterrosttyp nach Kapitel 2.3.2 als auch die Anzahl der mittragenden Stäbe n ein, welche für den betrachteten Stab bei einer Flächenlast eins beträgt und für eine Einzellast nach Tabelle 2-4 und Gleichung (2.1) ermittelt wird. Die resultierende Formel für das vorhandene Widerstandsmoment nach RAL-GZ [1] ist in Gleichung (2.7) mit den eingehenden Querschnittsgrößen h und b eines Tragstabes dargestellt.

$$W_{vorh} = \frac{b \cdot h^2}{6} \cdot n \cdot \nu \text{ [cm}^3\text{]} \quad (2.7)$$

Zuletzt wird in dem Nachweis für die Tragfähigkeit in Gleichung (2.8) die Spannung der Einwirkungs- und Widerstandsseite berechnet und miteinander verglichen. In den Bemessungswert des Widerstands geht der Sicherheitsfaktor γ_M ein, der analog zum Eurocode 3 [9] für metallische Werkstoffe 1,0 beträgt.

$$E_d = \sigma_d = \frac{M_d}{W_{vorh}} \leq R_d = f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_M} \quad (2.8)$$

Damit ist die Nachweisführung im Grenzzustand der Tragfähigkeit mit allen relevanten Einflussgrößen nach der aktuellen RAL-GZ [1] vollständig erläutert. Für die vorliegende Abschlussarbeit und das angestrebte Bemessungskonzept ist insbesondere die Belastung durch eine Einzellast auf einer Lastangriffsfläche interessant, da die hieraus entstehende Tragwirkung gegenüber der gleichmäßigen Flächenlast nicht eindeutig ist und in dem Forschungsbericht [8] nur sehr oberflächlich untersucht wurde.

2.4 Durchgeführte Studie zu den mittragenden Stäben

Eine erste Untersuchung ist im Vorhinein zu diesem Projekt bereits in [10] durchgeführt worden, worin ein Einfluss der Querstabdimensionen auf die Anzahl mittragender Tragstäbe n

mithilfe numerischer Methoden näher betrachtet wurde. Dazu ist ein parametrisches Modell mit einer Finite-Elemente-Software erstellt und anschließend anhand von bereits durchgeführten Versuchen aus [11] validiert worden. Mithilfe dieses Modells konnten daraufhin verschiedene Eingangsparameter wie beispielsweise die Querstabdimensionen variiert und jeweils die Anzahl der mittragenden Stäbe bestimmt werden, um die Grundlagen aus der RAL-GZ [1] weiterführend zu untersuchen. Einen Überblick über die wichtigsten Punkte des Vorgehens sowie die Ergebnisse des Forschungsprojekts soll dieses Kapitel verschaffen.

Der Endbericht des Projektes [10] stellt zur Ermittlung der Anzahl mittragender Tragstäbe n zwei verschiedene Verfahren vor, die beide im Gegensatz zu dem Spannungsansatz in [8] einen Ansatz über die Durchbiegungsermittlung und den zugehörigen Querschnittswiderstand verfolgen. Interessant ist dabei insbesondere der erste Berechnungsansatz, der die zweiseitig gelagerte Platte unter Belastung einer Einzellast am Rand in ein äquivalentes System eines Einfeldträgers mit einem Balkenquerschnitt überführt. Die maximale Durchbiegung w_{max} , die zugehörige, aufgebrauchte Kraft F sowie die Systemabmessungen in Tragstabrichtung der beiden Systeme ist dabei gleichzusetzen. Das statische Balkensystem ist mit der vorhandenen Belastung und den wichtigsten Abmessungen in Abbildung 2-9 dargestellt.

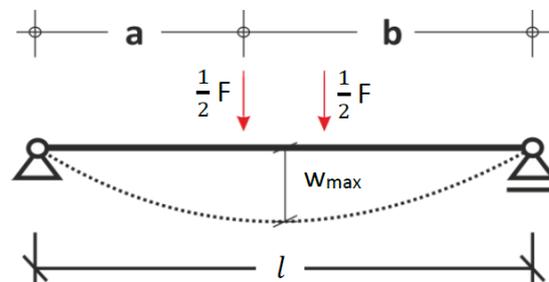


Abbildung 2-9: Statisches Ersatzsystem für zweiseitig gelagerte Gitterrostplatte [10]

Die Lasteinleitungsfläche wird, wie in der Abbildung gezeigt, auf zwei Einzellasten an den Rändern dieser aufgeteilt und in das System eingeleitet. Dies hängt mit der Durchbiegung des Systems zusammen, welches aufgrund der entstehenden Krümmung keine vollflächige Einleitung der Kraft zulässt und dies daher nur über die aufliegenden Kanten der Lasteinleitung geschieht.

Auf der Basis dieses Ersatzsystems ermittelt [10] eine analytische Formel für das sogenannte fiktive Flächenträgheitsmoment I_{fiktiv} , welches aufgrund der äquivalenten Randbedingungen zur Gitterrostplatte denselben Widerstand erzeugt wie n mittragende Tragstäbe. Die Formel nach [10] für dieses Flächenträgheitsmoment ist in der folgenden Gleichung (2.9) gegeben.

$$I_{fiktiv} = \frac{3 - 4 \cdot \left(\frac{a}{l}\right)^2}{48 \cdot E \cdot w_{max}} \cdot \frac{a}{l} \cdot F \cdot l^3 \quad (2.9)$$

Zur Ermittlung der Anzahl von mittragenden Tragstäben n ist das fiktive Flächenträgheitsmoment einer beliebigen Gitterrostplatte durch das Flächenträgheitsmoment I_{TS} eines einzelnen Tragstabes derselben Gitterrostplatte entsprechend der Gleichung (2.10) zu dividieren.

$$n = \frac{I_{fiktiv}}{I_{TS}} \quad (2.10)$$

Damit in dem Forschungsbericht nach [10] überhaupt eine Berechnung nach dieser Methode vorgenommen werden konnte, mussten zunächst Ergebnisse für belastete Gitterrostplatten in Form von Durchbiegungen und aufgebrachtten Kräften erzeugt werden. Dazu ist ein numerisches Modell erstellt worden, welches den Randbedingungen in den Gitterrostversuchen von [11] genauestens entsprechen sollte und daher an diesen Versuchsergebnissen kalibriert wurde.

Ein interessanter Punkt ist dabei die bereits angesprochene Lasteinleitung, die infolge eines aufgebrachtten Laststempels theoretisch vollflächig sein müsste. Analog zu den Überlegungen in Bezug auf Abbildung 2-9 geschieht dies aufgrund der Krümmung allerdings nur über die Randknoten, sodass die Lasteinleitung ebenso modelliert wird. Eine Umsetzung in der Finite-Elemente-Methode stellt dazu die Einführung eines Master-Knotens dar, über welchen die Belastung beziehungsweise Verschiebung aufgebracht und zu den sogenannten Slave-Knoten verteilt wird, die an den Lasteinleitungspunkten am Gitterrost lokalisiert sind. Eine Visualisierung dieser Problemstellung und Lösung stellt Abbildung 2-10 dar.

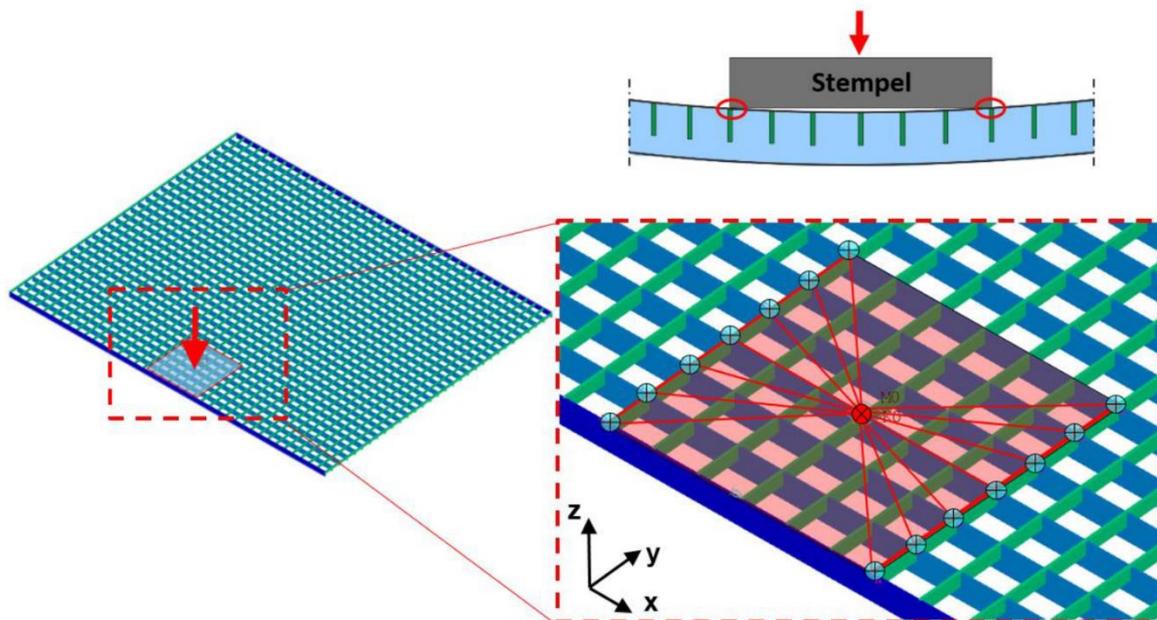


Abbildung 2-10: Finite-Elemente-Modellierung der Lasteinleitung [10]

An dem Master-Knoten können je nach Eigenschaft der vorhandenen Lasteinleitung zudem die Freiheitsgrade festgelegt werden. In den Versuchen von [11] sind der Laststempel und der Hydraulikzylinder ohne eine Rotationsfähigkeit und Möglichkeit zur horizontalen Verschiebung ausgebildet, sodass in dem FE-Modell diese eingeschränkte Bewegungsfreiheit durch

eine Rotationsfeder mit einer ermittelten Steifigkeit hergestellt wird. Der Master-Knoten überträgt die Freiheitsgrade ähnlich zur aufgebracht Last auf die Slave-Knoten, sodass die gesamte Lasteinleitung von diesen Bedingungen beeinflusst wird und das Verformungsverhalten unter dem Lastwürfel möglichst genau abgebildet werden kann.

Des Weiteren ist auch die Berücksichtigung der Schlitzungen in den Tragstäben bei Pressrosten von Bedeutung, welche nach der RAL-GZ [1] durch einen Abminderungsfaktor von $\nu = 0,9$ auf das Flächenträgheitsmoment beziehungsweise das Widerstandsmoment berücksichtigt wird. In dem Forschungsbericht [10] wird dazu der untersuchte Tragstab mit den nominellen Abmessungen in das Flächenträgheitsmoment für den Rechteckquerschnitt umgerechnet und auf diesen der Abminderungsfaktor ν draufgerechnet. So wird die Abminderung durch die Schlitzungen auf die Tragstablänge konstant statt punktuell berücksichtigt und kann wieder in eine effektiv vorhandene Tragstabhöhe zurückgerechnet werden.

Zuletzt wird auch die Kreuzungsstelle zwischen den Trag- und Querstäben betrachtet, welche insbesondere bei den Pressrosten lediglich durch eine Verpressung in dem Schlitz hergestellt wird. Unter der Annahme einer ausreichenden Verpressung können ähnlich zur Verschweißung der Punkte biegesteife Kreuzungspunkte angenommen werden, sodass alle Freiheitsgrade zwischen den Trag- und Querstäben gekoppelt und demnach übertragen werden.

Durch die Berücksichtigung aller genannten Eigenschaften des Versuchsstandes und der Probekörper wurde in [10] ein FE-Modell entwickelt, welches in dem Vergleich mit den Versuchsergebnissen aus [11] eine sehr gute Übereinstimmung erreicht. Dadurch konnte im Anschluss eine Parameterstudie zu vielen verschiedenen Gitterrosten gestartet werden, bei denen die Maschenteilungen zwischen den Trag- und Querstäben sowie die Tragstabhöhen variiert wurden. Für jede Kombination aus diesen Parametern wurde ein Referenzmodell ohne Querstäbe gerechnet, sodass lediglich die Tragstäbe unter dem Lastwürfel am Lastabtrag beteiligt werden, und zehn Bezugsmodelle, bei denen die Querstababmessungen kontinuierlich erhöht wurden, um den Einfluss auf die Anzahl der mittragenden Tragstäbe n zu untersuchen.

Anhand der Ergebnisse, wie sie für die Pressroste in Abhängigkeit von normierten Größen in Abbildung 2-11 gezeigt sind, ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Anzahl mittragender Tragstäbe und der Querstabdimension zu erkennen. Umso mehr die Querstababmessungen an die Tragstäbe angenähert werden, desto höher ist die Anzahl mittragender Tragstäbe. Die Normierung dient dem Zweck, die Ergebnisse für Gitterroste mit unterschiedlichen Maschenteilungen in einem Graphen darstellen zu können. Die Normierung des Trägheitsverhältnisses von Trag- und Querstab auf der horizontalen Achse durch den Faktor j , welcher das Verhältnis von der Tragstab- zur Querstabmaschenteilung beschreibt, zeigt, dass die Kurven unabhängig von den Maschenweiten übereinanderliegen. Dazu ist ebenfalls die Anzahl der mittragenden Tragstäbe auf der vertikalen Achse mit dem Parameter a zu normieren, welcher das Verhältnis aus der Lasteinleitungsbreite zur Maschenteilung zwischen den Tragstäben darstellt.

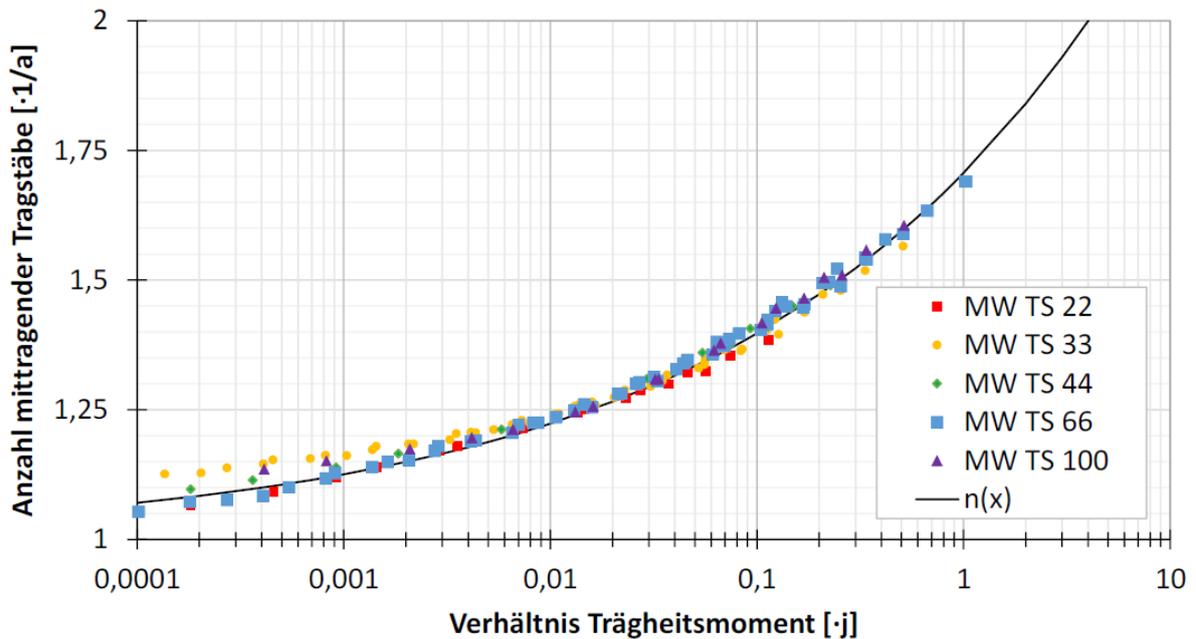


Abbildung 2-11: Gesetzmäßigkeit zur Beschreibung der Anzahl von mittragenden Tragstäben [10]

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurde durch [10] eine Formel entwickelt, die diese Zusammenhänge aufgreift und die Kurve $n(x)$ in Abbildung 2-11 erzeugt. Diese weist eine sehr gute Übereinstimmung mit den numerischen Ergebnissen auf. Die Formel mit den zugehörigen Parametern ist in Gleichung (2.11) definiert.

$$n = (k \cdot \sqrt[4]{x \cdot j} + 1) \cdot a \quad (2.11)$$

$$\text{mit: } x = \frac{I_{y, QS}}{I_{y, TS}}$$

$$k = \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ (Pressroste) ; } k = 0,801 \text{ (Schweißpressroste)}$$

$$j = \frac{MW_{TS}}{MW_{QS}}$$

$$a = \frac{b_{Last}}{MW_{TS}}$$

Enthalten sind insbesondere die Normierungsfaktoren j und a , das Verhältnis aus den Trägheitsmomenten der Trag- und Querstäbe x sowie ein Beiwert k , der aus einer Regressionsanalyse ermittelt wurde. Zu dieser Formel ist hinzuzufügen, dass die Ergebnisse nur für die getestete Gitterrostabmessung mit einer Stützweite von 1200mm zutrifft und eine Änderung dieser Größe zu wesentlich anderen Ergebnissen führt. Eine Bestimmung der Anzahl von den mittragenden Tragstäben auf reiner Basis der Tragstabhöhe, wie es die aktuelle RAL-GZ [1] handhabt, ist daher durch [10] widerlegt worden.

2.5 Differentialgleichung zu anisotropen Platten unter Biegebeanspruchung

Manche Zusammenhänge des vorherigen Kapitels finden sich bereits in älteren Werken wie [12] wieder, die sich mit der Plattentheorie und insbesondere mit dem anisotropen Verhalten von Platten beschäftigen. Anisotropie beschreibt dabei verschiedene mechanische Tragverhalten, die aufgrund von unterschiedlichen Materialien, strukturellen Beschaffenheiten oder Querschnittsflächen richtungsabhängig sind [12]. Gitterroste fallen infolge der unterschiedlichen Abmessungen von Trag- und Querstäben unter dieses Tragverhalten, da ihr Querschnittswiderstand und damit auch die Steifigkeit in die zwei verschiedenen Richtungen in der Plattenebene unterschiedlich hoch sind.

Besonders interessant in [12] ist für diese Arbeit das Kapitel „Application of the Theory to the Calculation of Gridworks“, welches anisotrope Platten bestehend aus rechtwinklig zueinander liegenden Balken behandelt. Auf Basis einer hergeleiteten Differentialgleichung für anisotrope Platten und eine allgemeine, differenziale Betrachtung der Momente in den Balken werden zwei wesentliche Parameter herausgefiltert, die das elastische Tragverhalten von solchen anisotropen Platten im Wesentlichen beschreiben.

Der erste Parameter lautet λ und beschreibt ein Verhältnis aus den Flächenträgheitsmomenten und den Abständen der rechtwinklig zueinander liegenden Balken unter der vierten Wurzel. Die Formel für diesen Parameter ist in Gleichung (2.12) mitsamt den Bezeichnungen für die Variablen und deren Bedeutung im Zusammenhang mit den Gitterrosten dargestellt.

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{B_2 \cdot b_1}{B_1 \cdot a_1}} \quad (2.12)$$

mit: $B_{1|2}$ = Flächenträgheitsmoment eines Balkens ($\triangleq I_{y,TS|QS}$)

$b_1|a_1$ = Abstand zwischen parallelen Balken ($\triangleq MW_{TS|QS}$)

Die Balken mit den Flächenträgheitsmomenten B_1 besitzen dabei den Abstand b_1 und die Balken mit B_2 besitzen folglich den Abstand a_1 zueinander. Durch den Austausch dieser Parameter durch die entsprechenden Größen eines Gitterrostes ergibt sich für λ dieselbe Formel, wie sie als Term in Gleichung (2.11) bereits vorhanden ist. Der durch [10] gefundene Zusammenhang zwischen der Anzahl mittragender Stäbe und dem Steifigkeitsverhältnis sowie der Maschenweiten ist demnach bereits durch analytische Herleitungen in [12] belegt worden.

Der zweite Parameter ist dagegen durch μ beschrieben und gibt das Verhältnis aus den Torsionssteifigkeiten zu den Biegesteifigkeiten der beiden Balkenrichtungen an. Die jeweiligen Steifigkeiten werden wie bei λ auf die vorhandenen Abstände zwischen den Balken bezogen. Die Formel ist in Gleichung (2.13) angegeben.

$$\mu = \frac{1}{2} \cdot \frac{\frac{C_1}{b_1} + \frac{C_2}{a_1}}{\sqrt{\frac{B_1 \cdot B_2}{a_1 \cdot b_1}}} \quad (2.13)$$

mit: $C_{1|2}$ = Torsionsträgheitsmoment eines Balkens ($\triangleq I_{T,TS|QS}$)

Dieser Zusammenhang ist in den bisherigen Forschungen zu den Gitterrosten noch nicht untersucht worden und kann in Verbindung mit der Anzahl der mittragenden Stäbe n noch näher erforscht werden.

2.6 Stabilitätsversagen von Stahlbauteilen unter Momentenbeanspruchung

Eine weitere Einflussgröße auf die Tragfähigkeit von Gitterrostplatten ist das mögliche Stabilitätsversagen der Tragstäbe bei schlanken Geometrien. Der MPA-Bericht [8] und die darauf basierende RAL-GZ [1] beinhalten keine Aussage zu dieser Versagensart, da lediglich Gitterroste mit Maschenteilungen von 33mm geprüft wurden und dort kein Stabilitätsphänomen aufgetreten ist. Unter Berücksichtigung der Zielvorgabe, eine größere Bandbreite an Konfigurationen für die Bemessung zu ermöglichen, ist dieses Phänomen jedoch zu erfassen und mit analytischen Herangehensweisen zu beschreiben. Aufgrund der schmalen Beschaffenheit der Tragstäbe und der vorhandenen Belastungsarten lassen sich möglicherweise zwei verschiedene, bereits definierte Versagensarten infolge Stabilität auf die Gitterroste anwenden. Die erste Versagensart stellt das Biegedrillknicken dar, welches das Ausweichen des Druckgurtes unter Momentenbeanspruchung in Abhängigkeit einer kritischen Verzweigungslast definiert. Die zweite Versagensart ist das sogenannte Plattenbeulen, welches das Ausknicken von unter Druck stehenden, dünnen Plattenbauteilen im Stahlbau beschreibt. Beide Ansätze werden im Folgenden näher erläutert.

2.6.1 Biegedrillknicken

Das Biegedrillknicken beschreibt das in Abbildung 2-12 gezeigte Stabilitätsphänomen, welches in der Vergangenheit auch unter dem Begriff Kippen bekannt war und das Ausweichen des druckbeanspruchten Querschnittsteils inklusive einer Rotation des Bauteils um die eigene Achse infolge einer Momentenbeanspruchung erfasst. Dieses Versagen kann im eingebauten Zustand eines Bauteils meist durch die vorhandenen seitlichen Haltungen wie Pfetten eingeschränkt beziehungsweise ganz ausgeschlossen werden. Häufig tritt das Biegedrillknicken deshalb bei Trägern im Bauzustand infolge des Eigengewichts auf, sodass die Bauteile ausreichend dagegen gesichert oder nachgewiesen werden müssen.

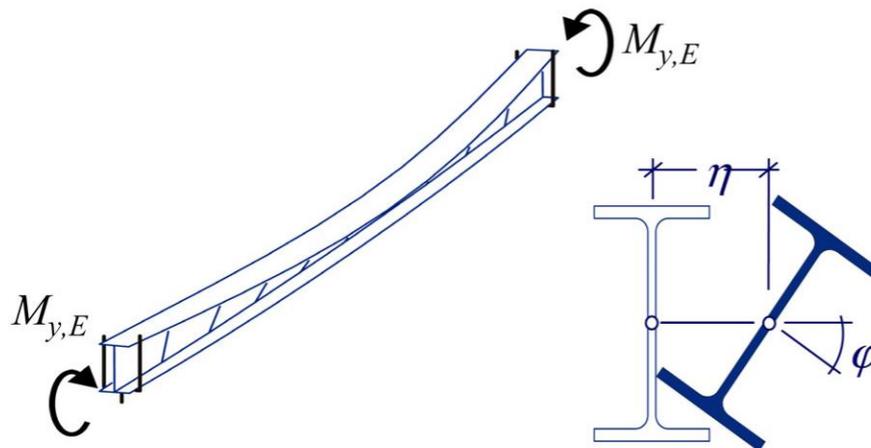


Abbildung 2-12: Biegedrillknickproblem eines Trägers unter Momentenbeanspruchung [13]

Die Berechnung der Stabilität durch Biegedrillknicken geschieht im Stahlbau nach dem Eurocode 3 Teil 1-1 [9] und berücksichtigt einen Abminderungsfaktor χ_{LT} des Bauteilwiderstands in Abhängigkeit der bezogenen Schlankheit $\bar{\lambda}_{LT}$. Diese Schlankheit beschreibt die generelle Anfälligkeit eines Bauteils für das Biegedrillknicken, wobei ein höherer Wert der Schlankheit eine höhere Stabilitätsgefahr bedeutet. Diese berechnet sich nach Gleichung (2.14) aus dem Momentenwiderstand $M_{y,Rk}$ des Querschnitts und der kritischen Verzweigungslast in Form eines idealen Biegedrillknickmoments M_{cr} .

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{M_{cr}}} \quad (2.14)$$

Der Momentenwiderstand kann je nach Querschnittsklasse plastisch, elastisch oder nur mit effektiven Werten infolge ausfallenden Querschnittsteilen angesetzt werden. Das ideale Biegedrillknickmoment wird dagegen meist an einem Ersatzstab aus dem geplanten System berechnet und ist in vielen Tabellenwerken mit Formeln und Beiwerten bereits für viele typische statische Systeme gegeben. Es gibt die ideale Verzweigungslast an, unter der ein betrachteter Stab mit perfekten Eigenschaften durch dieses Stabilitätsphänomen versagt. Eine allgemeine Formel für einen Einfeldträger mit einem konstanten oder linearen Momentenverlauf in Abhängigkeit der Systemlänge und den Querschnittswerten des betrachteten Bauteils gibt [14] in Gleichung (2.15).

$$M_{cr} = \zeta \cdot \frac{\pi}{L} \cdot \sqrt{E \cdot I_z \cdot G \cdot I_T} \cdot \sqrt{1 + \frac{E \cdot I_w \cdot \pi^2}{G \cdot I_T \cdot L^2}} \quad (2.15)$$

Die Formeln der kritischen Verzweigungslast sowie der bezogenen Schlankheit werden in Kapitel 6.3.2.2 wieder aufgegriffen und im Zusammenhang mit den betrachteten Gitterrostplatten näher erläutert und angepasst.

2.6.2 Plattenbeulen

Der Nachweis des Plattenbeulens von dünnen Stahlbauteilen wird im Eurocode 3 Teil 1-5 [15] behandelt und weist Parallelen zu dem Nachweis für das Biegedrillknicken auf. Plattenbeulen infolge von Längsbeanspruchungen tritt ausschließlich in den druckbeanspruchten Querschnittsteilen auf und beschreibt das Ausknicken dieses Bereichs aus der Plattenebene heraus. Um die Gefahr des Beulens zu beschreiben und in dem Nachweis zu erfassen, wird analog zum Biegedrillknicken ebenfalls ein Abminderungsfaktor ρ in Abhängigkeit der bezogenen Platten schlankheit $\bar{\lambda}_p$ berechnet. Dieser Faktor beschreibt den Anteil der Querschnittsfläche, der infolge des Beulens effektiv noch wirksam ist und für die Tragfähigkeit angesetzt werden kann.

Die Schlankheit bestimmt sich dazu ebenfalls analog zum Biegedrillknicken aus dem Bauteilwiderstand in Form der vorhandenen Fließspannung f_y und der kritischen Beulspannung σ_{cr} nach Gleichung (2.16). Letztere ist abhängig von den Bauteilabmessungen sowie dem Spannungsverhältnis ψ , welches bei einem linear elastischen Spannungsverlauf infolge einer Momentenbeanspruchung „-1,0“ beträgt, da die maximalen Druck- und Zugspannungen bei einem Rechteckquerschnitt mit umgekehrten Vorzeichen gleich hoch sind.

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} \quad (2.16)$$

Die angesprochene Spannungsverteilung mit den wichtigsten Bauteilabmessungen ist in Abbildung 2-13 vereinfacht für ein rechteckiges Plattenbauteil dargestellt. Der Eurocode 3 [15] unterscheidet dabei zwischen einem einseitig und einem zweiseitig gestützten Querschnittsteil, wobei in der vorliegenden Abschlussarbeit lediglich die beidseitige Stützung, wie in der Abbildung angedeutet wird, interessant ist.

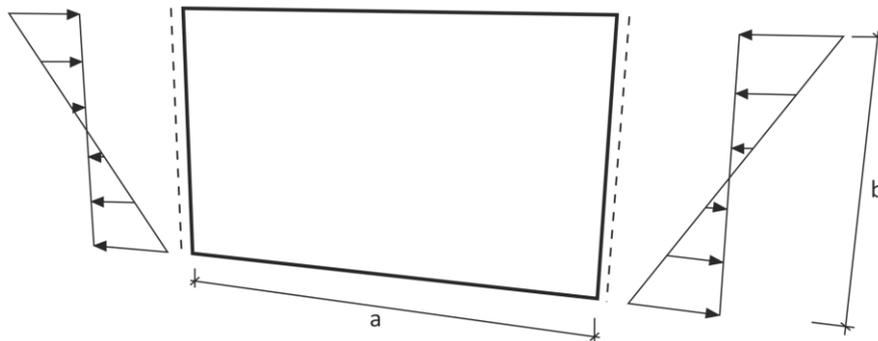


Abbildung 2-13: Zweiseitig gelagertes Plattenbauteil mit linear elastischem Spannungsverlauf

Der Abminderungsfaktor ρ berechnet sich für dieses zweiseitig gelagerte, plattenartige Bauteil nach Gleichung (2.17) und kann höchstens 1,0 betragen, da ansonsten mehr als die vorhandene Querschnittsfläche angesetzt werden würde.

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad (2.17)$$

Wie zu erkennen ist auch der Abminderungsfaktor ρ von dem Spannungsverhältnis ψ abhängig, sodass die Formel infolge der betrachteten linear elastischen Momentenbeanspruchung mit dem Spannungsverhältnis „-1,0“ zu Gleichung (2.18) vereinfacht werden kann.

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,11}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad (2.18)$$

Auch diese Formel wird in den weiteren Untersuchungen in Kapitel 6.3.3 wieder aufgegriffen und in den Zusammenhang mit den Gitterrostplatten gesetzt.

2.7 Wahre Spannung und Dehnung

Zu einer experimentellen Untersuchung der Tragfähigkeit von Probekörpern gehört in jedem Fall auch eine genaue Erfassung der Materialkennwerte, die durch zusätzliche Materialprobenversuche erlangt werden. Diese bestehen für metallische Werkstoffe meist aus Zugproben, bei denen in erster Linie die auftretenden Spannungen und Dehnungen gemessen werden. Diese werden während des Versuches mit den Querschnittswerten des Ausgangszustandes der Zugprobe berechnet und heißen technische Spannungen und Dehnungen [16]. Die gemessenen Werte beinhalten aufgrund des Bezugs auf den Ausgangsquerschnitt nicht die quer zur beanspruchten Achse auftretenden Verformungen, die zur Einschnürung der Zugprobe und letztendlich zum Bruch führen. Bei der geringer werdenden Querschnittsfläche sind die vorhandenen Spannungen insbesondere bei höherer Dehnung wesentlich größer, als sie mit dem Ausgangsquerschnitt in der technischen Spannung berechnet werden. Diese vorhandenen Spannungswerte werden die wahre Spannung genannt und können nach [16] mithilfe der Gleichung (2.19) direkt aus der technischen Spannung und Dehnung berechnet werden.

$$\sigma_w = \sigma_0 \cdot (\varepsilon_0 + 1) \quad (2.19)$$

Weiterhin ist auch die technische Dehnung etwas geringer als sie in der gezogenen Materialprobe mit der Querschnittsverjüngung ist, sodass ebenfalls eine wahre Dehnung nach [16] entsprechend der Gleichung (2.20) berechnet werden kann.

$$\varepsilon_w = \ln(\varepsilon_0 + 1) \quad (2.20)$$

Die wahren Spannungen und Dehnungen sind insbesondere bei der Berücksichtigung in der Finite-Elemente-Methode notwendig, um eine realitätsnahe Abbildung der Materialeigenschaften im plastischen Verformungszustand zu erlangen. Im Rahmen der vorliegenden Abschlussarbeit wird die Berechnung der wahren Spannungen und Dehnungen in Kapitel 4.1.3 aufgegriffen und in den numerischen Berechnungen in Kapitel 5 verwendet.

3 Experimentelle Untersuchungen

Das gesamte Vorgehen für die Erstellung eines neuen Bemessungskonzeptes beruht grundlegend auf der Durchführung von umfangreichen Versuchen, um ausreichend Erkenntnisse zu den unterschiedlichsten Zusammenhängen von Gitterrosten erfassen zu können. Für die folgenden Untersuchungen zur Erweiterung der aktuellen RAL-GZ [1] sind drei verschiedene Kategorien von Versuchen erforderlich: Materialproben, Gitterroststreifen und Gitterrostplatten. Zu welchem Zweck diese durchgeführt und welche Versuchsparameter dabei variiert werden, ist in diesem Kapitel näher erläutert.

3.1 Versuchsmatrix

Die Versuchsreihe wird in zwei separaten Serien durchgeführt. Die erste Serie beschäftigt sich bei gleichbleibenden Tragstab- und Querstababmessungen mit der Variation der Maschenteilungen und den Gitterrostabmessungen unter ausschließlicher Verwendung von Pressrosten. In der zweiten Serie wird zusätzlich das Spektrum an getesteten Stababmessungen und Gitterrosttypen sowie Materialien erweitert.

Eine Übersicht über die in der ersten Serie getesteten Gitterrostplatten mitsamt dem verwendeten Material, den Herstellern und den Abmessungen ist in Tabelle 3-1 zu sehen. Für die erste Untersuchung wird ein Baustahl S235 von einem einzigen Hersteller untersucht, um fertigungsbedingte Abweichungen zwischen den 24 Gitterrosten zu minimieren. Somit werden für die gesamte erste Serie nur sechs durchzuführende Materialproben (drei Tragstab- und drei Querstabproben) benötigt. Die angegebenen Nennmaße für die Querschnitte orientieren sich für den gewählten Tragstab an den Mindestmaßen nach der RAL-GZ für Gitterroste [1], die in Tabelle 2-2 und Tabelle 2-3 angegeben sind.

Die ersten 18 Gitterrostplatten werden mit einem quadratischen Lastwürfel von 200mm Seitenlänge getestet. Diese lassen sich weiter in Gruppen von sechs Probekörpern teilen, bei denen die Plattenabmessungen der Stützweite L zur Breite B jeweils gleich sind. Innerhalb dieser Gruppen unterscheiden sich diese Probekörper lediglich durch die Maschenweiten zwischen den Tragstäben und den Querstäben. Diese sind so gewählt, dass die Lastwürfelbreite ein Vielfaches von diesem Abstand ist und somit die Knotenpunkte der Stäbe passgenau an den Lastwürfelkanten liegen. Eine vierte Gruppe von sechs Probekörpern untersucht im Anschluss den Einfluss einer kleineren Lastwürfelabmessung von 50mm mit den vorher bereits getesteten Gitterrostplatten, die eine Maschenweite kleiner 50mm aufweisen.

Für die Referenzversuche in Form von den Gitterroststreifen werden in der ersten Serie insgesamt zwölf Probekörper getestet. Dabei werden die vier unterschiedlichen Maschenweiten zwischen den Querstäben jeweils dreimal geprüft bei ansonsten gleich gewählten Randbedingungen zu den zugehörigen Gitterrostplatten.

Tabelle 3-1: Übersicht der getesteten Probekörper in Versuchsserie 1

Nr	Typ	Material	Hersteller	$h_{TS,nom}$	$b_{TS,nom}$	$h_{QS,nom}$	$b_{QS,nom}$	MW_{TS}	MW_{QS}	L	B	LW	
				mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	
1	Pressrost	Baustahl S 235 (verzinkt)	Lichtgitter	30	2	9	1,5	33	33	1200	1000	200	
2								33	66				
3								66	66				
4								66	33				
5								33	11				
6								33	100				
7								33	33	1200	500		
8								33	66				
9								66	66				
10								66	33				
11								33	11				
12								33	100				
13								33	33	800	1000		
14								33	66				
15								66	66				
16								66	33				
17								33	11				
18								33	100				
19								33	33	1200	1000		50
20								33	11				
21								33	33	1200	500		
22								33	11				
23								33	33	800	1000		
24								33	11				

Im Gegensatz dazu wird in der zweiten Versuchsserie, die in Tabelle 3-2 und Tabelle 3-3 aufgeführt ist, sowohl der Gitterrosttyp, das Material, der Hersteller und die Querschnittsabmessungen variiert und die Gitterrostabmessungen sowie die Maschenteilung zwischen den Tragstäben gleichgehalten. Die Maschenteilung zwischen den Querstäben bei Pressrosten wird analog zur ersten Serie mit den vier Abständen variiert, sodass sich nun vier ansonsten identische Gitterroste zu einer Gruppe zusammenfassen lassen. Ausnahmen bilden dabei die erste Gruppe, bei der zusätzlich zwei kleinere Lastwürfel getestet werden und die Gruppe der Vollroste, bei denen eine sehr geringe Maschenweite nicht umsetzbar ist. Die nun zusätzlich getesteten Schweißpressroste werden ähnlich dazu mit Abwandlung der Maschenweiten, die für die Art des Gitterrostes typisch sind, hergestellt.

Zu allen Gruppen werden jeweils drei Materialproben der Tragstäbe und der Querstäbe getestet und für die Gitterroststreifenversuche werden je zwei Probekörper für die größte und zwei für die kleinste vorhandene Maschenweite angesetzt.

Tabelle 3-2: Übersicht der getesteten Probekörper in Versuchsserie 2

Nr	Typ	Material	Hersteller	$h_{TS,nom}$	$b_{TS,nom}$	$h_{QS,nom}$	$b_{QS,nom}$	MW_{TS}	MW_{QS}	L	B	LW		
				mm	mm	mm	mm	mm	mm					
25	Pressrost	Baustahl S 235 (verzinkt)	Lichtgitter	30	2	15	2	33	33	1200	1000	200		
26								33	66					
28								33	100					
29								33	33					
30								33	33					
31				70	5	14	3	33	33			100		
32								33	66					
33								33	11					
34								33	100					
35				Baustahl S 355 (verzinkt)			30	2	9			1,5	33	33
36		33	66											
37		33	11											
38		33	100											
39		Baustahl S 460 (verzinkt)	Helling & Neuhaus	40	2	9	1,5		33			33		
40									33			66		
41									33			11		
42									33			100		
43				Baustahl S460 (nicht verzinkt)		40	2	9	1,5				33	33
44													33	66
45													33	11
46	33									100				
47	Edelstahl (1.4301)	Lichtgitter	30	2	9	2		33	33					
48								33	66					
49								33	11					
50								33	100					
51			Aluminium (AlMg3 H22)		30	2	9	2		33	33			
52										33	66			
53										33	11			
54										33	100			
55	Vollrost	Baustahl S 235 (verzinkt)	Lichtgitter	30	2	30	2	33	33					
56								33	66					
57								33	100					
62	Schweißpressrost	Baustahl S 235 (verzinkt)	Lichtgitter	30	2	3,46	3,46	34,33	38					
63								34,33	50					
64								34,33	24					
66				60	5	4,03	4,03			34,33	38			
67										34,33	50			
68										34,33	24			
69										34,33	102			

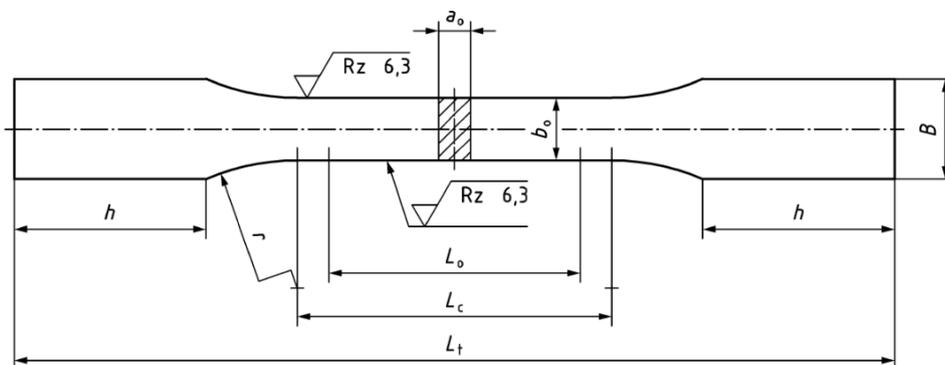
Tabelle 3-3: Übersicht der getesteten Probekörper in Versuchsserie 2 (Fortsetzung)

Nr	Typ	Material	Hersteller	$h_{TS,nom}$	$b_{TS,nom}$	$h_{QS,nom}$	$b_{QS,nom}$	MW_{TS}	MW_{QS}	L	B	LW
				mm	mm	mm	mm	mm	mm			
70	Schweißpressrost	Baustahl S 235 (nicht verzinkt)	Thöne	40	2	3,46	3,46	34,32	38	1200	1000	200
71								34,32	50			
72								34,32	24			
73								34,32	78			
74		Baustahl S 460 (nicht verzinkt)	Thöne	40	2	3,46	3,46	34,32	38			
75								34,32	50			
76								34,32	24			
77								34,32	78			

Anmerkung: Die fehlenden Versuchsnummern entstanden durch die Rückmeldung des Herstellers, dass die dort geplanten Gitterrostkonfigurationen nicht herstellbar sind. Dies galt insbesondere für geringe Maschenteilungen bei großen Querstäben und bei großen Maschenteilungen mit kleinen Querstababmessungen. Entsprechend waren auch ein paar Gitterroststreifen nicht vorhanden oder wurden durch die nächsthöhere beziehungsweise -niedrigere Maschenweite ersetzt.

3.2 Materialproben

Die erste Kategorie an Versuchen besteht aus den Zugproben, mit denen die wichtigsten Materialparameter der Gitterrostprobekörper bestimmt werden. Dazu werden von den Herstellern unverzinkte Stränge von dem genutzten Coil mitgeliefert und aus diesen anschließend knochenförmige Probekörper gemäß [17] ausgeschnitten. Diese haben je nach Materialdicke unterschiedliche Abmessungen, sodass es für die Tragstäbe mit eineinhalb, zwei und fünf Millimetern drei verschiedene Formate gibt. Die allgemeine Probenform inklusive aller relevanten Maße ist in Abbildung 3-1 dargestellt.



Legende

- | | | | |
|-------|---|-------|---|
| a_0 | Probendicke | L_0 | Anfangsmesslänge ($L_0 = 5,65\sqrt{a_0 \times b_0}$) |
| b_0 | Probenbreite | L_c | Parallele Länge ($L_c \geq L_0 + 1,5\sqrt{a_0 \times b_0}$) |
| B | Kopfbreite ($\approx 1,2 b + 3 \text{ mm}$) | L_t | Gesamtlänge |
| h | Kopfhöhe ($\approx 2 b + 10 \text{ mm}$) | r | Übergangsradius |

Abbildung 3-1: Zugprobengeometrie E gemäß DIN 50125 [17]

Anmerkung: Spätere Vergleiche von den Versuchsergebnissen mit den verzinkten Streifen- und Plattenversuchen ergaben, dass die zugehörigen Materialproben allesamt zu niedrige Fließgrenzen aufweisen. Daher wurden zusätzlich auch Materialproben aus ungestörten Bereichen von den bereits getesteten Gitterrostplatten entnommen, um diese mit den unverzinkten Zugproben zu vergleichen. Zusätzlich wurden in dem Vorgang auch Materialproben von einigen Gitterrostplatten entnommen, für die in dem vorherigen Schritt keine Stränge aus dem Coil mitgeliefert worden sind. Somit liegen nun für nahezu alle Probekörpergruppen ausreichend Materialprüfungen vor. Eine Ausnahme bilden dabei die verdrehten Querstäbe von den Schweißpressrosten, da diese nicht in dem Versuchsstand getestet werden können.

3.2.1 Versuchsaufbau

Der Versuch wird in der *Z100 AllroundLine* Prüfmaschine von *Zwick Roell* durchgeführt. Die dazu erforderlichen Einbauteile sind ebenfalls von dem Hersteller, sodass sich ein passgenaues Gefüge der aneinander gereihten Bauteile ergibt und ungewollte Setzungen und Kraftverluste aus dem System bestmöglich verhindert werden. Zu diesen Einbauteilen gehören unter anderem eine Kraftmessdose zur genauen Erfassung der entstehenden Zugkraft, Extensometer für die exakte Dehnungserfassung und Spannbacken, die die Zugproben an den breiteren Enden in Position halten. Der Aufbau mit den genannten Bestandteilen ist in Abbildung 3-2 anhand von Kameraaufnahmen gezeigt.



Abbildung 3-2: Versuchsaufbau für die Zugproben (links) und Seitenansicht einer Zugprobe (rechts)

Die Versuche werden dehnungsgesteuert gemäß der Norm [18] durchgeführt. Darin ist vorgeschrieben, dass für den linear elastischen Bereich zur schnelleren Erfassung der Daten eine höhere Dehnungsgeschwindigkeit aufgebracht wird als für den plastischen Bereich ab der Fließgrenze, bei dem eine genauere Datenerfassung mit niedrigerer Dehnungsgeschwindigkeit zur Ermittlung der relevanten Materialparameter sinnvoller ist. Zusätzlich wird am Anfang eines Versuchs eine Vorkraft von 50 Newton aufgebracht, um eine ausreichende Lagesicherung der Zugprobe in den Spannbacken zu gewährleisten.

3.2.2 Gemessene Daten

Vor der Durchführung eines Versuches werden die Querschnittsgrößen in dem schmalen Sollbruchstellenbereich aufgenommen. Dazu werden je drei Breiten und drei Dicken mithilfe einer digitalen Schieblehre gemessen und in das zum Prüfstand zugehörige Programm eingegeben.

Die anschließend im Versuch erzeugten Daten der Materialprüfungen werden mit demselben Programm aufgenommen und unmittelbar auf dem Messcomputer gespeichert. Dazu gehören in erster Linie die Zeit mit der dazugehörigen Kraft und dem gezogenen Weg. Diese werden zusätzlich mithilfe der zuvor angegebenen Querschnittsgrößen in die technischen Spannungen und Dehnungen umgerechnet und ebenfalls gespeichert.

Im Anschluss an den Versuch wird nun noch die Breite und Dicke an der gebrochenen Stelle gemessen, um die Verjüngung des Querschnitts beurteilen zu können. Des Weiteren errechnet der Messcomputer auch einige Materialgrößen aus den gemessenen Daten, wie den E-Modul, die Fließgrenze und die maximale Spannung. Diese Werte werden jedoch zu einem späteren Zeitpunkt noch einmal genauer ermittelt.

3.3 Gitterroststreifen

Die zweite Versuchskategorie besteht aus den Referenzversuchen in Form der Gitterroststreifen. Anhand dieser Probekörper werden die Eigenschaften der einzelnen Tragstäbe unter Biebeanspruchung erfasst, indem der schmale Streifen bestehend aus fünf bis sechs Tragstäben unter Gleichlast beansprucht wird. Durch diese Belastungsart wird sichergestellt, dass keine Querverteilung durch die Querstäbe zustande kommt, da alle Tragstäbe eine gleichmäßige Durchbiegung erfahren. Die Tragstäbe werden durch eine zwängungsfreie Lagerung und Lasteinleitung lediglich um ihre starke Achse gebogen, sodass die vorhandene Belastungsart rein aus dem hieraus entstehenden Biegemoment um diese Achse besteht.

Wie bereits in dem vorherigen Kapitel erläutert, wird in der ersten Serie jede vorkommende Maschenteilung zwischen den Querstäben mit je drei Gitterroststreifen getestet, sodass in Summe zwölf Probekörper vorhanden sind. In der zweiten Serie werden dagegen bei den meisten Gruppen lediglich die größte und die kleinste vorkommende Maschenteilung je zweimal als Streifenversuch durchgeführt, um eine zu hohe Anzahl an Versuchen zu vermeiden.

Durch eine vorab durchgeführte Betrachtung der Probekörper wird festgestellt, dass die Tragstäbe bei fast allen Gitterroststreifen sehr gerade und ohne große Krümmungen vorliegen. Dies liegt zum einen an den Querstäben, die entlang der Tragstabachse im regelmäßigen Abstand eine seitliche Halterung bieten, aber zum anderen insbesondere an der Randeinfassung an den beiden Enden des Streifens. Allerdings ist diese Randeinfassung bei manchen gelieferten Proben nicht vorhanden, sodass mit angefertigten passgenauen Kämmen aus Holz nachgeholfen wird, indem diese vor allem bei Gitterroststreifen mit wenig Querstäben auf die Enden gesetzt werden.

Anmerkung: Die Versuche der zweiten Serie weisen einige Abweichungen auf, da durch die Streichung mancher Probekörper auch der zugehörige Streifenversuch nicht mitgeliefert werden konnte. Zudem gibt es in den letzten zwei Gruppen von dem Hersteller Thöne nur jeweils eine Gitterroststreifenkonfiguration mit vier Probekörpern statt der angedachten zwei Konfigurationen mit unterschiedlichen Maschenweiten und je zwei Probekörpern. Dies ist auf ein Missverständnis mit dem Hersteller zurückzuführen. Des Weiteren sind die zwei Gruppen von Helling und Neuhaus aus höherfestem Stahl sowie die Gitterroste aus Aluminium und die Vollroste mit jeder Maschenteilung je zweimal vorhanden, damit bei diesen Versuchen der Einfluss der verschiedenen Maschenweiten auf die Biegesteifigkeit und Tragfähigkeit genauer untersucht werden kann.

3.3.1 Versuchsaufbau

Die Referenzversuche werden in Form von einem typischen Vierpunktbiegebalken durchgeführt, wozu zwei Auflagerrollen an den Enden und zwei Lasteinleitungsrollen mit einem Abstand von 200mm zueinander in der Mitte den Probekörper belasten. Für die Versuchsdurchführung wird auch in dieser Versuchsreihe die Prüfmaschine *Z100 AllroundLine* von *Zwick Roell* genutzt, die für diesen Zweck entsprechend umgebaut wird. Dazu sind an der Prüfmaschine zwei Traversen angebracht, die über und unter dem Probekörper mit ausreichend hohem Widerstand die Kräfte aufnehmen und verteilen können. An diesen Traversen werden dann die Auflager- und Krafteinleitungsrollen befestigt, zwischen denen im Versuchsverlauf der Gitterroststreifen liegt. Um zusätzlich die zuvor angesprochene zwängungsfreie Lasteinleitung zu gewährleisten, ist über der oberen Traverse ein Gelenk zwischengeschaltet, welches die Kippbewegungen in Gitterrostlängsrichtung mitgehen kann. Der beschriebene Aufbau des Versuches mit allen Komponenten sowie die zuvor genannten Holzkämme sind in Abbildung 3-3 zu sehen.

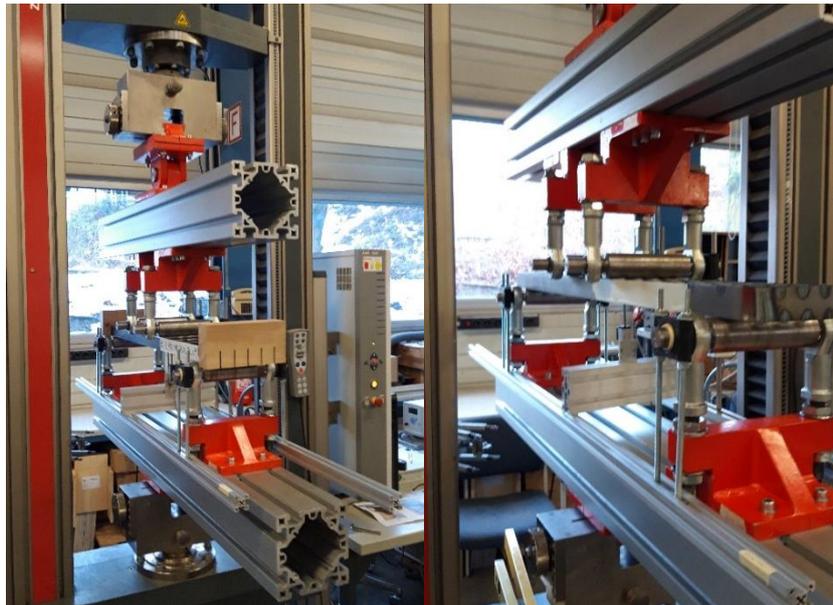


Abbildung 3-3: Ansicht des Versuchsaufbaus für die Gitterroststreifen

Zusätzlich sind auf der Abbildung die Komponenten zur Weg- und Kraftmessung zu erkennen. Diese bestehen einerseits aus der oben angebrachten Kraftmessdose und der internen Wegmessung der Prüfmaschine und andererseits aus den zusätzlich vorgesehenen Wegaufnehmern unter der Mitte des Gitterroststreifens und an den Lasteinleitungsrollen. Diese sind mithilfe von zusätzlichen Schienen an den Auflagerrollen befestigt, sodass jegliche Setzungen aus dem restlichen Versuchsaufbau bei ansteigender Kraft die Messungen der Wegaufnehmer nicht beeinflussen. Aufgrund von einer eingeschränkten Bauhöhe der Wegaufnehmer können diese jedoch nicht den gesamten Weg bis zur Traglast mitmessen, weshalb diese ab Erreichen des plastischen Traglastbereichs von dem Versuch entfernt werden. Genauer zu erkennen sind alle genannten Elemente auf der Bauteilzeichnung in Abbildung 3-4.

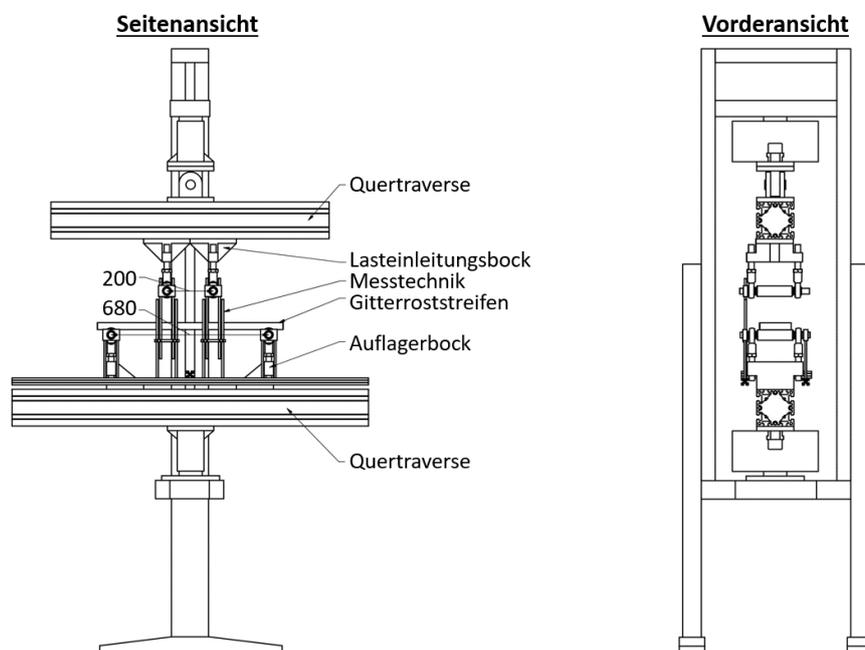


Abbildung 3-4: Zeichnungen des Versuchsaufbaus für die Streifenversuche mit 30mm Tragstabhöhe

Da in der Versuchsreihe der Gitterroststreifenversuche verschiedene Tragstabhöhen vorkommen, würde die Verwendung einer gleichbleibenden Stützweite dazu führen, dass die benötigte Kraft bei größerer Tragstabhöhe stark ansteigt. Um keine unnötig hohen Kraftniveaus zu provozieren, wird deshalb die Stützweite in Abhängigkeit von der Höhe des Tragstabs mithilfe folgender Formel variiert.

$$L = 16 \cdot h_{TS,nom} + 200 \text{ [mm]} \quad (3.1)$$

Darüber hinaus besitzen die Streifen zur Sicherheit noch einen gewissen Überstand, der mit der zweifachen Tragstabhöhe je Seite angesetzt wird. Das statische System ist in Abbildung 3-5 für die jeweiligen Tragstabhöhen dargestellt.

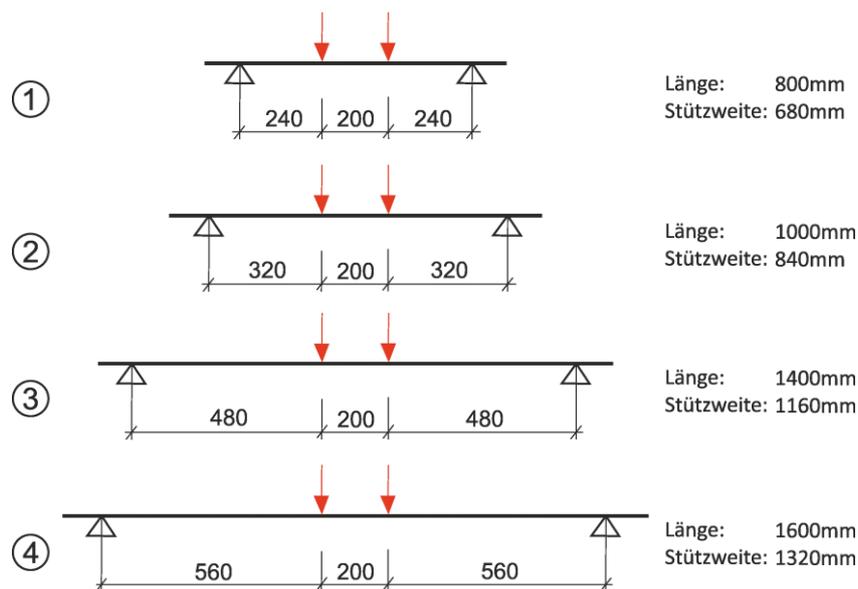


Abbildung 3-5: Systemlängen für (1) 30mm, (2) 40mm, (3) 60mm und (4) 70mm Tragstabhöhe

Ähnlich zu den Materialproben werden die Streifenversuche weggesteuert durchgeführt, wobei für den elastischen Bereich, der für spätere Berechnungen interessanter ist, eine langsamere und damit genauere Datenerfassung mit einer Geschwindigkeit von $1\text{mm}/\text{min}$ genutzt wird. Der plastische Bereich bis zum Erreichen der Traglast wird daraufhin mit $5\text{mm}/\text{min}$ gefahren. Damit die Lasteinleitungsrollen in der richtigen Position aufliegen und sich nicht zu Beginn des Versuchs ungewollt verschieben, wird auch hier zunächst eine vordefinierte Vorkraft von 50 Newton aufgebracht.

3.3.2 Gemessene Daten

Vor der Durchführung des jeweiligen Gitterroststreifenversuchs werden am Probekörper die Querschnittsgrößen der Trag- und Querstäbe sowie die Maschenweiten zwischen den Stäben erfasst. Um eine ausreichende Messwertdichte zu haben, werden an drei bis vier verschiedenen Stellen Werte mit einer digitalen Schieblehre gemessen. Die gemittelten Werte dieser Messungen sind in Anhang A.1 tabellarisch dargestellt.

Anschließend kann der Probekörper auf die Auflagerrollen gesetzt werden, wobei auf die genaue Ausrichtung zu achten ist. Das bedeutet, dass der Überstand an beiden Enden gleich groß ist und die Außenkanten des Gitterroststreifens parallel zu den Systemachsen des Versuchsstands sind. Zudem sind die Wegaufnehmer genau auszurichten, da insbesondere derjenige in Feldmitte mithilfe eines magnetisch unter dem Probekörper befestigten Metallplättchens exakt positioniert wird. Alle Messparameter (Kraft, Zylinderweg sowie Wegaufnehmer) werden über die gesamte Versuchsdauer aufgezeichnet.

3.4 Gitterrostplatten

Die Hauptkategorie an Versuchen stellen die Traglastversuche an den Gitterrostplatten dar. Mithilfe dieser Versuche soll eine ausreichend genaue Aussage über die verschiedenen Traglasten unterschiedlicher Gitterrostkonfigurationen, wie sie in der vorab festgelegten Versuchsmatrix vorhanden sind, getroffen werden.

Der Lastwürfel wird dazu an der ungünstigsten Lastposition, welche bei einer zweiseitig gelagerten Platte mittig zwischen den Auflagern am freien Rand liegt, aufgebracht und mit einem Hydraulikzylinder nach unten gedrückt. Diese Belastung entspricht somit der vorgegebenen Position aus der bisherigen RAL-GZ für Gitterroste [1] mit einem quadratischen Lastwürfel, wie sie in Abbildung 2-6 schematisch dargestellt ist.

Die Versuche werden aufgrund der Größe und der Benötigung eines Hydraulikzylinders auf einem Spannfeld durchgeführt. Der genaue Aufbau mit allen Bestandteilen für die Belastung, die Auflagerkonstruktion und die Messung werden im Folgenden näher beschrieben.

3.4.1 Versuchsaufbau

Für die Versuchsdurchführung einer Gitterrostplatte wird diese horizontal auf die Auflager gelegt und mit dem Zylinder vertikal belastet. Dazu wird auf dem Spannfeld ein Rahmen bestehend aus zwei großen Stützen und einer höhenverstellbaren Quertraverse angeordnet, an der ein Hydraulikzylinder mit maximaler Belastung von 250kN angebracht wird. Die Position des Zylinders zwischen den Stützen wird so eingerichtet, dass die Kolbenachse bei den Versuchen mittig über dem Lastwürfel liegt. Eine gerenderte, isometrische Zeichnungsansicht dieses Versuchsstandes ist in Abbildung 3-6 zu sehen.

Die zusätzlich zu erkennende Auflagerkonstruktion für das Gitterrost wird erhöht geplant, damit unter dem Versuch ausreichend Platz für die Messtechnik besteht. Dazu werden in einem Abstand von 1200mm beziehungsweise 800mm, welches der Stützweite der Probekörper entspricht, jeweils drei HEB 300 übereinandergestapelt und fest miteinander verbunden.

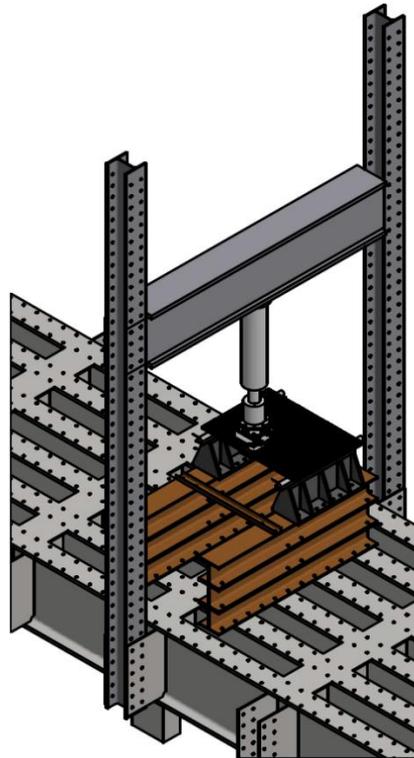


Abbildung 3-6: Isometrische Ansicht des geplanten Versuchsstandes

Für eine weitere Erhöhung der Versuchsebene und die Herstellung einer widerstandsfähigen Auflagerstützung wird auf das oberste HEB-Profil neben ein stützendes U-Profil je Seite ein Auflagerbock befestigt. Auf der Oberkante dieser Böcke werden schließlich die Auflagerrollen, die auf ein Stahlblech geschweißt sind, mithilfe von hochleistungsfähigen Klemmelementen kraftschlüssig mit der Unterkonstruktion verbunden. Diese Bauteile sind ebenfalls auf dem Foto in Abbildung 3-7 zu erkennen.



Abbildung 3-7: Ansicht des gesamten Versuchsstandes für die Gitterrostplatten

Alle Komponenten bis zur Oberkante der Auflagerrolle ergeben eine Bauhöhe von insgesamt 1410mm. Damit ist ausreichend Platz geschaffen, um darunter sowohl zwei Seilzüge zur punktuellen Wegmessung als auch Kameras zur photogrammetrischen Wegmessung anzubringen. Zusätzlich sind zwei Lichtquellen nötig, um für die zuletzt genannte Messung ausreichend Licht auf die unter dem Probekörper angebrachten Messmarken zu werfen.

Ein Problem, welches sich durch den hohen Versuchsaufbau ergibt, stellen die Setzungen der Komponenten durch eine hohe Kraftaufbringung dar. Wenn die zwei genannten Seilzüge, wie der Einfachheit halber in Abbildung 3-8 dargestellt, auf dem Boden angebracht werden, messen diese neben der aufkommenden Durchbiegung auch die lastabhängige Setzung in der Auflagerkonstruktion mit. Zur Verhinderung dieses Messungsfehlers wird eine spezielle Stahlkonstruktion angefertigt, die direkt an die Unterkante der Auflagerrollen befestigt ist und eine Ebene mithilfe eines Stahlbleches knapp über der Spannfeldoberkante erzeugt. Auf dieses Stahlblech sind die Seilzüge entsprechend dem linken Foto in Abbildung 3-9 angebracht, so dass die vertikal abzuleitenden Kräfte nicht in diese Halterungskonstruktion gelangen und die Messungen verfälschen.

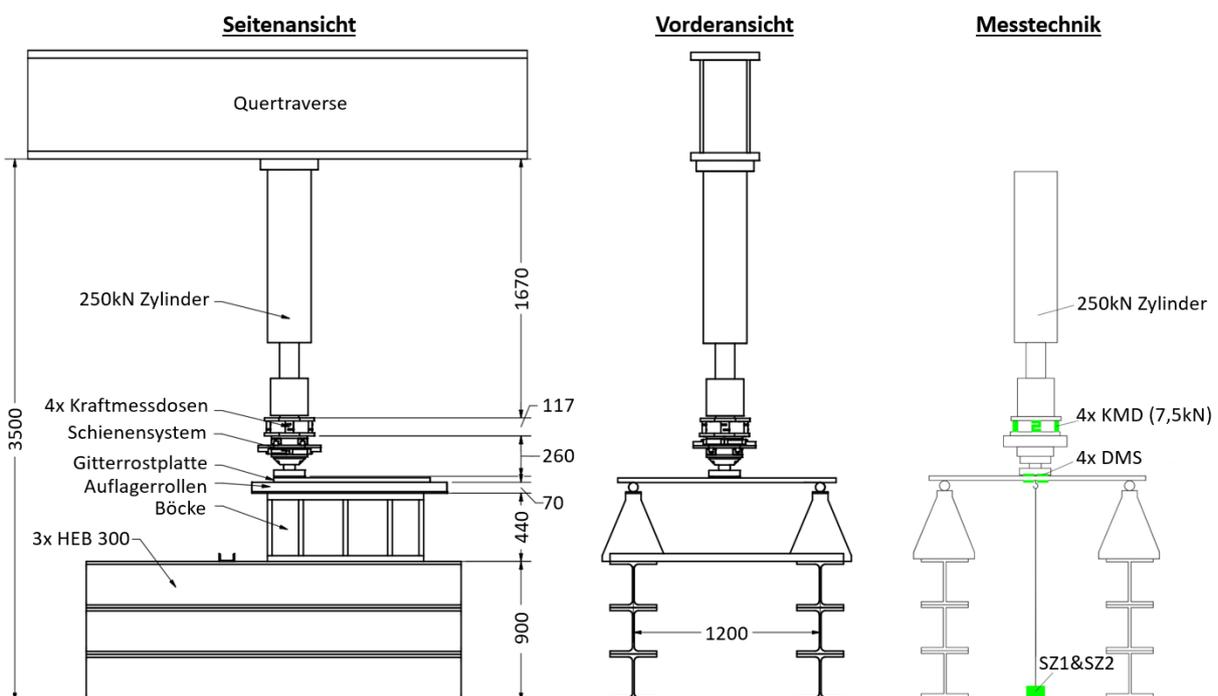


Abbildung 3-8: Abmessungen und Bestandteile des Versuchsstandes für die Gitterrostplatten

Ein weiterer Messfehler kann durch das Schiefstellen der Tragstäbe bei der Randbelastung der Gitterrostplatte entstehen, da die Seilzüge dadurch nicht nur den vertikalen, sondern auch den horizontalen Weg an der Tragstabunterkante mitgehen. Um dies auszuschließen, wird die Seilzugschleufe mithilfe einer Klammer und eines magnetischen Hakens an der Unterkante der Tragstäbe befestigt, wie es in dem rechten Foto in Abbildung 3-9 zu erkennen ist. Dadurch besitzt der Anschluss der Seilzüge an das Gitterrost eine gewisse Rotationsfähigkeit, die statt des zusätzlichen horizontalen Weges ausgenutzt wird.

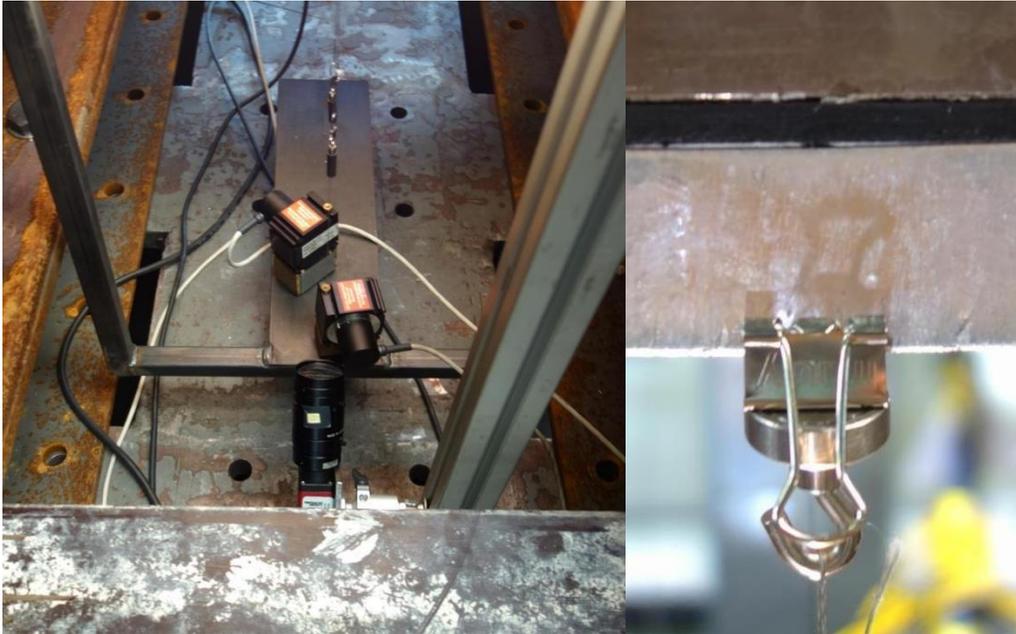


Abbildung 3-9: Seilzugkonstruktion (links) und magnetische Haken an Klammern (rechts)

Der horizontale Weg durch die Kippbewegung des Gitterrostes bei Belastung stellt auch für die Lasteinleitung durch den Hydraulikzylinder ein Problem dar. Ohne eine mögliche Verschieblichkeit dieser kommt es zu Zwängungen im System, da der Zylinder diese Bewegungen nicht mitgehen kann. Deshalb wird direkt unterhalb des Zylinders und den zusätzlich angebrachten vier Kraftmessdosen ein Schienensystem vorgesehen, welches horizontale Verschiebungen in zwei rechtwinklig zueinander liegende Richtungen erlaubt. Die restlichen Richtungen werden ermöglicht, indem sich der Kolben um seine eigene Achse drehen kann und somit das Schienensystem mitgedreht wird. Unter die Schienen wird letzten Endes noch eine Kugelkalotte angeschraubt, die durch eine zwischen Lastwürfel und Kalotte liegende Kugel Rotationen und somit die Schiefstellung des Lastwürfels erlaubt. Alle beschriebenen Elemente sind in Abbildung 3-10 gekennzeichnet.

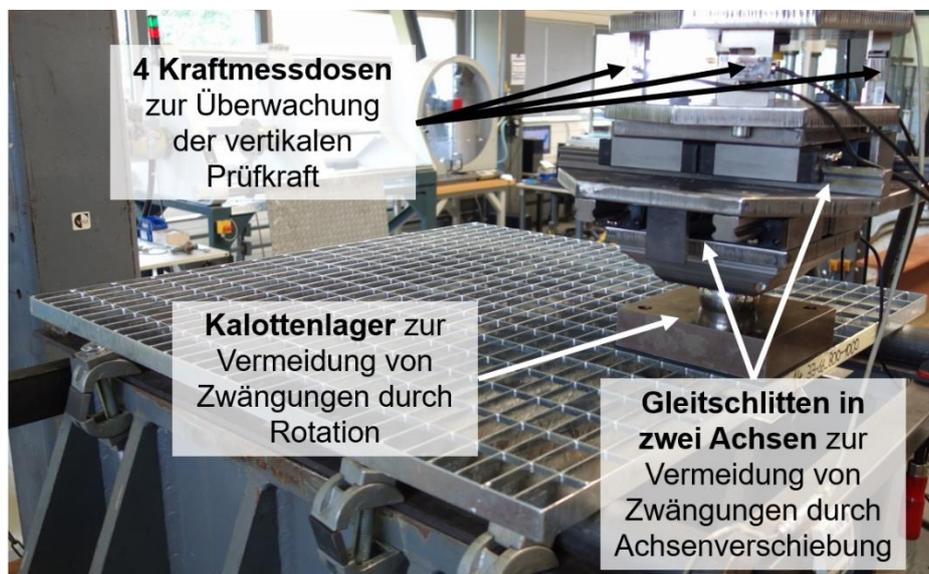


Abbildung 3-10: Lasteinleitungssystem des Versuchsstandes der Gitterrostplatten

Anmerkung: Aufgrund von einer technischen Störung bei dem in Abbildung 3-7 gezeigten Versuchstand müssen einige Versuche auf einem anderen, kleineren Spannungsfeld durchgeführt werden, welches allerdings nicht dieselbe bauliche Höhe durch die HEB-Profile und Auflagerböcke erlaubt. Daher werden dort die Versuche bodennah durchgeführt und die Photogrammetrie auf der Oberfläche der Gitterroste durchgeführt. Zudem können die vier zusätzlich angebrachten Kraftmessdosen nicht aus dem bisherigen Versuchstand entfernt werden, weshalb diese ebenfalls wegfallen und nur die Kraftmessung am Kolben stattfinden kann. Ansonsten ist der Versuchsaufbau identisch.

3.4.2 Gemessene Daten

Vor jedem durchzuführenden Versuch werden analog zu den Streifenversuchen zunächst die wichtigsten Abmessungen aufgenommen. Dazu gehören auch bei den Gitterrostplatten drei unterschiedliche Messstellen, an denen die Querschnittsgrößen der Stäbe und die Maschen-teilungen gemessen werden. Zusätzlich werden auch die mitgelieferten Coil-Stränge gemessen, um den Vergleich der unverzinkten Querschnittsgrößen gegenüber den verzinkten Größen an den Gitterrostplatten zu haben. All diese Größen sind für die Gitterrostplatten in Anhang A.2 tabellarisch aufgeführt.

Bevor die Platte auf den zuvor gezeigten Versuchstand aufgelegt wird, müssen die Hilfsmittel für die zusätzliche Wegmessung aufgebracht werden. Dazu gehören zum einen die Klammern mit den magnetischen Haken, die für die Seilzugmessungen benötigt werden, und zum anderen die Messmarken, anhand derer die Durchbiegungen an den jeweiligen Stellen mithilfe der Kameras gemessen werden. Die angeordneten Messmarken und angebrachten Haken sind in Abbildung 3-11 zu sehen.



Abbildung 3-11: Angebrachte Messmarken und magnetische Haken zur Wegmessung

Nach einer exakten Positionierung des Probekörpers auf die Auflagerrollen, der genauen Ausrichtung des Lastwürfels und der Anbringung der Seilzüge an den magnetischen Haken wird der Versuch mit allen vorgesehenen Messungen gestartet. Für die Verschiebung der Messmarken nehmen die drei angebrachten Kameras alle sieben bis acht Sekunden Bilder auf, die

im Anschluss ausgewertet werden können. Die Seilzüge sind an dem Tragstab unter der Würfelmitte und mittig am Randstab angebracht und messen durch die Rotationsfähigkeit der angebrachten Klammern den vertikalen Weg, den die Tragstäbe an der jeweiligen Stelle infolge der Zylinderbelastung mitgehen. Für eine genaue Kraftmessung werden die übertragenen Kräfte in den vier Kraftmessdosen aufgezeichnet und direkt zu einer Summe addiert. Zusätzlich stehen die Kraft- und Wegmessung des Hydraulikzylinder zur Verfügung.

Ein paar unverzinkte Gitterrostplatten aus Baustahl, Edelstahl und Aluminium mit einer hohen Maschenweite von mindestens 66mm werden zweimal durchgeführt, um deren Stabilitätsverhalten genauer untersuchen zu können. Dazu werden bei diesen Probekörpern an dem Randstab in dem mittleren Tragstabfeld beziehungsweise den mittleren Tragstabfeldern Dehnmessstreifen angebracht. Mithilfe dieser Streifen können die aufkommenden Dehnungen nahe der Randfaser gemessen werden und über den Elastizitätsmodul in Spannungen umgerechnet werden.

Alle zuvor erläuterten technischen Bestandteilen werden über einen Spider an einen Messcomputer angeschlossen und auf diesem über die Software *Diadem* aufgenommen und gespeichert. Jeder Probekörper bekommt für die anschließende genaue Identifikation eine eindeutige Bezeichnung, die zusätzlich mitsamt aller aufkommenden Problematiken und Besonderheiten in dem Versuch in einem Protokoll aufgenommen werden.

4 Auswertung der Versuchsergebnisse

Nach der Durchführung aller Versuche können die gemessenen Daten näher beleuchtet und interpretiert werden. Dazu werden die Daten aus den Messprogrammen zunächst in Tabellen wie *Microsoft Excel* und *Matlab* exportiert und dort im Anschluss genauer analysiert. Infolgedessen können die wichtigen Kenngrößen wie Materialparameter, Querschnittswerte und andere rechnerisch ermittelte Einflussgrößen erfasst werden.

Im Folgenden werden dazu getrennt nach den drei Kategorien an durchgeführten Versuchen die wichtigsten Erkenntnisse herausgestellt und näher erläutert.

4.1 Materialproben

Die Grundlage für alle weiteren Untersuchungen stellen die Zugproben dar, mithilfe derer die Materialkennwerte wie die Fließgrenze ermittelt werden. Diese dienen in späteren Schritten der Nachrechnung der Versuchsergebnisse insbesondere an den Traglastversuchen der Gitterrostplatten. Wie bereits in Kapitel 3.2 erwähnt, werden bei dieser Nachrechnung der Versuchsergebnisse Abweichungen zwischen der vorhandenen Fließgrenze des Plattenmaterials und der gemessenen Fließgrenze aus den unverzinkten Coil-Strängen der Tragstäbe festgestellt. Deshalb sind für die Tragstabzugproben sowohl unverzinkte als auch verzinkte Versuchsergebnisse vorhanden, die im Folgenden ausgewertet werden.

4.1.1 Tragstabmaterialien

Für die beiden Versuchsserien sind für jede Gruppierung mit gleichen Materialien je drei Tragstabproben aus den Coil-Strängen, falls diese vorhanden sind, und zwei bis drei Tragstabproben aus den Gitterrostplatten getestet worden. Die erste Auffälligkeit bei den Spannungs-Dehnungs-Kurven, wie sie beispielhaft für die erste Versuchsserie in Abbildung 4-1 dargestellt sind, ist das vorhandene Fließplateau bei allen Materialproben aus den Baustahl-Probekörpern. Dies deutet auf einen warmgeformten Herstellungsprozess hin und erfordert bei der Ermittlung der Fließgrenze die Bestimmung der oberen Streckgrenze R_{eH} und der unteren Streckgrenze R_{eL} im Bereich dieses Fließplateaus. Der höhere Wert gibt die rechnerisch anzusetzende Fließgrenze an.

Des Weiteren ist der Unterschied zwischen den unverzinkten Zugproben und den verzinkten Proben aus den Probekörpern zu erkennen. Die ersten drei Proben sind aus den unverzinkten Coil-Strängen und weisen eine niedrigere Fließgrenze auf als die letzten drei Proben aus den verzinkten Gitterrosten. Die Spannungsspitze vor Beginn des Fließplateaus ist zudem wesentlich ausgeprägter, wenn eine Feuerverzinkung vorgenommen wurde. Dagegen nimmt die maximale Bruchspannung sogar etwas ab und auch die Dehnung, bei der es zum Bruch der Materialprobe kommt, ist geringer als bei den unverzinkten Proben. Dieses Phänomen ist nicht gänzlich geklärt, eine mögliche Ursache könnte die sogenannte Ausscheidungshärtung sein. Die für diese Forschung wichtige Erkenntnis ist jedoch, dass der Zuwachs der Fließspannung

beträchtlich ist und für spätere Untersuchungen berücksichtigt werden muss. Daher werden im Folgenden nur Proben in die Auswertung mit einbezogen, die dem Zustand der zugehörigen Gitterrostplatte entsprechen.

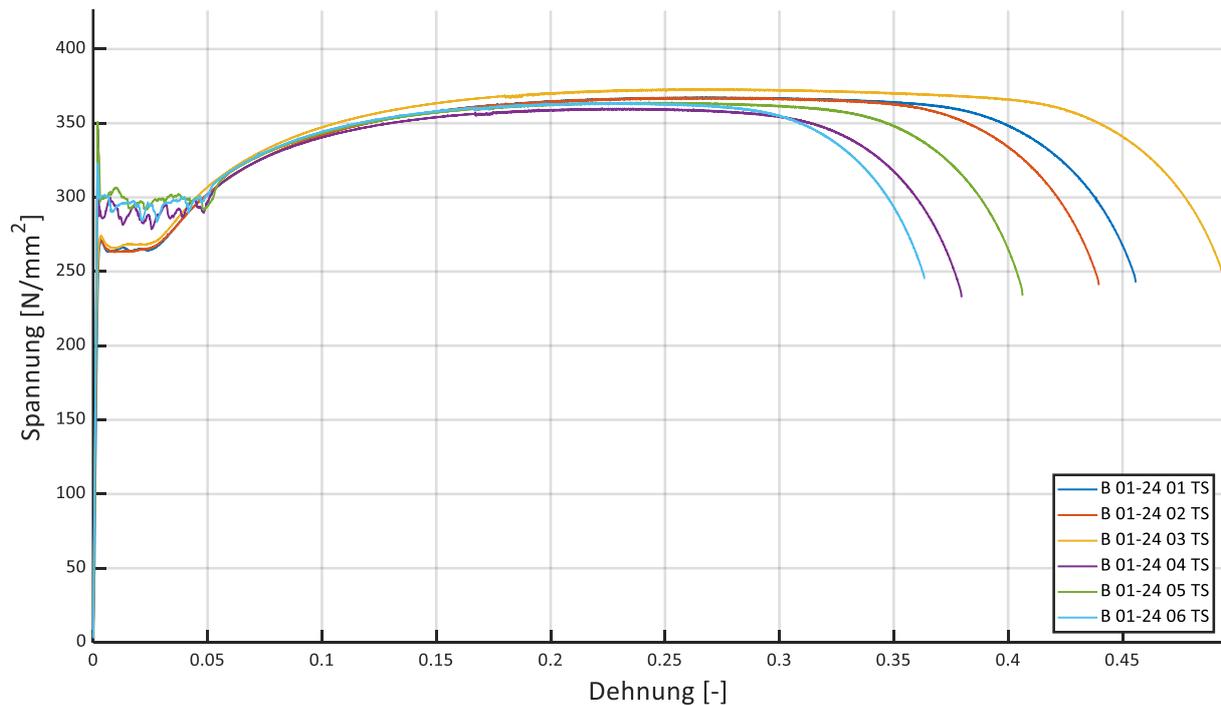


Abbildung 4-1: Spannungs-Dehnungs-Kurve von unverzinkten und verzinkten Proben aus Serie 1

Die weiteren Materialproben der Gitterroste aus Baustahl sehen analog zu den Proben aus Versuchsserie 1 aus und sind für alle relevanten Tragstabproben in Anhang A.3 dargestellt. Die Proben aus Aluminium und Edelstahl weisen jedoch einen Unterschied zu den Proben aus Baustahl auf, da diese keine ausgeprägte Streckgrenze mit Fließplateau besitzen. Wie in dem Diagramm in Abbildung 4-2 zu erkennen ist, geht die linear-elastische Steigung direkt in den plastischen Spannungsanstieg über, sodass kein Maximum zur Bestimmung der Fließspannung abgelesen werden kann. Stattdessen werden die Werte $R_{p0.1}$ und $R_{p0.2}$ ermittelt, welche den Spannungswerten bei 0,1 und 0,2 Prozent plastischer Dehnung entsprechen. Das bedeutet, dass die elastische Steigung des Materials, welche dem E-Modul entspricht, bei diesen Dehnungswerten auf der x-Achse angesetzt und der Schnittpunkt mit der Kurve ermittelt wird. Auch an dieser Stelle wird der höhere Wert für die Fließspannung herangezogen.

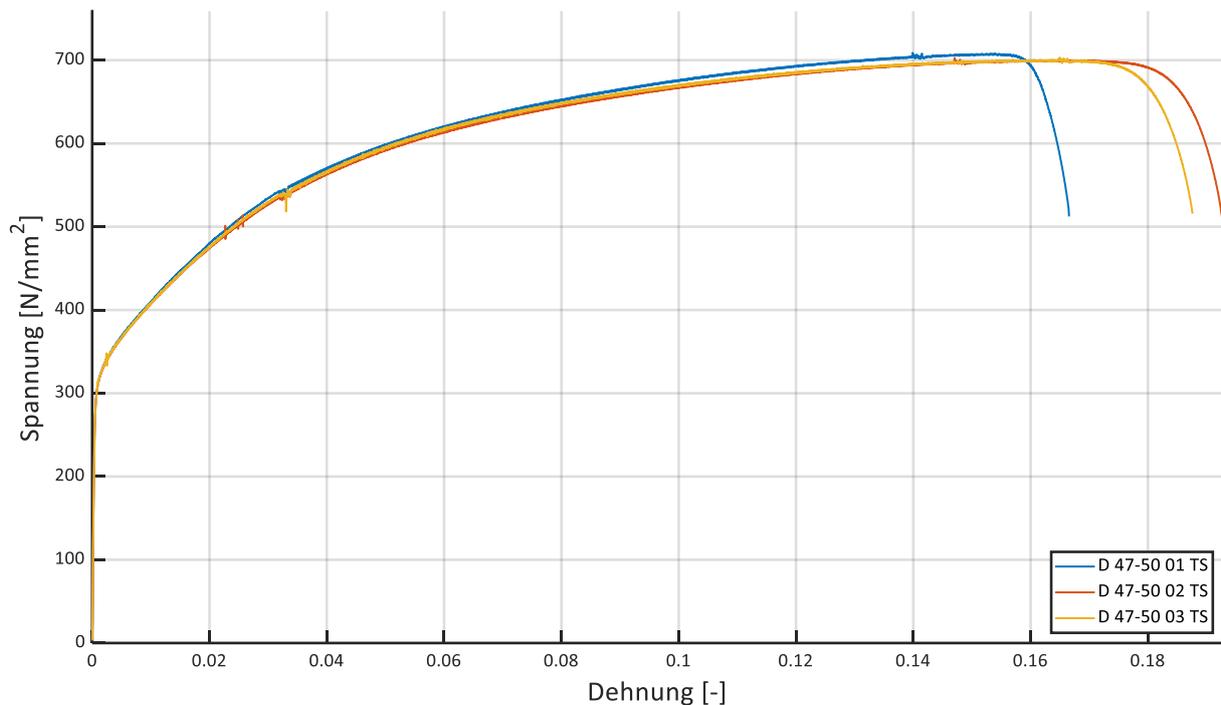


Abbildung 4-2: Spannungs-Dehnungs-Kurve von Materialproben aus Edelstahl

Wie auch bei den restlichen Materialproben der Tragstäbe ist eine gute Übereinstimmung der drei verschiedenen Spannungs-Dehnungs-Kurven aus demselben Probekörper zu erkennen. Die Fließspannungen unterscheiden sich mit Ausnahme von zwei Gruppen selbst bei den erhöhten Werten infolge der Feuerverzinkung nur um wenige Newton pro Quadratmillimeter. Die zwei niedrigeren Ausreißer bei den verzinkten Baustählen der Gruppen 55 bis 57 und 62 bis 64 werden nach näherer Betrachtung für die weitere Untersuchung vernachlässigt, da dort die zu erwartende Erhöhung der Fließgrenze fehlt. Diese Zusammenhänge sowie die Ergebnisse der Fließspannungen sind in dem Balkendiagramm in Abbildung 4-3 zu erkennen.

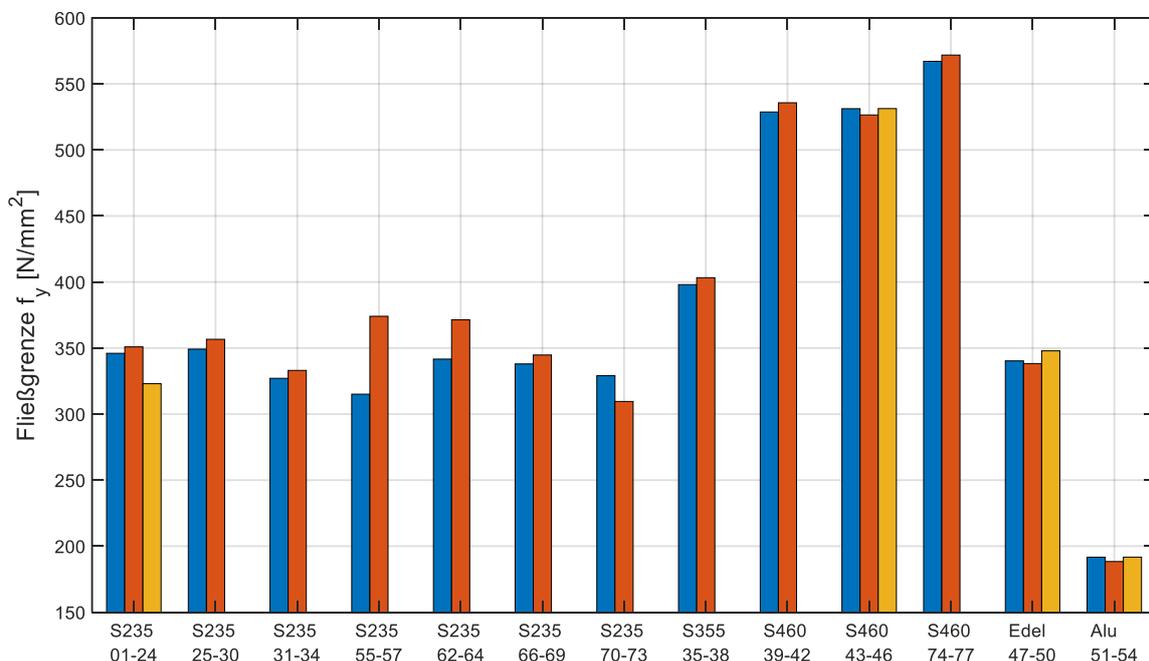


Abbildung 4-3: Gegenüberstellung der ermittelten Fließspannungen aller relevanten Zugproben

Der Elastizitätsmodul ist bei den Versuchen ebenfalls bestimmt worden und kann im linearen Bereich erneut durch eine Regression ermittelt werden. Die vorgenommene Durchführung der Versuche ist normativ allerdings zur Bestimmung der Spannungen und Dehnung geregelt, sodass die Ermittlung des E-Moduls nicht genau genug erfolgt. Da die errechneten Werte für diesen jedoch bei den meisten Versuchen um den nominellen Wert schwanken, werden diese vereinfachend in den weiteren Berechnungen angesetzt. Das bedeutet, dass der E-Modul für Baustahl zu 210.000 N/mm^2 , für Edelstahl zu 200.000 N/mm^2 und für Aluminium zu 70.000 N/mm^2 angenommen wird.

4.1.2 Querstabmaterialien

Die Ergebnisse der Zugproben zu den Querstäben weisen für die Fließgrenzen mit Ausnahme der Edelstahl- und Aluminiumproben eine wesentlich höhere Spannung auf als die zugehörigen Tragstabmaterialien. Die Werte liegen allesamt zwischen 600 und 700 N/mm^2 und weisen kein Fließplateau auf. Aufgrund der hohen aufnehmbaren Spannungen wird sich die Erhöhung durch die Feuerverzinkung bei den Querstäben nicht großartig auswirken, weshalb an dieser Stelle auf die Durchführung von verzinkten Materialproben verzichtet wird. Die Edelstahl- und Aluminiumproben besitzen dagegen für die Querstäbe ähnliche Fließspannungen wie die zugehörigen Tragstäbe. Alle Spannungs-Dehnungs-Kurven der durchgeführten Querstabmaterialproben sind in Anhang A.4 angefügt.

Anmerkung: Für die Schweißpressroste können aufgrund beschriebener geometrischer Begebenheiten keine Versuche für das Material durchgeführt werden. Daher werden für weitere Berechnungen die Materialien der Querstäbe von ähnlichen Pressrostabmessungen und -materialien für diese Konfigurationen angesetzt. Dasselbe gilt für die Pressroste der Gruppe 25 bis 30, bei denen keine Materialproben zu dem unverzinkten Stahl der Querstäbe mitgeliefert worden sind. Weiterhin sind für die Vollroste keine Materialproben speziell für die Querstäbe notwendig, da diese dasselbe Material besitzen wie die Tragstäbe.

4.1.3 Wahre Spannungen und Dehnungen

Für spätere FE-Simulationen werden die Spannungs-Dehnungs-Kurven und diverse Materialparameter in das entsprechende Programm eingepflegt und für die Berechnung genutzt. Neben den normativen Werten für den E-Modul, die Dichte und die Querkontraktion kann auch die plastische Verfestigung ab Erreichen der Fließgrenze in solche Berechnungen aufgenommen werden. Dies kann wegen der entstehenden Querschnittsverjüngung infolge der Querverformung bei zunehmender Dehnung allerdings nur mithilfe der wahren Spannungen und Dehnungen geschehen, die aus den technischen Spannungen und Dehnungen berechnet werden. Die Formeln und Zusammenhänge dazu sind in Kapitel 2.7 näher erläutert.

Zur effizienteren Berechnung der benötigten wahren Spannungen und Dehnungen werden die gemessenen Werte je Materialprobe in eine vorher angefertigte *Excel*-Tabelle mit bereits angelegten Zellenbezügen geladen, sodass diese direkt ausgewertet werden. Eine gemessene,

sogenannte technische, Spannungs-Dehnungs-Kurve sowie die zugehörige wahre Spannungs-Dehnungs-Kurve ist in Abbildung 4-4 dargestellt. Umso geringer die Dehnungen sind, desto näher liegen die Kurven aneinander, weshalb die wahre Spannung erst ab dem Ende des Fließplateaus relevant und in dem Graphen angezeigt wird.

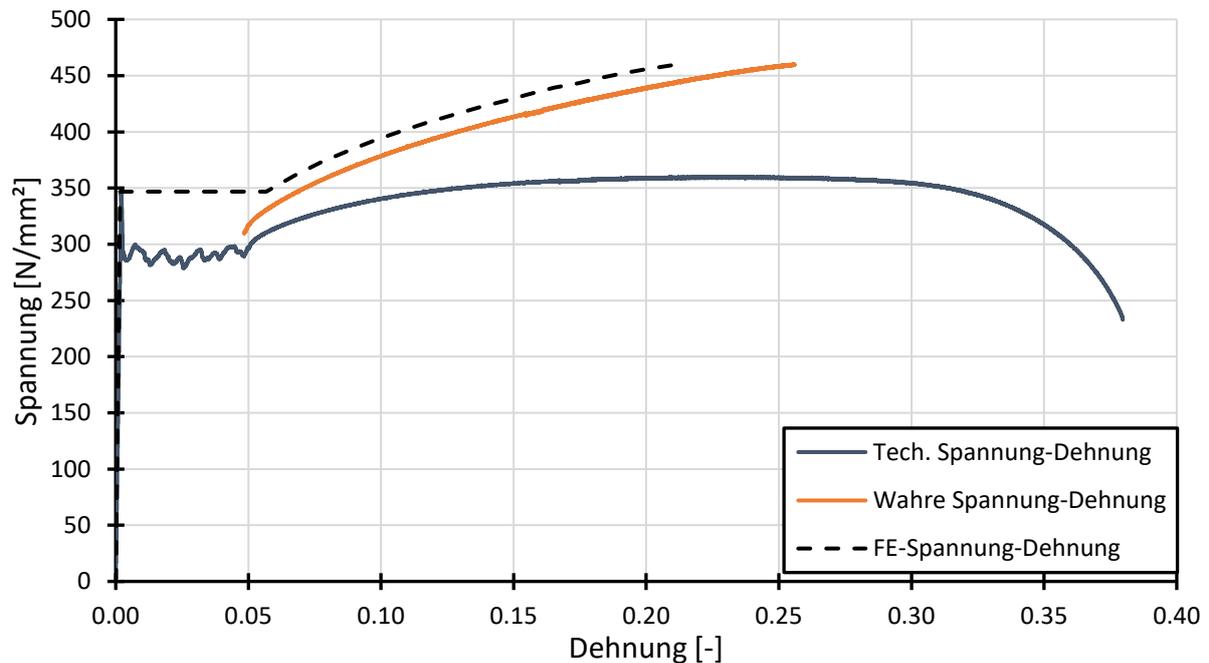


Abbildung 4-4: Gegenüberstellung der verschiedenen Spannungs-Dehnungs-Kurven

Für die FE-Simulation ist es zudem wichtig, dass das Materialmodell mit maximal 20 Datenpunkten angegeben werden kann und der E-Modul mit der Steigung der ersten zwei Datenpunkte, dem Nullpunkt und dem Punkt für die Fließspannung, übereinstimmt. Dazu werden die zwei genannten plus 18 weitere Datenpunkte im gleichen Abstand aus den vorhandenen Daten gefiltert und die Dehnungen mithilfe der vorhandenen Steigung im linearen Bereich auf den nominell angenommenen E-Modul umgerechnet. Des Weiteren darf in dem Verlauf der Datenpunkte keine negative Steigung auftreten, wodurch die Spannungen nicht bis zur Bruchdehnung berücksichtigt werden können und das Fließplateau auf Höhe der vorhandenen Fließspannung liegen muss. Der nächste, dritte Datenpunkt ist deshalb mit einer etwas höheren Spannung anzupeilen, sodass eine geringe positive Steigung in dem Fließplateau für die FE-Simulation besteht. Die resultierende Kurve ist in dem Graphen gestrichelt dargestellt.

4.2 Gitterroststreifen

Die nächste Versuchskategorie ist der Referenzversuch, an dem das Verhalten der Tragstäbe unter Gleichlast ohne Ausnutzung der Querverteilung durch die Querstäbe untersucht wird. Die Versuchsdaten der insgesamt 72 durchgeführten Streifenversuche zu den unterschiedlichen Gruppen an Gitterrostkonfigurationen werden dazu separat betrachtet und ausgewertet. Die wichtigsten Größen bei der Auswertung der Ergebnisse stellen die effektiv wirkende Biegesteifigkeit und die daraus ebenfalls resultierende effektive Querschnittshöhe dar, welche

aus den Randbedingungen des statischen Systems und den Kraft- zu Wegergebnissen ermittelt werden können. Was diese Größen für eine Bedeutung haben und wie groß diese im Vergleich zu der nominellen oder vorhandenen Biegesteifigkeit beziehungsweise Querschnittshöhe sind, wird im Folgenden näher gezeigt.

4.2.1 Effektive Biegesteifigkeiten

Vor der Berechnung einer effektiven Querschnittsgröße ist es zunächst sinnvoll, den Unterschied zwischen den drei verschiedenen, definierten Querschnittswerten zu erläutern. Die erste grundlegende Größe stellt die nominelle Abmessung dar, welche mit dem Hersteller vereinbart wird und im Endprodukt mit gewisser Toleranzabweichung vorhanden sein muss. Diese Werte sind in den Versuchsmatrizen in Kapitel 3.1 für die getesteten Probekörper angegeben.

Die zweite Querschnittsgröße ist die im Endprodukt vorhandene Abmessung, die vor der jeweiligen Versuchsdurchführung stichprobenartig aufgenommen wird und für weitere Berechnungen an den Versuchsergebnissen eines Probekörpers die Grundlage darstellt. Hierbei wird zusätzlich zwischen den verzinkten und den unverzinkten Abmessungen unterschieden, indem von den gemessenen verzinkten Querschnittsgrößen eine gemessene Schichtdicke der Verzinkung abgezogen wird. Die vorhandenen Stababmessungen der Streifenprobekörper sind in Anhang A.1 tabellarisch aufgeführt.

Aus den Berechnungen zu den Versuchsergebnissen resultiert schließlich die dritte Querschnittsgröße, die Schwächungen entlang eines Stabes für die Ermittlung der Durchbiegungen und Traglasten berücksichtigt. Diese Schwächungen kommen insbesondere bei den Pressrosen durch die Schlitzung der Tragstäbe zur Einlassung der Querstäbe zustande. Je nach Grad der Verpressung und Kontaktstellen in diesen Schlitzungen zwischen querverlaufendem Querstab und dem Tragstab kann mehr oder weniger Querschnittshöhe an dieser Stelle aktiviert werden. Durch die Ermittlung einer effektiven Biegesteifigkeit kann diese Reduzierung verschmiert über die Länge des Stabes berücksichtigt werden. Eine visuelle Darstellung der unterschiedlichen Querschnittshöhen wird in Kapitel 4.2.2 in der Abbildung 4-11 gegeben.

Die Bestimmung der effektiven Querschnittsgrößen erfolgt über eine Formel für die Durchbiegung in Abhängigkeit der vorhandenen Kraft und der Biegesteifigkeit sowie der systemabhängigen Abmessungen. Diese kann entweder über den Arbeitssatz hergeleitet oder aus Tabellenwerken wie den Schneider Bautabellen [19] abgelesen werden. Für den symmetrischen Vierpunktbiegebalken ergibt sich die Formel für die Durchbiegung in Balkenmitte infolge zweier gleich großer Einzellasten, die in Summe die Gesamtlast F ergeben, zu Gleichung (4.1). Darin wird der Einfluss von den Schubverzerrungen nicht berücksichtigt, da die Stützweite des Balkens im Vergleich zur Querschnittshöhe der Tragstäbe sehr viel größer ist und somit hauptsächlich der reine Biegeanteil die Gesamtdurchbiegung erzeugt [20]. Die zusätzliche Durchbiegung durch die Querkraft ist daher vernachlässigbar klein. Das statische System des Versuchs mit den wichtigsten Abmessungen für die Formel ist in Abbildung 4-5 dargestellt.

$$w = \frac{3 - 4 \cdot \alpha^2}{48 \cdot EI} \cdot \alpha \cdot F \cdot L^3 \quad (4.1)$$

$$\text{mit: } \alpha = \frac{L - a}{2 \cdot L}$$

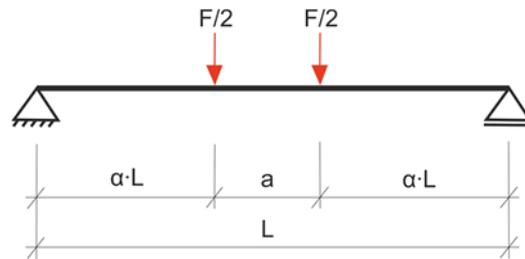


Abbildung 4-5: Statisches System der Gitterroststreifen mit Abmessungen und Belastung

Für die Ermittlung der effektiven Biegesteifigkeit aus den Versuchsergebnissen wird die Gleichung (4.1) nach dieser Größe entsprechend umgestellt. Anstelle von bestimmten Werten für die aufgebrachte Kraft und die in Feldmitte gemessene Durchbiegung werden die Differenzen zwischen den Datenpunkten berechnet und für den linear-elastischen Bereich in den Wertetabellen gemittelt. Der resultierende Wert wird mit dem Parameter m gekennzeichnet und stellt die Steigung von der Kraft-Weg-Kurve im elastischen Bereich dar, wie sie in Abbildung 4-6 eingezeichnet ist. Die folgende Gleichung (4.2) zeigt die finale Formel zur Berechnung der effektiven Biegesteifigkeit eines Gitterroststreifenversuches.

$$EI_{\text{Streifen,eff}} = \frac{3 - 4 \cdot \alpha^2}{48} \cdot \alpha \cdot \frac{\Delta F}{\Delta w} \cdot L^3 = \frac{3 - 4 \cdot \alpha^2}{48} \cdot \alpha \cdot m \cdot L^3 \quad (4.2)$$

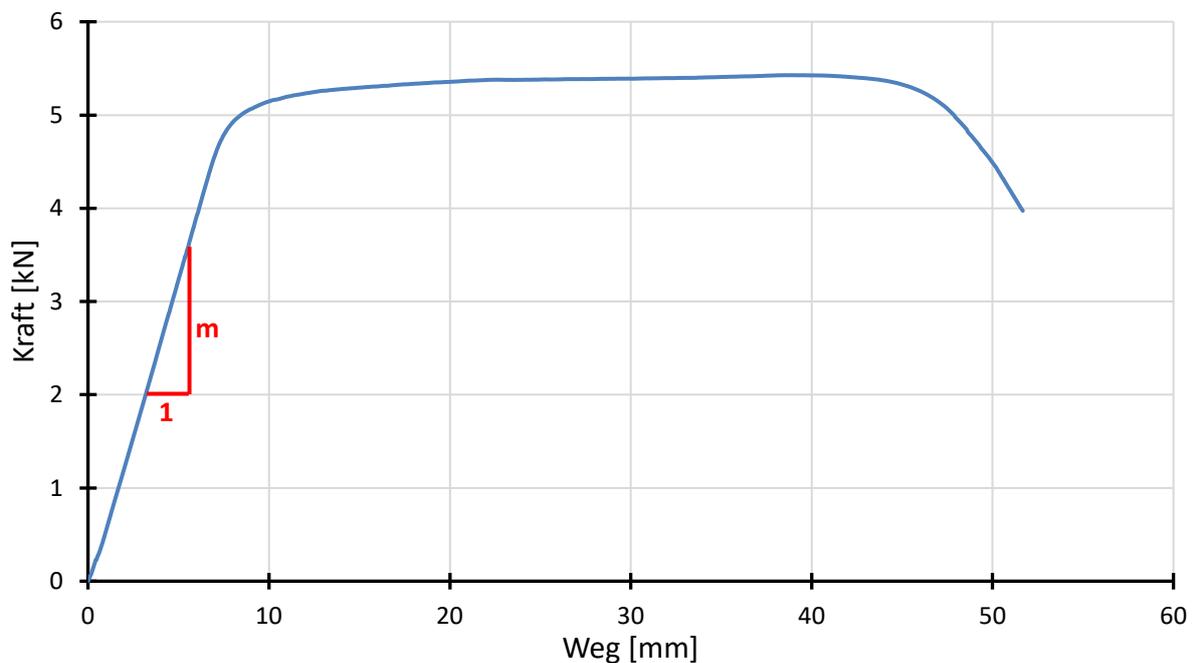


Abbildung 4-6: Traglastkurve eines Gitterroststreifens mit Steigung m im elastischen Bereich

Der Elastizitätsmodul kann unter Zuhilfenahme des nominellen Werts aus der effektiven Biegesteifigkeit herausgerechnet werden, sodass eine rein geometrische Größe in Form des effektiven Flächenträgheitsmoments der Tragstäbe übrig bleibt. Diese werden mit den nominellen und den vorhandenen Querschnittsabmessungen in Tabelle 4-1 verglichen, indem eine Umrechnung zu den Flächenträgheitsmomenten für Rechteckquerschnitte vorgenommen wird. Der Vergleich zwischen den effektiven und den nominellen Werten ist in der RAL-GZ [1] mit dem Abminderungsfaktor ν berücksichtigt, der für Pressroste und Vollroste 0,9 und für die Schweißpressroste 1,0 beträgt. Dagegen bezieht sich der Vergleich zwischen den effektiven und vorhandenen Flächenträgheitsmomenten auf die im Versuch vorherrschenden Gegebenheiten. Dazu wird mit den unverzinkten Werten der vorhandenen Abmessungen gerechnet, da für gewöhnlich die Zinkschicht nicht zur Tragfähigkeit und Biegesteifigkeit der Gitterroste beiträgt.

Tabelle 4-1: Vergleich der nominellen, vorhandenen und effektiven Flächenträgheitsmomente

Nr	Typ	Material		TS	QS	$I_{\text{eff}}/I_{\text{nom}}$	$I_{\text{eff}}/I_{\text{vorh}}$
1-24	Pressrost	S235	verzinkt	30x2	9x1,5	0,781-0,825	0,913-0,97
25-30		S235	verzinkt	30x2	15x2	0,772-0,785	0,913-0,929
31-34		S235	verzinkt	70x5	14x3	0,729-0,867	0,781-0,929
35-38		S355	verzinkt	30x2	9x1,5	0,801-0,833	0,919-0,956
39-42		S460	verzinkt	40x2	9x1,5	0,865-0,906	0,993-1,040
43-46		S460	unverzinkt	40x2	9x1,5	0,681-0,776	0,782-0,891
47-50		Edelstahl	-	30x2	9x2	0,417-0,719	0,437-0,753
51-54		Aluminium	-	30x2	9x2	0,290-0,625	0,344-0,740
55-57	Vollrost	S235	verzinkt	30x2	30x2	0,790-0,847	0,879-0,942
62-64	Schweißpressrost	S235	verzinkt	30x2	3,46	0,821	0,971
66-69		S235	verzinkt	60x5	4,03	0,836-0,837	0,895-0,896
70-73		S235	unverzinkt	40x2	3,46	0,870	0,987
74-77		S460	unverzinkt	40x2	3,46	0,798	0,938

Wie anhand der letzten beiden Spalten erkennbar ist, sind die nominellen Querschnittsgrößen allesamt größer als die vorhandenen, gemessenen Werte der Tragstäbe. Dies liegt laut der Hersteller daran, dass die Maschinen inzwischen so genau produzieren können, dass die Toleranzen entsprechend zum unteren Grenzwert hin ausgenutzt werden. Der Vergleich zwischen den vorhandenen und effektiven Biegesteifigkeiten ist jedoch für weitere Berechnungen sinnvoller, da die nominellen Querschnittswerte auf die Versuche keinen direkten Einfluss haben. Daher sind in der letzten Spalte die Werte mit drei unterschiedlichen Farben hinterlegt, grün für eine gute Übereinstimmung mit dem Abminderungsbeiwert für den Gitterrosttyp, gelb für eine mäßige und rot für eine schlechte Übereinstimmung.

Es sei an dieser Stelle jedoch angemerkt, dass der Abminderungsfaktor zur Widerstandsrechnung eines Gitterrostes auf die nominelle Größe bezogen und aufgrund der Toleranzausnutzung nicht annähernd eingehalten wird. Mit nur einem Millimeter Einsparung für die Höhe wird das Flächenträgheitsmoment und das Widerstandsmoment sehr viel geringer, da die

Querschnittshöhe in diese mit dem Exponenten drei beziehungsweise zwei eingeht und eine Verringerung dieser Höhe somit einen signifikanten Einfluss auf den gesamten Widerstand hat. Diese Tatsache sollte in weiteren Überlegungen zu den statischen Berechnungen berücksichtigt werden.

Auffällig ist bei der Betrachtung der Verhältniswerte, dass insbesondere die unverzinkten Pressroste aus Baustahl, Edelstahl und Aluminium eine niedrige effektive Biegesteifigkeit im Vergleich zur rechnerisch vorhandenen haben. Je größer der Anteil der Querstäbe beziehungsweise umso geringer die Maschenweite ist, desto geringer ist die Tragfähigkeit und die Steigung im linear elastischen Bereich. Der geringere, angegebene Grenzwert stellt damit den Streifenversuch mit der geringsten Maschenteilung und der obere Grenzwert meist den Versuch mit der höchsten Maschenteilung dar. Zu sehen ist dieser Zusammenhang für die drei Gruppen von Streifenversuchen in Abbildung 4-7.

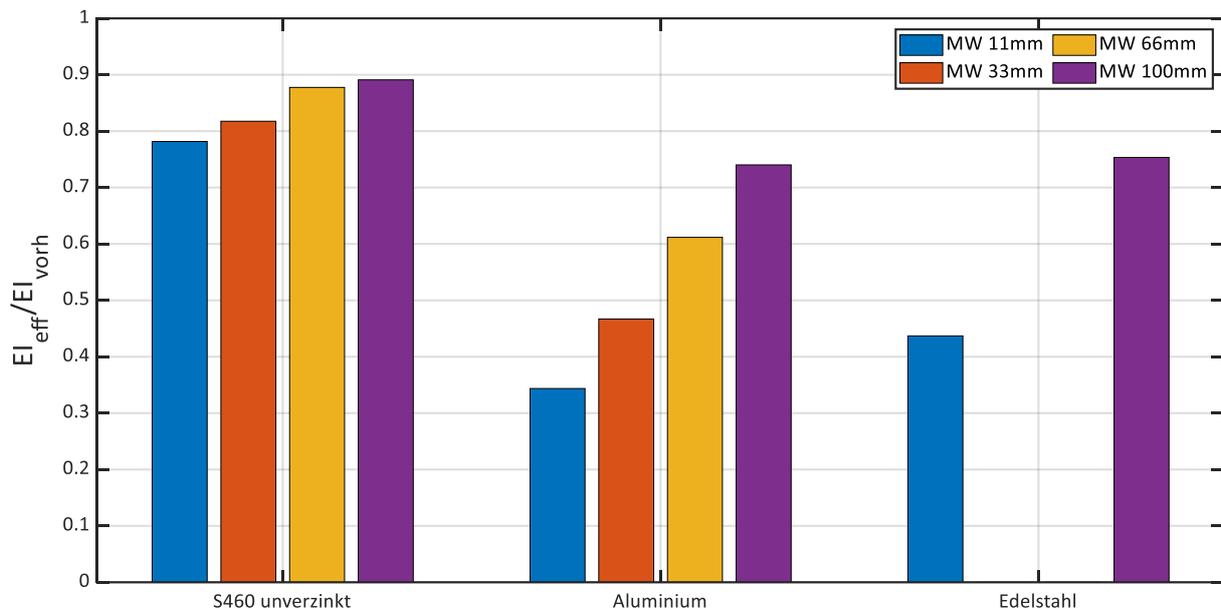


Abbildung 4-7: Verhältnis von effektiver zu vorhandener Biegesteifigkeit

Die übrigen Pressroste aus verzinktem Baustahl liegen dagegen größtenteils weit über dem Wert von 0,9 und stimmen mit dem bisherigen Abminderungsfaktor ν überein. Ausnahmen bilden dabei lediglich der Gitterroststreifen mit 70mm Tragstabhöhe und einer 11mm Maschenweite sowie der Probekörper mit der geringsten Maschenteilung bei den Vollrosten.

Bei den Schweißpressrosten setzt die RAL-GZ [1] durch den Abminderungsfaktor $\nu = 1,0$ die vollen Querschnittswerte an, weshalb die Ergebnisse wider Erwarten bei allen Probekörpern dieses Gitterrosttyps geringere effektive als vorhandene Flächenträgheitsmomente ergeben.

Als Fazit lässt sich daraus schließen, dass die verpressten Schlitz in den Tragstäben einen wesentlichen Einfluss auf die effektiven Querschnittswerte dieser haben. Je größer der Anteil an Schlitz und die fehlende Fläche je Schlitzung ist, desto größer scheint der Einfluss auf die Biegesteifigkeit zu sein. Daher sind besonders die Vollroste, bei denen ein Schlitz die halbe Tragstabhöhe beträgt, und Streifenversuch 33, der besonders breite und viele Schlitz besitzt,

stark davon betroffen. Auch die Gruppe 25 bis 30 besitzt sehr hohe Querstäbe und befindet sich mit den Verhältnissen deshalb an der Untergrenze zu dem Verhältniswert von 0,9. Analog scheint auch die Verschweißung der Querstäbe an die Tragstäbe bei den Schweißpressrosten einen nicht unerheblichen Einfluss zu haben. Eventuell ergeben die Schweißpunkte zusammen mit dem Eindrücken der Querstäbe eine Diskontinuität im Spannungsverlauf, welche ebenfalls in eine Reduzierung der effektiv wirksamen Querschnittsfläche des Tragstabes resultiert.

Einen weiteren starken Einfluss scheint zusätzlich die Feuerverzinkung bei Pressrosten zu haben. Obwohl sie für gewöhnlich als Oberfläche keinen Beitrag zur Tragfähigkeit leistet, fließt sie bei dem Produktionsvorgang in die übrigen Lücken zwischen Querstab und Schlitzwandung des Tragstabs und kann daher vermutlich die Kräfte besser übertragen. Die unverzinkten Gitterroste aus Baustahl, Edelstahl und Aluminium besitzen diese zusätzliche Kraftübertragung nicht und büßen dadurch einen wesentlichen Teil nutzbarer Querschnittsabmessung ein. Diese Erkenntnis ist auch sehr gut anhand der Probekörper in Abbildung 4-8 zu erkennen, da hier die Lücken zu erkennen sind. Insbesondere die Gitterroststreifen aus Aluminium besitzen S-förmige Schlitz mit wenig Kontaktfläche und einer zusätzlichen Fehlfläche unterhalb des Querstabs, wodurch diese auch die geringste Biegesteifigkeit bei dem Vergleich in Abbildung 4-7 aufweisen.



Abbildung 4-8: Schlitzungen der Gitterroste aus unverzinktem Baustahl, Edelstahl und Aluminium

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird eine erste FE-Untersuchung mit der Software *Abaqus* [21] an den Aluminiumgitterrosten zu dem Einfluss der Schlitzungen durchgeführt, indem diese als vollständige Fehlflächen entlang der Stabachse modelliert werden. Interessant ist bei einer aufgebrachtten Kraft die vorhandene Durchbiegung zur Berechnung der effektiven Biegesteifigkeit sowie der Spannungsverlauf über die Querschnittshöhe, der mithilfe von Spannungstrajektorien angezeigt werden kann. Für die vier unterschiedlichen Maschenweiten ergeben sich die Druck- und Zugspannungstrajektorien in Abbildung 4-9.

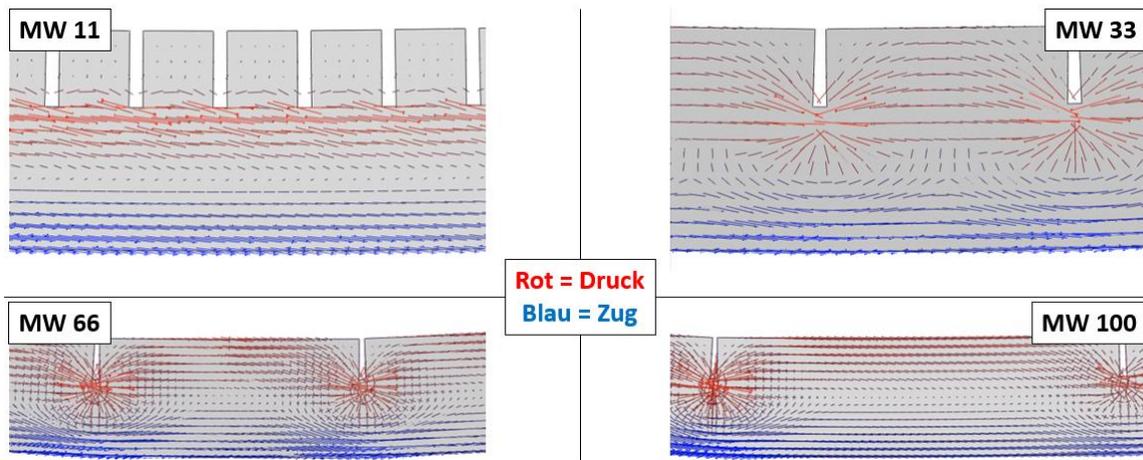


Abbildung 4-9: Spannungstrajektorien für einen geschlitzten Tragstab aus Aluminium

Die Dichte der oben liegenden Druckspannungstrajektorien zeigt eindeutig, dass bei niedriger Maschenteilung kaum bis keine Spannungen bis zur Oberkante gelangen, da diese um die Unterkante der Schlitzungen geleitet werden müssen. Der Abstand bis zur nächsten Schlitzung ist zu kurz, um den dazwischenliegenden Querschnitt auf der vollen Höhe auszunutzen und kann daher nicht für die Traglast angesetzt werden. Dagegen ist die Spannungsverteilung zwischen den Schlitzungen bei den größeren Maschenteilungen wieder nahezu linear und ungestört. Lediglich in einem bestimmten Bereich um die Schlitzte herum werden die Spannungen umgelenkt und gehen anschließend auf kürzestem Weg wieder in den Ausgangszustand zurück. Somit ergibt sich eine effektive Querschnittsfläche, die abhängig von dem Anteil der Schlitzungen und dem Grad der Kontaktflächen innerhalb des Schlitzes ist. Da die Aluminiumgitterroste sehr wenig Kontaktstellen besitzen, sind die Biegesteifigkeiten und effektiven Querschnittsflächen annähernd gleich zu den Zuständen der gezeigten, geschlitzten Querschnitte. Ein Vergleich der Biegesteifigkeiten aus den Versuchen der Aluminiumgitterroste und der FE-Berechnung ist in Abbildung 4-10 gezeigt. Auf der rechten Seite der Abbildung ist ebenfalls die zunehmende Durchbiegung bei höherem Grad an Fehlstellen zu erkennen, was auf eine abnehmende Biegesteifigkeit zurückzuführen ist.

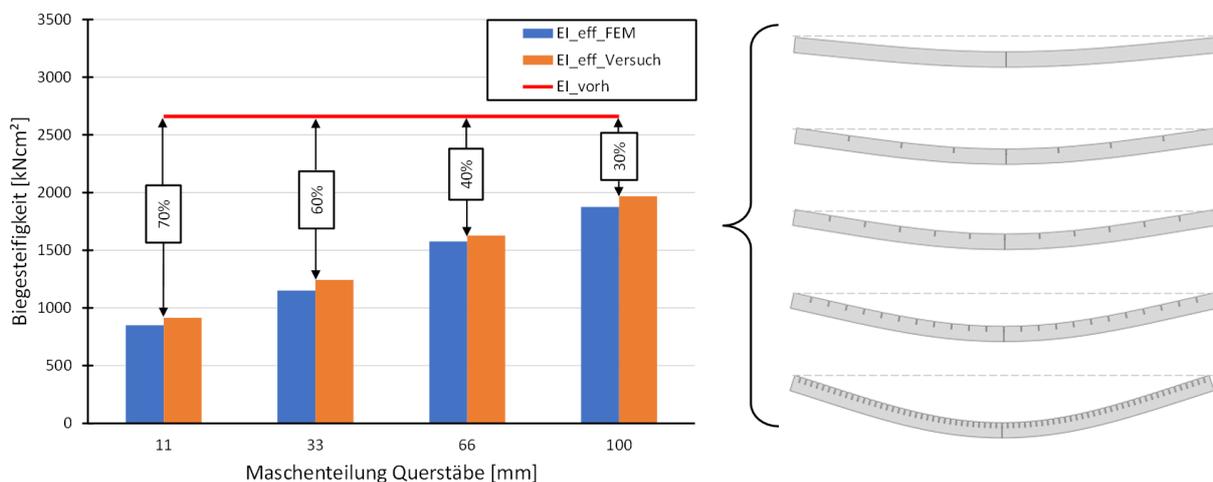


Abbildung 4-10: Vergleich der Versuchs- und FE-Berechnungen für Aluminiumtragstäbe

Dagegen weisen die Edelstahl- und unverzinkten Baustahltragstäbe der Pressroste eine wesentlich höhere Biegesteifigkeit in den Versuchen auf im Vergleich zu den vollständig geschlitzten FE-Stäben. Dennoch sind diese auch weit von der nicht geschlitzten Variante mit der vorhandenen Biegesteifigkeit entfernt. Erst durch die Feuerverzinkung erlangen die Pressroste, wie bereits in Tabelle 4-1 gezeigt, eine nahezu volle Biegesteifigkeit und erfahren daher kaum Traglastverlust infolge der Schlitzung.

Wie durch den Verlauf der Spannungstrajektorien gezeigt wird, ist nur ein Teil der gesamten, verfügbaren Querschnittshöhe an der Aufnahme der Spannungen und somit an der Tragfähigkeit des Stabes beteiligt. Diese Höhe kann aus der ermittelten effektiven Biegesteifigkeit für alle Streifenversuche berechnet und weiter interpretiert werden.

4.2.2 Effektive Querschnittshöhe

Unter der vereinfachten Annahme, dass die zuvor berechneten effektiven Biegesteifigkeiten und Flächenträgheitsmomente über die Tragstablänge verschmierte Größen infolge der Schlitzungen sind, lässt sich anhand der Formel für einen rechteckigen Querschnitt hieraus die effektive Querschnittshöhe berechnen. Dazu wird die Formel für das Flächenträgheitsmoment zu der gesuchten Größe in Gleichung (4.3) umgestellt.

$$h_{TS,eff} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot I_{eff}}{b_{TS}}} \quad (4.3)$$

Die Verhältnisse der effektiven Querschnittshöhe zu der vorhandenen und nominellen Höhe nähern sich im Vergleich zur Biegesteifigkeit beziehungsweise dem Flächenträgheitsmoment durch die dritte Wurzel etwas an den Wert eins an. Mit der Querschnittshöhe lässt sich der Einfluss besser visualisieren, da die effektive Höhe in jedem Fall zwischen der vorhandenen und der minimal möglichen Höhe liegt. Die letztere ergibt sich aus der vorhandenen Querschnittshöhe des Tragstabes abzüglich der Querstabhöhe und spiegelt den vollständig ungestörten Querschnitt über die gesamte Stablänge wider, wie es in Abbildung 4-11 deutlich wird.

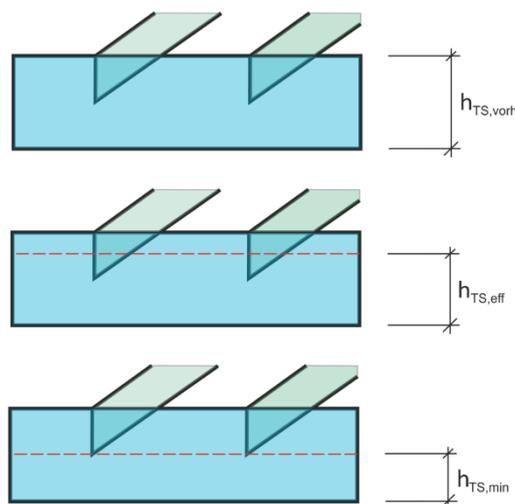


Abbildung 4-11: Visualisierung der unterschiedlichen Querschnittshöhen

Bei allen Gitterrosten mit gut verpressten Kreuzungspunkten infolge Verzinkung oder Verschweißung liegt die effektive Höhe, wie bereits bei den Biegesteifigkeiten gezeigt, nahe an der vorhandenen Größe und besitzt daher einen guten Widerstand. Nur die drei problematischeren Gruppen aus unverzinktem Baustahl, Edelstahl und Aluminium weisen bei zunehmender Querstabdicke eine wesentlich geringere effektive Höhe auf und nähern sich somit der minimal nutzbaren Querschnittshöhe über die Stablänge an. Insbesondere die Tragstäbe der Aluminiumprobekörper, die sich fast wie vollständig geschlitzte Querschnitte verhalten, besitzen für die kleinste Maschenweite eine sehr geringe statisch nutzbare Querschnittshöhe, da die Spannung von dem Querschnitt zwischen den Schlitzungen kaum mehr aufgenommen wird. Ein passender Vergleich zwischen den unterschiedlichen Querschnitten und deren Tragfähigkeit stellen die elastischen Bereiche der Versuchskurven von den Gitterroststreifen aus Aluminium in Abbildung 4-12 dar. Gut zu erkennen ist die Reduzierung der Steigung bei zunehmender Querstabanzahl und die gute Übereinstimmung zweier identischer Probekörper. Zum Vergleich sind ebenfalls die nominelle, vorhandene und minimale Querschnittshöhe angegeben und die damit verbundenen Kraft-Weg-Linien in dem Graphen dargestellt.

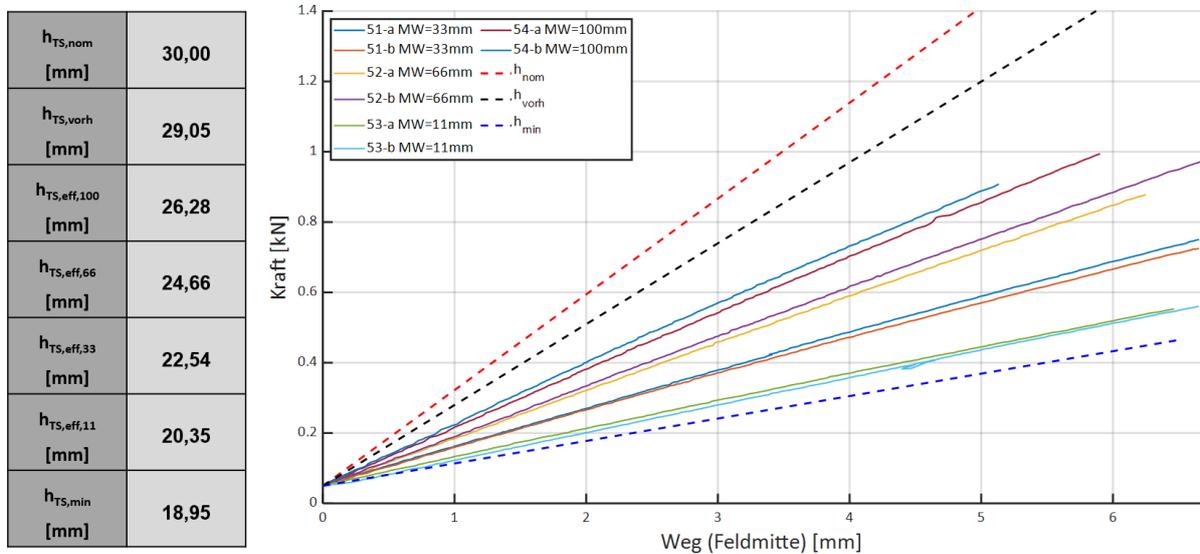


Abbildung 4-12: Effektive Tragstabhöhen der Aluminium-Probekörper und graphischer Vergleich

Wie zu erwarten, liegen die effektiven Querschnittshöhen und die Steigungen der Probekörper zwischen der vorhandenen und der minimalen Querschnittshöhe und orientieren sich aufgrund der geringen Kraftübertragung in den Schlitzungen mehr in Richtung der minimalen Tragfähigkeit.

Die Abstufung der Steigungen und effektiven Höhen für unterschiedlich große Maschenweiten ist auch bei allen Gitterrosten mit Verzinkung zu erkennen, jedoch nicht so deutlich wie bei den Aluminium-, Edelstahl- und unverzinkten Baustahlgitterrosten. Die elastischen Steigungen und effektiven Höhen liegen dort knapp unterhalb von der vorhandenen Höhe und können daher nahezu den gesamten Querschnitt zur Tragfähigkeit aktivieren. Der Vergleich für alle restlichen Gitterroststreifenversuche ist in Anhang A.1 tabellarisch und in Anhang A.5 graphisch angefügt.

4.3 Gitterrostplatten

Die Traglastversuche an den Gitterrostplatten stellen die Hauptkategorie an Experimenten dar und sind die Grundlage, um das Tragverhalten der Gitterroste untersuchen zu können. Deshalb ist in diesen Versuchen nicht nur der linear elastische Bereich zur Ermittlung einer äquivalenten Biegesteifigkeit analog zu den Streifenversuchen wichtig, sondern auch die maximale Traglast und der mögliche Versagensfall des jeweiligen Gitterrostes.

4.3.1 Traglastkurven

Aus den gemessenen Daten für alle Gitterrostplattenversuche lassen sich die Kraft-Weg-Kurven graphisch darstellen, wie sie in Abbildung 4-13 für den ersten Probekörper exemplarisch zu sehen ist. Die Kolbenkraft- und Kolbenwegmessungen sind erfahrungsgemäß sehr ungenau für eine präzise Datenerfassung, weshalb die in Kapitel 3.4.1 beschriebenen zusätzlichen Komponenten zur Auswertung herangezogen werden. Dazu wird die wirkende Gesamtkraft aus der Addition der vier Kraftmessdosen errechnet und der Weg sowohl unter der Würfelmitte als auch unter dem Würfelrand beziehungsweise dem Plattenrand mithilfe von zwei Seilzügen aufgenommen und ausgewertet.

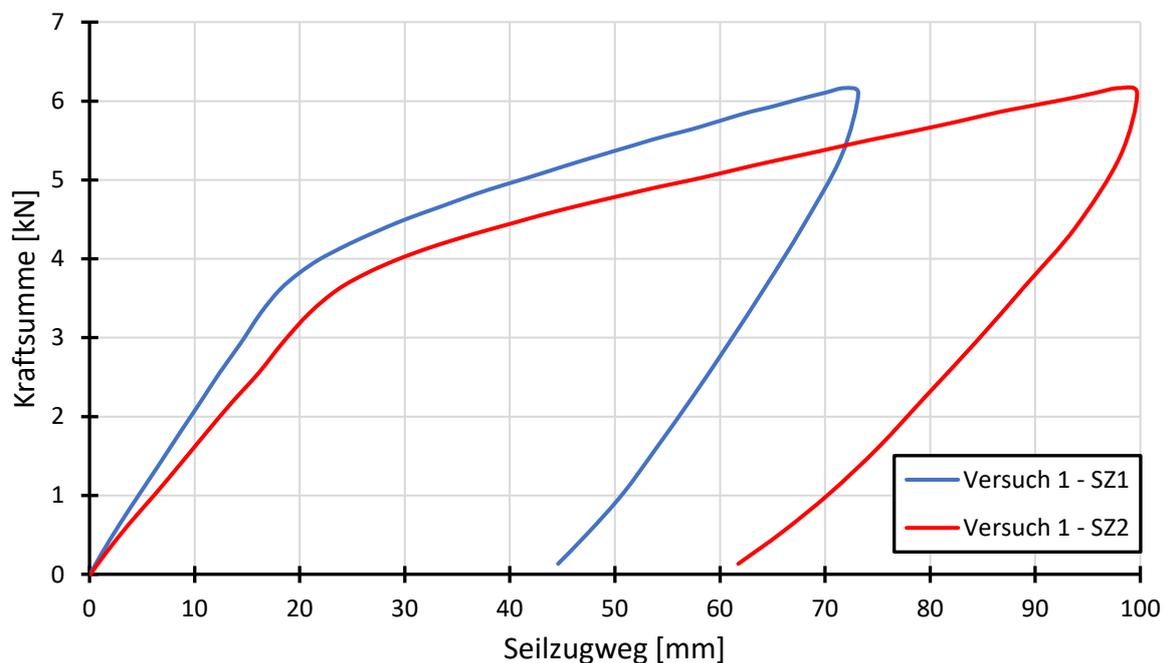


Abbildung 4-13: Kraft-Weg-Diagramm für Probekörper 1 der Gitterrostplatten

Die Eigenschaften der gezeigten Kraft-Weg-Kurven finden sich in nahezu allen durchgeführten Gitterrostplattenversuchen wieder. Zunächst werden alle belasteten Tragstäbe elastisch beansprucht und ergeben eine konstante Biegesteifigkeit, die für den linearen Anstieg im anfänglichen Bereich sorgt. Erst wenn der erste Tragstab die Fließgrenze erreicht, nimmt die Steigung ab, sodass die Verformungen der Tragstäbe mit weniger anwachsender Kraft stark zunehmen. Bei einer hohen Verformung werden die Versuche schließlich zurückgefahren, um

das Abrutschen des Lastwürfels von dem Probekörper zu verhindern. Die nach Entlastung vorherrschende Verformung stellt die bleibende, plastische Verformung der Tragstäbe durch das Überschreiten der elastischen Kapazitäten dar.

Anhand der Verformungsfigur lässt sich erkennen, dass meist der äußerste Tragstab unter dem Lastwürfelrand die höchste Durchbiegung erfährt. Mit jedem Tragstab in Richtung der Plattenmitte nimmt die Durchbiegung ab, bis die Tragstäbe in ihrer Nulllage bleiben oder sogar etwas Abheben aufgrund des globalen Kippens der Plattenebene. Die Verformung unter Belastung eines Probekörpers ist beispielhaft in Abbildung 4-14 gezeigt.

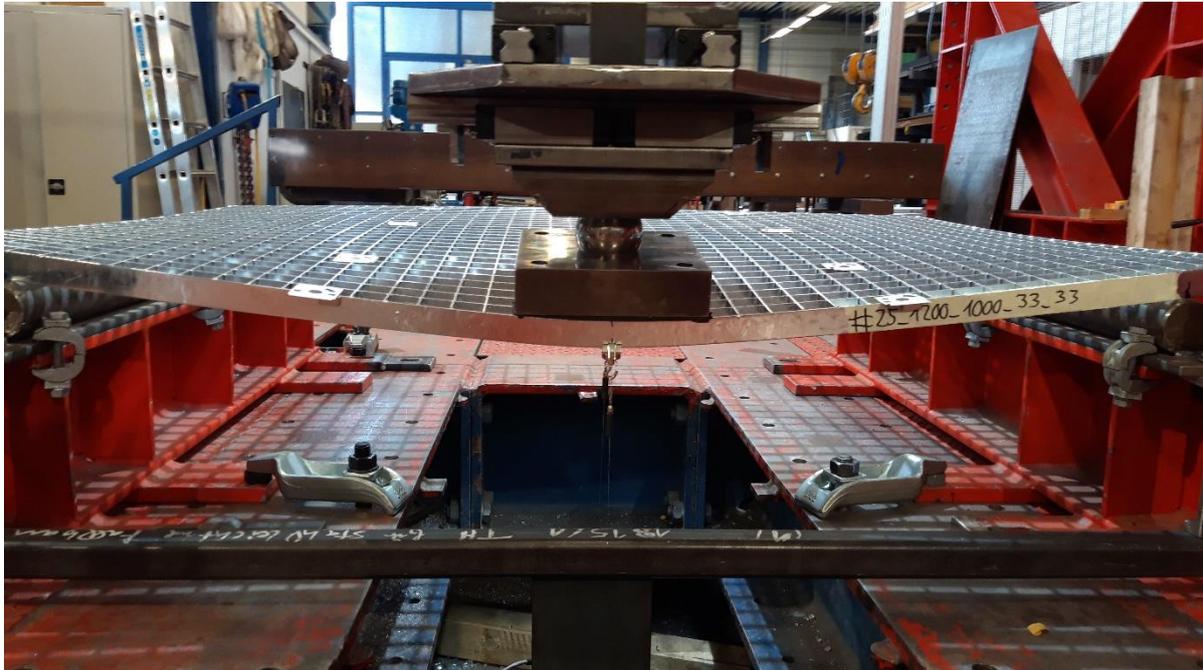


Abbildung 4-14: Verformung des Probekörpers 25 während der Versuchsdurchführung

Dabei ist zu beobachten, dass bei größeren Querstababmessungen die Querverteilung höher ist, sodass mehr Tragstäbe an dem Lastabtrag beteiligt und durchgebogen werden. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass kleine Abmessungen, wie sie bei Querstäben des Typs Schweißpressrost vorherrschen, zu einer geringen oder sogar keinen Querverteilung führen und lediglich die Tragstäbe unter dem Lastwürfel am Lastabtrag mitwirken. In diesem Fall sind die Durchbiegungen der Tragstäbe auch nicht großartig unterschiedlich, sondern werden nahezu gleichmäßig nach unten gedrückt.

Neben des Abbruchkriteriums infolge sehr hoher Durchbiegungen kommt es insbesondere bei hohen Maschenweiten auch zu einem vorzeitigen Versagen der Tragstäbe und damit zum Kraftabfall des gesamten Gitterrostes. Je nach Höhe des Tragstabes, dem Abstand zwischen den Querstäben und der Materialfestigkeit kommt es erst weit nach Erreichen des plastischen Bereichs oder zum Teil bereits vor Erreichen der elastischen Grenze zum Ausknicken des Druckbereichs vereinzelter hochbelasteter Tragstäbe. Das Ausknicken geschieht immer im Bereich der Lasteinleitung über den Lastwürfel. In Abbildung 4-15 wird das Ausknicken während eines Versuches mit einem Foto verdeutlicht.

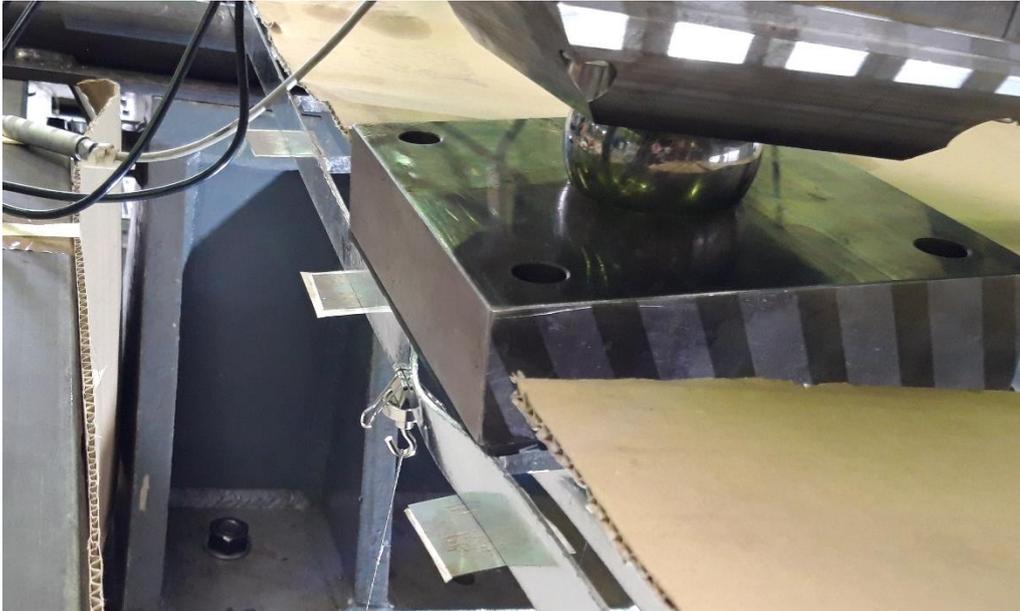


Abbildung 4-15: Entstehung einer Beule im äußersten Tragstab von dem Probekörper 38

Das zugehörige Kraft-Weg-Diagramm in Abbildung 4-16 weist entsprechend bei der Entstehung der Beule einen Knick in der Traglastkurve auf, woraufhin die von dem Gitterrost aufnehmbare Kraft abnimmt. Je mehr Tragstäbe bei weiterer Belastung ausknicken, desto größer ist der damit verbundene Kraftverlust. In einigen Versuchen besitzen die Probekörper nach der Versuchsdurchführung auch Beulen in benachbarten Tragstäben, wobei die Ausprägung dieser von außen nach innen immer weiter abnimmt.

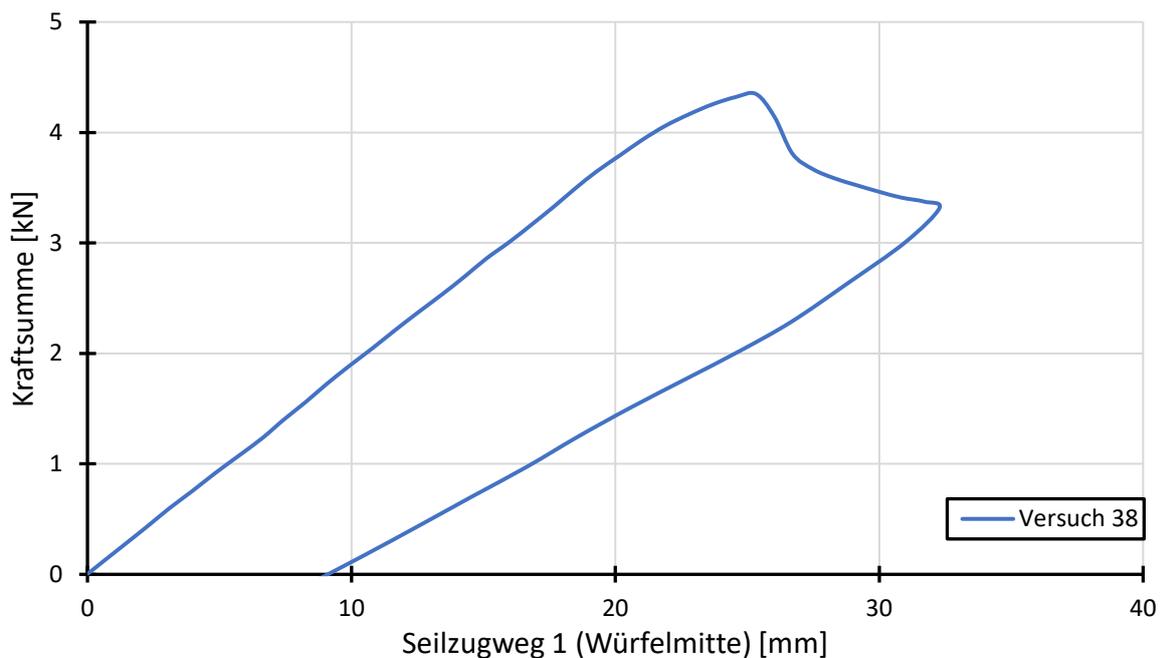


Abbildung 4-16: Kraft-Weg-Diagramm für Gitterrostplatten-Probekörper 38

Eine weitere Auffälligkeit in dem Diagramm ist das Kraftniveau, ab dem das Beulen des äußersten Tragstabes beginnt. Bevor sich das Stabilitätsversagen andeutet, erreichen einige der Tragstäbe das elastische Grenzkraftniveau, weshalb in dem Verlauf die abnehmende Steigung

ab etwa vier Kilonewton noch zu erkennen ist. Dies ist für die meisten Probekörper mit diesem Versagenskriterium der Fall, jedoch gibt es auch wenige sehr schlanke Konfigurationen, bei denen selbst die beginnende Plastifizierung der Tragstäbe nicht mehr erreicht wird. Daher gilt es in den späteren Überlegungen zu der Bemessung, diese unterschiedlich auftretenden Knicklasten genauer zu untersuchen und mithilfe von einfachen Berechnungen kategorisieren zu können. Alle Versuchskurven sind in Anhang A.6 in den Graphen farbig dargestellt.

4.3.2 Effektive Biegesteifigkeit und mittragende Stäbe n

Zur Einschätzung der Tragfähigkeit ist die Ermittlung von den am Lastabtrag beteiligten Tragstäben sinnvoll, wie es bereits in dem Prüfbericht des Materialprüfungsamts [8], in der darauf basierenden RAL-GZ für Gitterroste [1] und dem Forschungsbericht [10] durchgeführt wurde. Mithilfe dieser kann die Tragfähigkeit eines Tragstabes auf die gesamte Gitterrostplatte hochgerechnet werden. Die tabellarisch angegebenen Werte aus Tabelle 2-4 basieren auf einer geringen Anzahl durchgeführter Versuche, an denen mithilfe von Dehnmessstreifen die Spannungen zurückgerechnet und anhand dieser Spannungen die mittragenden Stäbe und die Tragfähigkeit der Platte ausgemacht wurden. Für die große Anzahl an neu durchgeführten Versuchen ist es jedoch nicht möglich jeden Probekörper mit Dehnmessstreifen zu versehen, da die Zinkschicht als Untergrund nicht geeignet für das Applizieren von Dehnmessstreifen ist. Vorweg sei an dieser Stelle jedoch erwähnt, dass die Spannungen mithilfe von FE-Modellen in dem maßgebenden Tragstab sauber abgeleitet werden können. Das Verfahren und die Ergebnisse dazu werden in Kapitel 5.3.1 vorgestellt.

Eine zweite Möglichkeit stellt die Berechnung der mittragenden Tragstäbe über die Biegesteifigkeit des jeweiligen Probekörpers analog zu Gleichung (2.9) in Kapitel 2.4 dar. Die Biegesteifigkeit eines einzelnen Tragstabes ist bereits durch die Auswertung der Referenzversuche in Form der Gitterroststreifen geschehen. Nun gilt es, die effektive Biegesteifigkeit der Gitterrostplatte infolge der flächigen Randbelastung auszurechnen und diese in ein Verhältnis mit der Biegesteifigkeit eines einzelnen Tragstabes zu setzen, um die Anzahl der mittragenden Stäbe zu bestimmen. Die Berechnung erfolgt ähnlich zu den Gitterroststreifen anhand der Durchbiegung eines Einfeldträgers, der durch eine Linienlast in Feldmitte mit der Länge des Lastwürfels belastet wird. Das statische System dazu ist in Abbildung 4-17 dargestellt. Die Formel für die Durchbiegung in Abhängigkeit von der Belastung und der Biegesteifigkeit des Einfeldträgers lässt sich wieder durch die Berechnung anhand des Arbeitssatzes oder durch das Ablesen aus Tabellenwerken wie den Schneider Bautabellen [19] bestimmen. Die für das statische System benötigte Formel ist in der folgenden Gleichung (4.4) gegeben.

$$w = \frac{q \cdot L^4}{48 \cdot EI} \cdot \left[\frac{5}{8} - (1,5 - \alpha^2) \cdot \alpha^2 - (1,5 - \beta^2) \cdot \beta^2 \right] \quad (4.4)$$

$$\text{mit: } \alpha = \beta = \frac{L - a}{2 \cdot L}$$

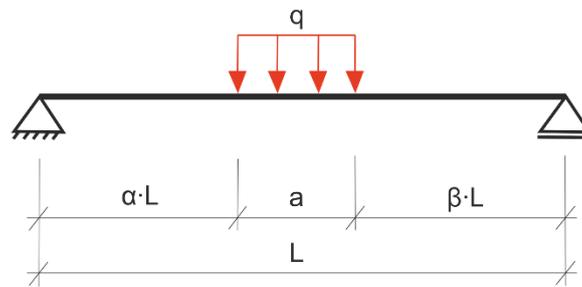


Abbildung 4-17: Statisches System der Gitterrostplatten mit Abmessungen und Belastung

Bezüglich der Formel und dem statischen System ergibt sich die Frage, welcher Tragstab für die vorhandene Durchbiegung und die Bestimmung der Anzahl mittragender Stäbe herangezogen wird. Der Tragstab am Würfelrand besitzt in der Regel die höchste Durchbiegung und erreicht daher zuerst die elastische Grenzbelastung. Allerdings sind zu diesem Zeitpunkt alle weiteren Tragstäbe weniger belastet und eventuell sind einige Tragstäbe noch gar nicht aktiviert worden, die bei weiterer Belastung mittragen können. Die Durchbiegung am Tragstab unter Würfelmitte, welcher in dem Prüfbericht [8] zur Berechnung herangezogen wurde, ist dagegen eher ein Mittelwert und kann so mehr mittragende Stäbe berücksichtigen.

Die Lösung für diese Problemstellung ergibt sich in der später aufgeführten Berechnung der mittragenden Stäbe, da dort die volle Tragfähigkeit eines Tragstabes angesetzt wird. Wenn die Anzahl an mittragenden Tragstäben über die Durchbiegung unter Würfelmitte errechnet werden würde, erfahren ein paar Tragstäbe eine Belastung, die die Tragfähigkeit eines einzelnen Stabes deutlich übersteigt. Insbesondere bei der plastischen Grenztragfähigkeit und der Stabilität einzelner Tragstäbe wird dies problematisch, da keine weiteren Traglastreserven übrig sind. Bei der Berechnung der Biegesteifigkeit infolge der maximalen Durchbiegung am Randtragstab wird dagegen ermittelt, wie viele Tragstäbe im Durchschnitt die gleiche Belastung erfahren. Somit werden alle aktivierten Tragstäbe auf dasselbe Traglastniveau angehoben und eine Anzahl an vollständig belasteten Tragstäben ermittelt. Eine Visualisierung dieser durchschnittlichen Aktivierung von Tragstäben ist in Abbildung 4-18 dargestellt.

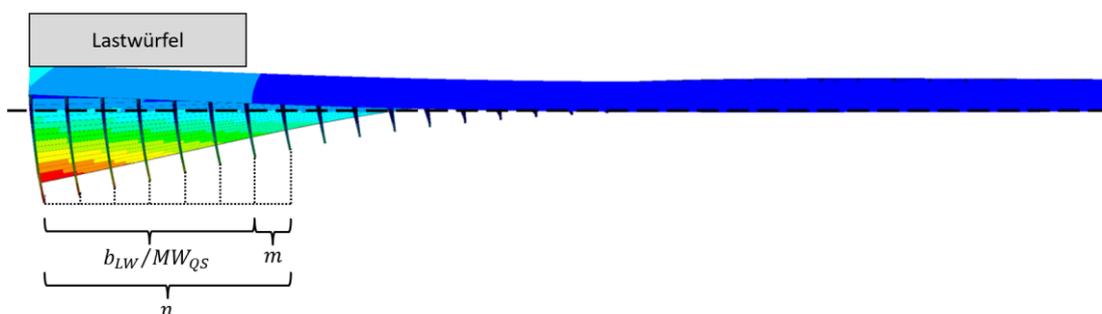


Abbildung 4-18: Verformungsbild einer Gitterrostplatte mit vollständig mittragenden Tragstäben

Aufgrund dieser Überlegungen werden für die Gleichung (4.4) die Kraftsumme aus den Kraftmessdosen zusammen mit dem Seilzugweg unter dem Würfelrand angesetzt. Die Steigung im

elastischen Bereich ist in Abbildung 4-19 beispielhaft für den ersten Probekörper gezeigt und ergibt sich analog zu den Streifenversuchen aus dem Verhältnis von der Kraft und dem Weg, wobei die Formel in diesem Fall eine Umrechnung in die Linienbelastung aufgrund der flächigen Belastung erfordert. Dazu wird die gesamte Kraft durch die Lastwürfellänge in Tragstabrichtung geteilt, sodass sich die Steigung s in Gleichung (4.5) wie folgt ergibt:

$$s = \frac{\Delta q}{\Delta w} = \frac{\Delta F}{a \cdot \Delta w} \quad (4.5)$$

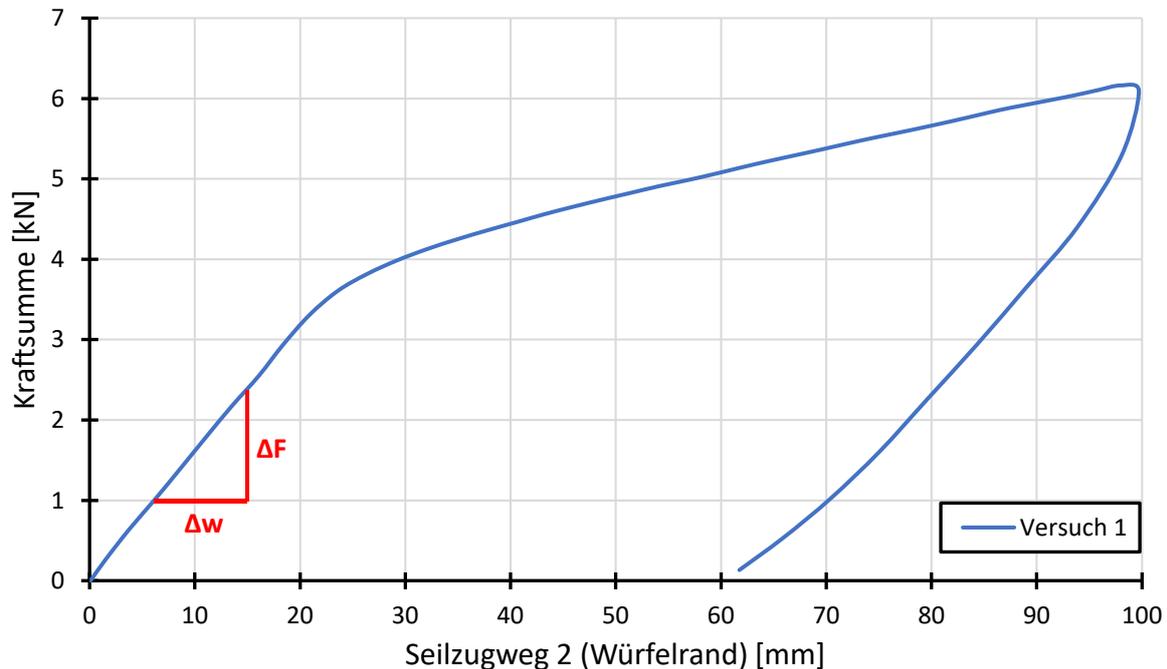


Abbildung 4-19: Kraft-Verformungs-Diagramm des Probekörpers 1 mit elastischer Steigung

Mithilfe der Steigung s und den geometrischen Systemabmessungen sind alle erforderlichen Größen vorhanden, um die Gleichung (4.4) zu der Biegesteifigkeit der gesamten Gitterrostplatte umzuformen. Da die Längenteile α und β für alle getesteten Probekörper mit der mittigen Belastung gleich groß sind, kann die Formel zudem vereinfacht werden. Die daraus resultierende Formel ist in Gleichung (4.6) gegeben.

$$EI_{Platte,eff} = \frac{s}{48} \cdot \left[\frac{5}{8} - 2 \cdot (1,5 - \alpha^2) \cdot \alpha^2 \right] \quad (4.6)$$

Diese effektive Biegesteifigkeit entspricht einer äquivalenten Größe für die Anzahl mittragender Tragstäbe, die sich insgesamt vollständig an dem Lastabtrag beteiligen. Um die gesamte Anzahl dieser voll mittragenden Tragstäbe zu bestimmen, muss die effektive Biegesteifigkeit der gesamten Platte demnach ins Verhältnis zu der Biegesteifigkeit eines einzelnen Tragstabes, ermittelt aus den Streifenversuchen, gesetzt werden. Die Gleichung (4.7) errechnet die mittragenden Stäbe n aus diesem Verhältnis.

$$n = \frac{EI_{Platte,eff}}{EI_{Streifen,eff}} \quad (4.7)$$

Zum besseren Vergleich mit den Werten der bisherigen RAL-GZ für Gitterroste [1] sind von der Gesamtanzahl der mittragenden Stäbe n die Stäbe unter dem Lastwürfel abzuziehen. Wie in Kapitel 2.3.2 bereits gezeigt wurde, werden jedoch nur die Anzahl der Maschenteilungen unter dem Lastwürfel berücksichtigt und lassen somit einen Tragstab mehr in der zusätzlichen Anzahl an mittragenden Stäben m . Die Formel lautet entsprechend nach Gleichung (4.8):

$$m = n - \frac{b_{LW}}{MW_{QS}} \quad (4.8)$$

Als Ergebnis liegen nach allen durchgeführten Versuchen verschiedene Werte mittragender Stäbe m für die jeweiligen Probekörper vor. Diese können den vorgegebenen Werten der bisherigen Bemessungsnorm nach RAL-GZ [1] gegenübergestellt und mit diesen verglichen werden. Dazu eignet sich eine graphische Darstellung, die auf der vertikalen Achse die mittragenden Stäbe und auf der horizontalen Achse eine passende Vergleichsgröße mit den wichtigsten Eingangsgrößen besitzt. Da vermutet wird, dass die Querstäbe je nach Querschnittsgröße und vorhandener Anzahl mehr oder weniger Kraft auf die angrenzenden Tragstäbe verteilen, werden dazu passende Größen ins Verhältnis zueinander gesetzt.

An dieser Stelle wird der erste Parameter λ aus Kapitel 2.5 herangezogen, der einerseits das Flächenträgheitsmoment der Quer- und Tragstäbe und andererseits die Maschenweiten zwischen den jeweiligen Stäben berücksichtigt. Damit die Verhältnisse insbesondere zwischen den Schweißpressrosten und den Vollrosten nicht zu sehr auseinandergehen, wird aus dem Verhältnis zusätzlich die vierte Wurzel gezogen.

In demselben Graphen werden auch die vorgegebenen mittragenden Stäbe m für Press- und Schweißpressroste nach der RAL-GZ [1] dargestellt, wobei in der Tabelle 2-4 nur die Tragstabhöhe als Anhaltspunkt für die Bestimmung gegeben ist. Daher werden für die Tragstabbreiten je nach Höhe sinnvolle Werte zwischen zwei und fünf Millimetern angenommen und die Querstababmessungen nach den Mindestwerten in Kapitel 2.2.3 bestimmt. Des Weiteren ist es sinnvoll, die zuvor berechneten effektiven Tragstabhöhen aus den Gitterroststreifenversuchen statt der nominellen oder vorhandenen Tragstabhöhen in die Flächenträgheitsmomente einfließen zu lassen, da so der Einfluss der Schlitzung berücksichtigt wird. Bei den Tragstabhöhen aus der Bemessungsnorm wird für die Press- und Vollroste diese nominell angegebene Höhe mit der dritten Wurzel des Abminderungsfaktors $\nu = 0,9$ verrechnet, um eine äquivalente Größe zu den errechneten effektiven Tragstabhöhen zu erlangen. Für die Schweißpressroste ist diese Umrechnung aufgrund des Abminderungsfaktors $\nu = 1,0$ nicht notwendig.

Eine Darstellung mit den beschriebenen Einflussgrößen ist getrennt nach den Gitterrosttypen und den Ergebnissen der Probekörper sowie den Werten nach der RAL-GZ [1] in Abbildung 4-20 gezeigt. In erster Linie ist zu erkennen, dass die Probekörper erwartungsgemäß nach dem

Gitterrosttyp auf der horizontalen Breite verteilt sind. Die Schweißpressroste sind aufgrund ihres sehr kleinen Querstabes im Vergleich zu den Tragstäben bei einem sehr geringen Verhältniswert. Die Vollroste gehen aufgrund der gleich großen Quer- und Tragstäbe in Richtung des Verhältniswertes eins, lediglich abgemindert durch höhere Maschenteilungen zwischen den Querstäben. Die Ergebnisse der Pressroste liegen dagegen hauptsächlich zwischen denen der Schweißpress- und Vollroste.

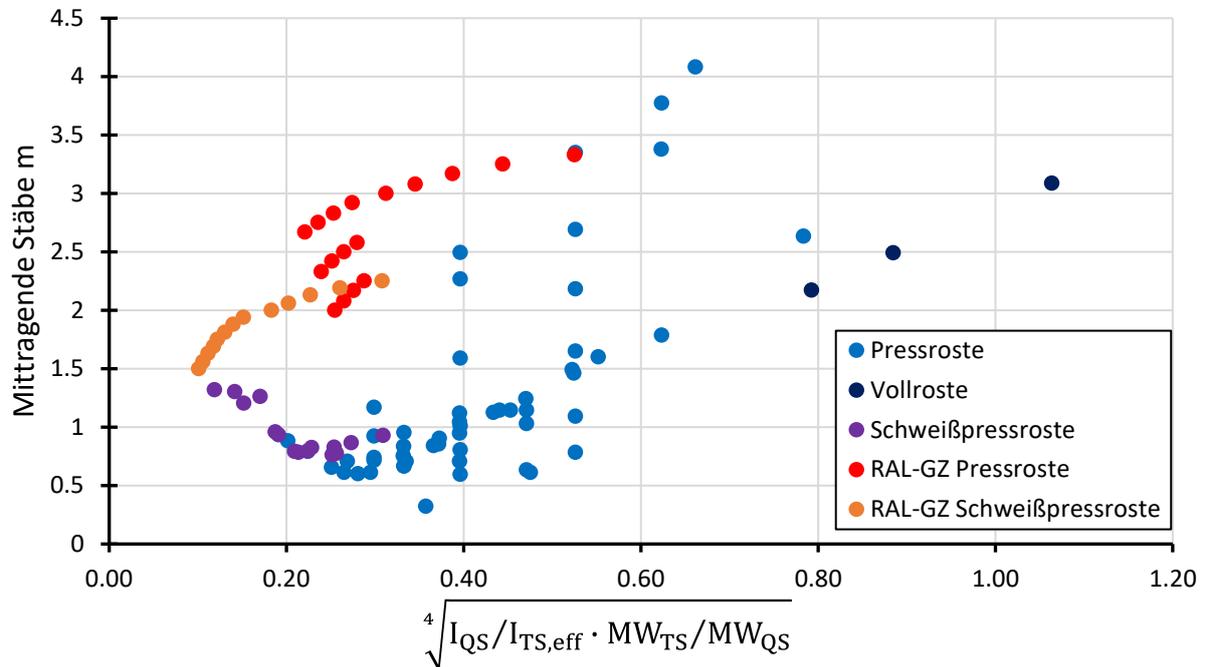


Abbildung 4-20: Mittragende Stäbe der verschiedenen Probekörper und der Bemessungsnorm

Bei weiterer Betrachtung fällt auch ein Zusammenhang zwischen der Querstababmessung und der Anzahl mittragender Stäbe m auf. Bei kleinen Querstäben der Schweißpressroste und einem Teil der Pressroste liegt die Anzahl m nahe bei eins, was genau der Anzahl der Stäbe unter dem Lastwürfel entspricht. Das bedeutet, dass nahezu keine Querverteilung durch die Querstäbe hervorgerufen wird und die Tragstäbe unter dem Lastwürfel die gesamte Last abtragen. Umso mehr sich die Querstabhöhen an die Tragstabhöhen annähern, desto höher ist die Lastverteilung und damit die Anzahl der mittragenden Stäbe. Den Grenzfall bilden die Vollroste, die die erwartungsgemäß höchste Lastverteilung in Querrichtung besitzen und somit die höchste Anzahl an mittragenden Stäben besitzen.

Eine Ausnahme bilden einige Pressroste, die trotz mittelmäßigem Verhältnis der Tragstab- und Querstababmessungen eine sehr hohe Anzahl an mittragenden Stäben aufweisen. Aufschluss darüber bietet eine alternative Darstellung der Ergebnisse getrennt nach den Lastwürfelabmessungen in Abbildung 4-21.

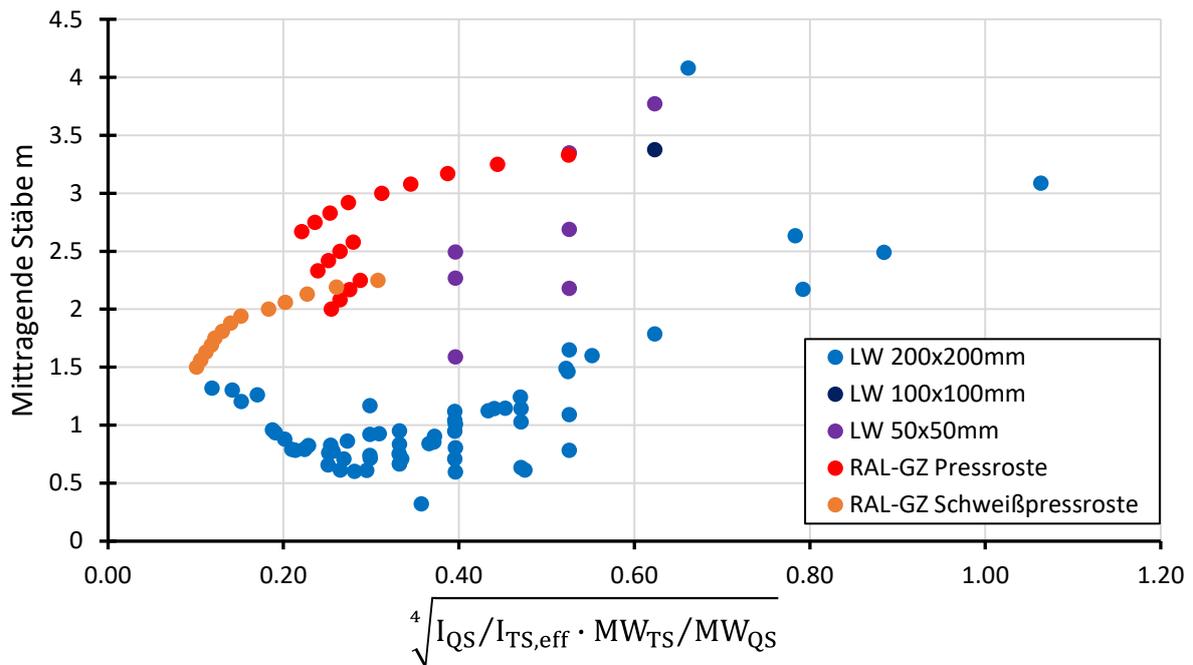


Abbildung 4-21: Mittragende Stäbe dargestellt nach den Lastwürfelabmessungen

Bei den zuvor nicht einzuordnenden Ausreißern der Pressrostprobekörper handelt es sich bis auf zwei Ausnahmen um Versuche, die mit einer kleineren Lastwürfelabmessung durchgeführt wurden. Eine kleinere und somit konzentriertere Lasteinleitung scheint eine höhere Querverteilung auf die benachbarten Tragstäbe zu bedeuten, wobei wiederum weniger Tragstäbe unter dem Lastwürfel liegen. Daher ist die Gesamtanzahl der mittragenden Stäbe n nicht zwangsläufig höher.

Die zwei Ausreißer der Pressroste mit 200mm breitem Lastwürfel gehören zu den besonderen Fällen der Gitterroste aus Aluminium und Edelstahl mit niedrigen Stababständen. Die elf Millimeter Maschenweite zusammen mit der daraus resultierenden geringen effektiven Höhe und dem weicheren Material erzeugen eine rechnerisch höhere Querverteilung. Dabei ist aufgrund der geringen Versuchsanzahl zu diesen Randbedingungen nicht ausgeschlossen, dass diese Werte an mittragenden Stäben außergewöhnlich hoch sind.

Die Werte aus der RAL-GZ [1] lassen sich dagegen nur nach den Querschnittsabmessungen und dem Gitterrosttyp unterscheiden. Daher ergibt sich bereits die erste Problematik in der bisherigen Bemessungsnorm, da eine Abhängigkeit von der Lasteinleitungsfläche vollständig vernachlässigt wird. Nach den Bemessungsbeispielen in dem Dokument zu urteilen sind größere Lasteinleitungsflächen mit 400x200mm, die sich an der Aufstandsfläche eines Fahrzeugreifens orientieren, nicht untypisch, sodass die eingezeichneten Werte für die mittragenden Stäbe weit über denen des nächstliegenden Lastwürfels mit 200mm Seitenlänge liegen. Ein Grund hierfür ist unter anderem auch, dass in dieser Arbeit die mittragenden Stäbe auf der sicheren Seite liegend an dem Randtragstab bestimmt werden, während in [8] der Tragstab unter der Lastwürfelmitte herangezogen wurde, wie bereits in Kapitel 2.3.2 beschrieben.

Zudem ist die Tatsache, dass die Tabelle 2-4 lediglich die mittragenden Stäbe nach der Tragstabhöhe, nicht aber nach den Querstababmessungen unterscheidet, eine Ungenauigkeit in der Einschätzung der Querverteilung. Zwar sind die gegebenen Mindestabmessungen einzuhalten, aber im Falle einer größeren Querschnittswahl wie beispielsweise bei einem Vollrost werden die besseren Eigenschaften der Querverteilung vernachlässigt beziehungsweise nicht genau erfasst.

Die vereinfachte graphische Darstellung über die effektive Tragstabhöhe, wie sie aus der RAL-GZ [1] bestimmt werden kann, ist in Abbildung 4-22 gezeigt. Darin ist der lineare Zusammenhang zwischen den mittragenden Stäben m und der Tragstabhöhe, vergleiche Abbildung 2-8 in Kapitel 2.3.2, aus der zugrundeliegenden Forschung [8] zu erkennen. Wie die durchgeführten Versuche in den aufgeführten Graphen jedoch zeigen, liegen die Werte insbesondere für hohe Lastwürfelabmessungen wesentlich niedriger, besitzen keinen linearen, absteigenden Zusammenhang zur Tragstabhöhe und erfahren einen wesentlichen Einfluss durch die Querstabgröße.

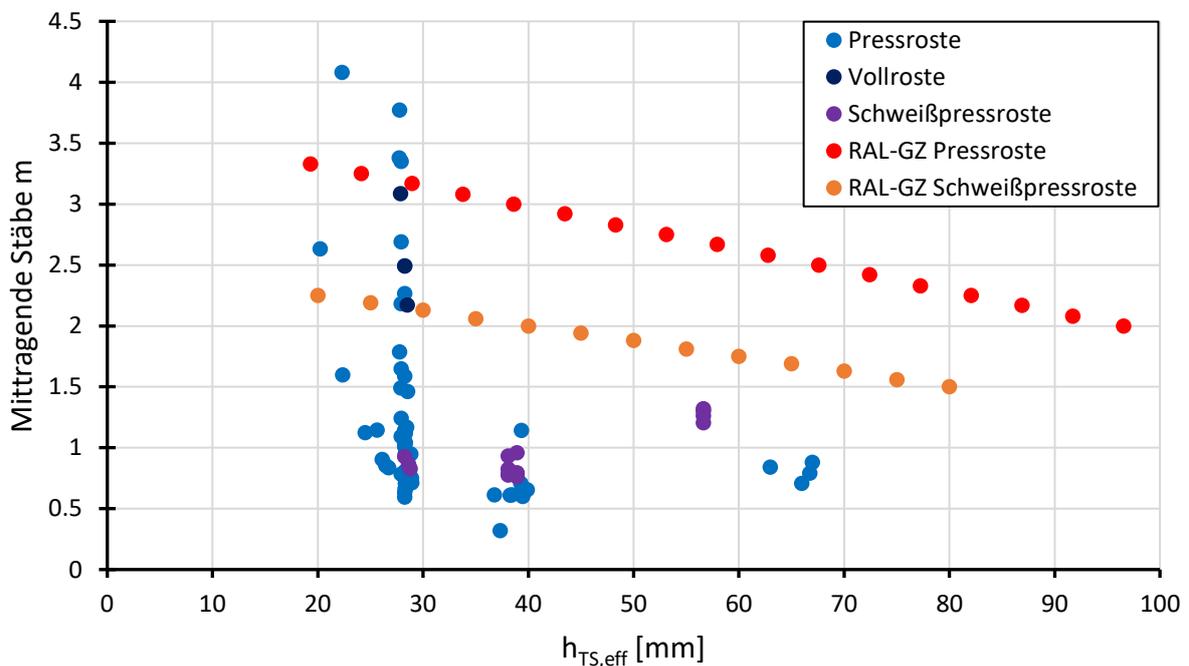


Abbildung 4-22: Mittragende Stäbe dargestellt für die effektive Tragstabhöhe

Diese und viele weitere Zusammenhänge sind ebenfalls in dem Abschlussbericht [22] zu diesem Forschungsprojekt erkannt und näher untersucht worden. Mithilfe von Parameterstudien sind viele weitere Geometrien hinzugekommen, die die zuvor genannten Zusammenhänge mit dem Parameter λ und der Lasteinleitungsfläche bestätigen. Daraus resultiert schlussendlich eine komplexere Formel, die die mittragenden Stäbe n in Abhängigkeit aller relevanten Eingangsgrößen möglichst genau beschreibt. Dabei wird der zweite geometrische Parameter μ , welcher in Kapitel 2.5 neben dem Parameter λ als weitere wichtige Einflussgröße für anisotrope Platten beschrieben wurde, ebenfalls in den Zusammenhang gebracht. Die Formel sowie deren Herleitung und Genauigkeit können in dem Abschlussbericht [22] nachgelesen werden.

5 Numerische Untersuchungen

Die bisherigen Ergebnisse und Überlegungen beziehen sich auf 71 Gitterrostplattenversuche, anhand derer die mittragenden Stäbe und die daraus resultierenden Tragfähigkeiten bestimmt und das Stabilitätsversagen eingeschätzt werden kann. Um diese Anzahl noch weiter zu erhöhen und andere Kombinationen an ungetesteten Geometrien zu untersuchen, kann ein numerisches, parametrisiertes Modell einer Gitterrostplatte angefertigt werden. Zur Validierung eines solchen Modells werden die Randbedingungen dabei so lange variiert und untersucht, bis die Ergebnisse aller FE-Probekörper mit denen der zugehörigen, realen Probekörper weitestgehend übereinstimmen. Anschließend können weitere Konfigurationen mit Variation der Querschnittsgrößen, Maschenteilungen sowie der Plattenabmessungen in Parameterstudien berechnet und ausgewertet werden. In diesem Kapitel werden dazu zunächst die Erstellung dieses FE-Modells in der verwendeten Software erläutert und anschließend die Validierung und die darauf aufbauende Parameterstudie mit den erreichten Ergebnissen im Zusammenhang mit der zuvor durchgeführten Auswertung der Versuchsergebnisse beschrieben.

5.1 Genutzte Software

Zur Berechnung der numerischen Ergebnisse wird das Finite Elemente Programm *Ansys* [23] verwendet. Die Benutzeroberfläche, die in Abbildung 5-1 zu sehen ist, besteht aus einer oben liegenden Toolbar (1), der linksseitig gelegenen Aktionsleiste (2) und dem restlichen Modellbereich (3).

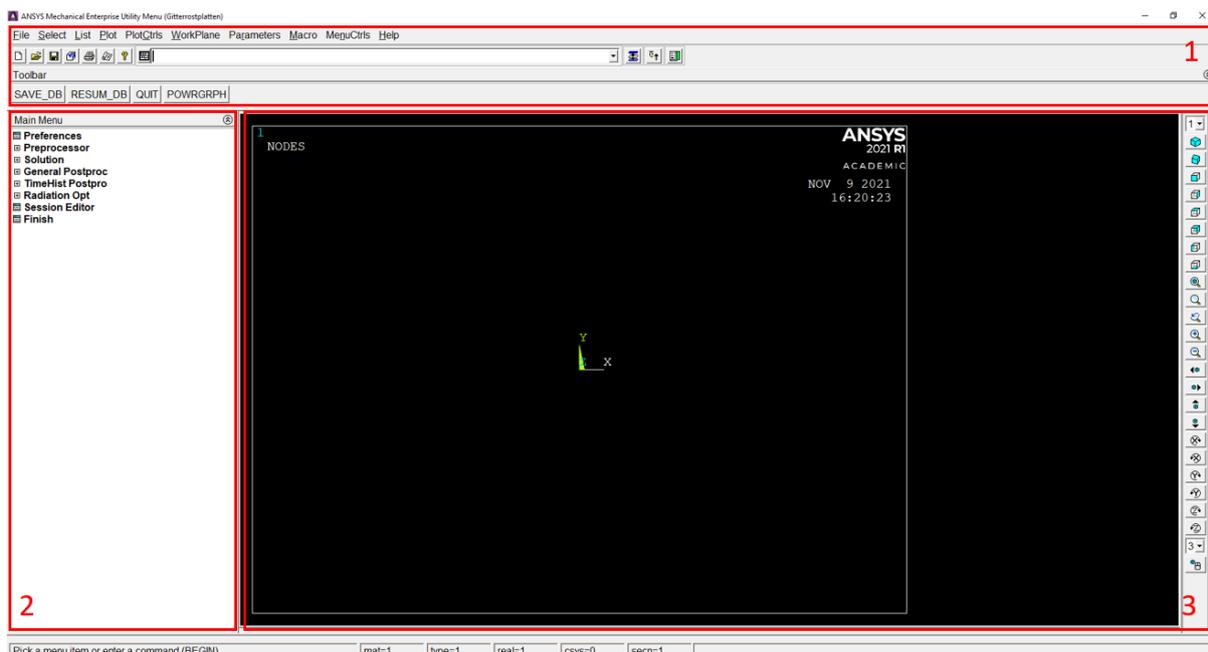


Abbildung 5-1: Benutzeroberfläche von Ansys [23]

In der Toolbar kann unter dem Menüpunkt *File* die Option *Read Input From...* gewählt werden, womit ein vorgefertigtes Skript bestehend aus Befehlen in der genutzten Befehlssprache APDL eingelesen werden kann. Damit wird die Möglichkeit gegeben, ein Modell in Abhängigkeit von

variablen Parametern zu erstellen und anzupassen, ohne für jedes Modell mit anderen Abmessungen die Befehle per Mausklick erneut eingeben zu müssen. Das Vorgehen dazu wird im Folgenden näher beschrieben.

5.2 Entwicklung eines parametrisierten Modells

Wichtig für ein Modell, welches sowohl für die Abmessungen als auch das verwendete Material variabel gehalten werden soll, ist die Parametrisierung. Die Variablen können insbesondere bei der Erstellung der Geometrie mit einem sinnvollen Aufbau verwendet werden, sodass unabhängig von den angegebenen Abmessungen der entsprechende Probekörper in der FE-Umgebung realitätsgetreu entsteht. Des Weiteren sind für jede Funktion zur Modellierung eines FE-Modells Befehle in der verwendeten Programmiersprache vorhanden, die in einer Liste von dem Entwickler zur Verfügung gestellt sind und verwendet werden können. Diese reichen von der geometrischen Modellierung über die Material- sowie Elementdefinierung und Lastaufbringung bis hin zur automatischen Speicherung der relevanten Ergebnisse.

5.2.1 ADPL Befehlssprache

Die von dem Programm *Ansys* [23] verwendete Befehlssprache *ADPL* ordnet die Befehle in Kategorien entsprechend der Modellierungsstufe und der Zugehörigkeit. Befehle, die der Definierung von Variablen, der Oberflächendarstellung und der Ansicht des Modells dienen, können in jedem Abschnitt verwendet werden.

Die erste Kategorie beschäftigt sich mit der Modellierung und heißt Preprocessor-Phase. Dort können die Eingangsgrößen wie die Materialparameter, die Geometrien der Gitterrostplatte sowie der Trag- und Querstäbe, die Elementgröße beziehungsweise -anzahl sowie die Auflagerbedingungen definiert werden. In den meisten Fällen besitzen die Befehle mehrere Stellen für numerische Größen wie die Fließgrenze oder die geometrischen Abmessungen, sodass dort die vorab definierten Variablenbezeichnungen eingesetzt werden können. So ist die Befehlsstruktur parametrisiert und kann mit unterschiedlichen Eingangswerten je nach erforderlicher Gitterrostkonfiguration bedient werden.

In der zweiten Phase, die der Solution-Phase entspricht, werden die Bedingungen zur Berechnung festgelegt. Dazu gehört, dass eine Last oder eine Verschiebung an die gewünschte Stelle aufgegeben und die Berechnungsmethodik festgelegt wird. Typische Angaben sind die Berechnung nach Theorie erster oder zweiter Ordnung, die Wahl der Zeit und die Schrittgröße, in der die Last bis zum Endzeitpunkt erhöht werden soll, sowie die Art der Analyse.

Die letzte Phase heißt Postprocessor-Phase und beschäftigt sich mit der Darstellung und Speicherung der gewünschten Ergebnisse. Von Verschiebungen über Spannungen und Dehnungen bis hin zu Schnittgrößen können mit verschiedenen Befehlen alle interessanten Werte an jedem beliebigen Knotenpunkt oder Element ermittelt und dargestellt werden.

5.2.2 Aufbau des Modellskripts

Das Skript kann in jedem beliebigen Texteditor angefertigt und bearbeitet werden. Als besonders geeignet stellt sich das Programm *Notepad++* [24] heraus, welches durch das Einladen der Befehlssprache *ADPL* die farbliche Unterscheidung von Variablen, Befehlen und Notizen erlaubt. Dies vereinfacht den Umgang mit der Befehlssprache und verringert die Fehleranfälligkeit durch den Benutzer.

Zwecks einer guten Übersichtlichkeit ist es sinnvoll, das Skript entsprechend den zuvor genannten Phasen und der inhaltlichen Funktion zu gliedern. Dazu wird eine Masterdatei erstellt, die in dem Programm *Ansys* [23] eingelesen wird. Diese Datei greift wiederum auf jede weitere Textdatei zu, die dem Aufbau und der Berechnung des FE-Modells dienen. Diese Dateien beinhalten entsprechend der chronologischen Reihenfolge die Parameter, das Material, die Geometrie, die Belastung mit der Berechnung und die Ergebnisdarstellung sowie die Speicherung dieser.

In der Parameterdatei werden die variablen Eingangsgrößen mithilfe einer genauen Wertangabe für eine spezifische Gitterrostkonfiguration oder durch das Zugreifen auf eine Wertedatei mit beliebig vielen Konfigurationen definiert. Dazu gehören in erster Linie die in Abbildung 2-3 gezeigten geometrischen Größen der Gitterrostabmessungen L und B , der Tragstababmessungen h_{TS} und b_{TS} sowie Querstababmessungen h_{QS} und b_{QS} , der Maschenteilungen MW_{TS} und MW_{QS} und die Lasteinleitungslängen b_{LW} . Zudem wird die Anzahl der Elemente fürs das Mesh getrennt für Trag- und Querstäbe in Form von Parametern festgelegt, welche je nach Maschenteilung so gewählt wird, dass jedes Element möglichst gleich groß ist. Weiterhin sind auch die Materialkenngrößen als Parameter zu definieren, wozu der E-Modul, die Dichte und die Querkontraktionszahl gehören. Aus den geometrischen Parametern werden außerdem weitere Hilfsgrößen berechnet wie die Anzahl der Trag- und Querstäbe und der Überhang der Platte über die Auflager hinweg.

In der Materialdatei des Preprocessors werden die Materialgrößen aus der Parameterdatei abgefragt und das verwendete Materialmodell, welches in Kapitel 4.1.3 anhand der wahren Spannung und Dehnung definiert wurde, für die Trag- und Querstäbe abgerufen. Verwendet wird dazu ein kinematisches Verfestigungsmodell, wodurch die Definierung von einer Fließspannung und 18 weiteren Punkten für die plastische Verfestigung ermöglicht wird.

Anschließend gilt es in der Geometriedatei des Preprocessors die Parameter und Hilfsgrößen für die Abmessungen in ein Gitterrostmodell umzuwandeln. Dazu werden Knoten, verbindende Linienelemente und zuzuordnende Querschnitte mit diesen Parametern modelliert. Die Linienelemente zwischen zwei Knotenpunkten werden entsprechend der gewählten Anzahl an Elementen aus der Parameterdatei weiter geteilt, sodass kleinere Elemente mit gleichen Längen für eine höhere Genauigkeit der Ergebnisse entstehen. So werden beispielsweise die Tragstäbe bei einer Maschenweite von 66mm zwischen den Querstäben in sechs Elemente

und die Querstäbe bei einer Maschenteilung von 33mm zwischen den Tragstäben in drei Elemente unterteilt, sodass alle Elemente von Trag- und Querstäben jeweils 11mm lang sind.

Ein weiterer wichtiger Punkt in der Modellierung ist die Wahl eines passenden Elementtyps für die Trag- und Querstäbe. Den Linienelementen wird dazu das Balkenelement *beam188* zugeordnet, welches zwei Knoten mit je drei Rotations- und drei Verschiebungsfreiheitsgraden besitzt. Zudem ist es durch das Element möglich, den Einfluss infolge Schubverzerrung festzulegen und große Deformationen auch infolge nichtlinearer Analysen des Systems zu berechnen.

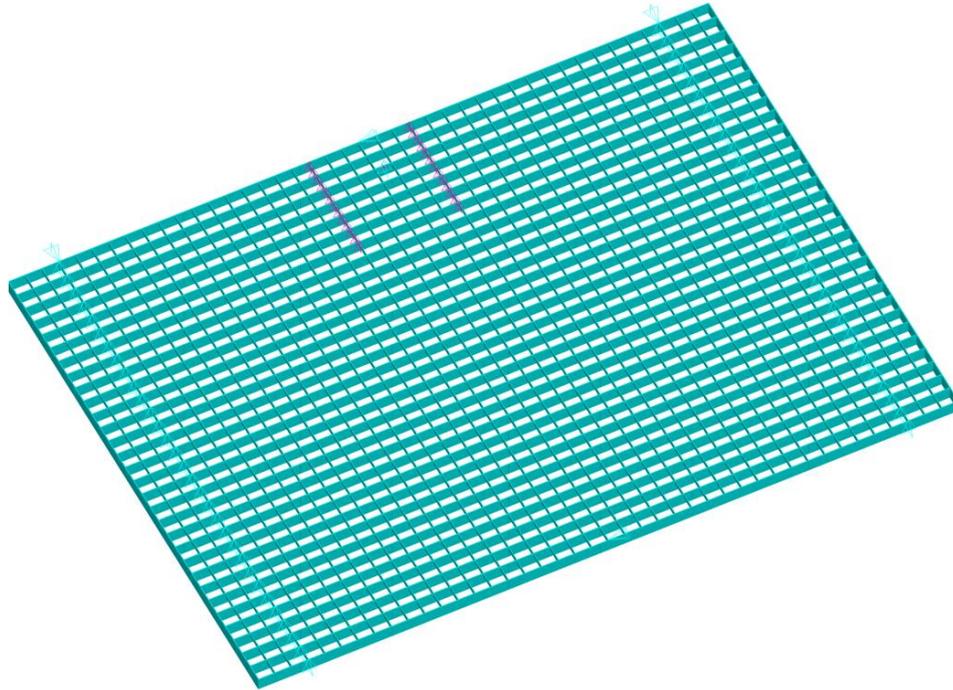


Abbildung 5-2: Darstellung der Geometrie des ersten Probekörpers in Ansys [23]

Des Weiteren werden in der Geometriedatei die in Abbildung 5-2 zu erkennende Lasteinleitung mit den belasteten Randknoten im Lastwürfelbereich und die Auflagerbedingungen für eine statisch bestimmte Festhaltung definiert. Für die Lasteinleitung werden analog zu dem beschriebenen FE-Modell in Kapitel 2.4 ein Master-Knoten und mit diesem verknüpfte Slave-Knoten definiert. Der Master-Knoten ist für die aufzubringende vertikale Verschiebung vorhanden und überträgt diese auf die Slave-Knoten. Um die vorhandenen Freiheitsgrade des Versuchsaufbaus zu modellieren, wird an dieser Stelle die Rotation und die horizontale Verschiebung relativ zueinander ermöglicht. Dies entspricht dem in Kapitel 3.4.1 beschriebenen Versuchsaufbau, da diese Bewegungen durch die Kugelkalotte und das Schlittensystem auftreten können.

In der Modellierung der Lagerknoten stellt zudem das Federelement *combin39* einen wichtigen Bestandteil dar. Dieses Element besitzt lediglich Verschiebungsfreiheitsgrade und erzeugt entlang der Auflagerlinien eine gelenkige Lagerung. Durch eine sehr hoch gewählte Federsteifigkeit für Druckkräfte können diese Elemente ohne eine auftretende Verformung diese Kräfte

aufnehmen. Dagegen werden Zugkräfte von den Federn nicht aufgenommen und lassen ohne Widerstand die abhebende Bewegung des Knotens der Gitterrostplatte zu. Dadurch werden die Bedingungen der Auflagerrollen, die nur Druckkräfte aufnehmen können, möglichst realitätsnah mit der FE-Methode modelliert.

Für die Kreuzungspunkte von Trag- und Querstäben wird zudem untersucht, ob sich diese Verbindung um die Achse des Tragstabes gelenkig oder biegesteif verhält. Analog zu den Untersuchungen von [10] in Kapitel 2.4 wird die Annahme getroffen und mit Ergebnissen bestätigt, dass die Verpressung der Schlitze eine biegesteife Verbindung erzeugt. An den Kreuzungspunkten werden demnach die Rotationsfreiheitsgrade miteinander gekoppelt.

In der darauffolgenden Berechnungsdatei, die die Solution-Phase umfasst, wird die Belastungsart festgelegt, welche analog zu den Versuchen aus einem aufgebracht Weg auf den Master-Knoten besteht. Für die erforderlichen Ergebnisse wie die globale Verformungsfigur oder die Spannungsverteilung ist zudem die statische Analyse zu wählen. Zusätzlich wird festgelegt, dass die Berechnung geometrisch nichtlinear durchgeführt wird, damit Effekte wie die Schiefstellung der Lasteinleitung und der darunter liegenden Tragstäbe erfasst werden können.

Weiterhin wird die Endzeit zu eins definiert, was bedeutet, dass zu diesem Zeitpunkt der maximal festgelegte Weg erreicht wird. Die Zeitschritte erhöhen den aufgebracht Weg linear bis zu diesem Endwert und können beliebig groß gewählt werden. Damit in komplexeren Fällen, wie bei der plastischen Verfestigung oder dem Aufkommen von Beulen im Tragstab, das Programm weiterrechnen kann, werden Ober- und Untergrenzen für diese Zeitschritte angegeben, bis zu denen das Programm beliebig die Intervalle anpassen kann. In vielen Berechnungen sind zehn Schritte sinnvoll und ausreichend, jedoch reduzieren sich die Zeitintervalle insbesondere bei der Abbildung des Stabilitätsversagens stark, sodass eine hohe Anzahl an Zeitpunkten zustande kommt. Für jeden dieser Punkte wird das innere Gleichgewicht an allen vorhandenen Knoten berechnet, wodurch bei einer hohen Anzahl an Zeitintervallen in Kombination mit einer hohen Knotenanzahl ein enormer Rechenaufwand entstehen kann. Dieser wird mit einer entsprechend niedrigeren Wahl von Elementen und einer begrenzten Intervallgröße für die Zeitschritte reduziert.

In der Ergebnisdatei des Postprocessors werden schlussendlich die relevanten Ergebnisse errechnet und auf der Benutzeroberfläche dargestellt. Dazu gehören die Durchbiegungen, die Spannungen und Dehnungen in den Stäben und die Biegemomente in den Tragstäben. Eine Darstellung der Durchbiegungen für den ersten Probekörper ist in Abbildung 5-3 gezeigt.

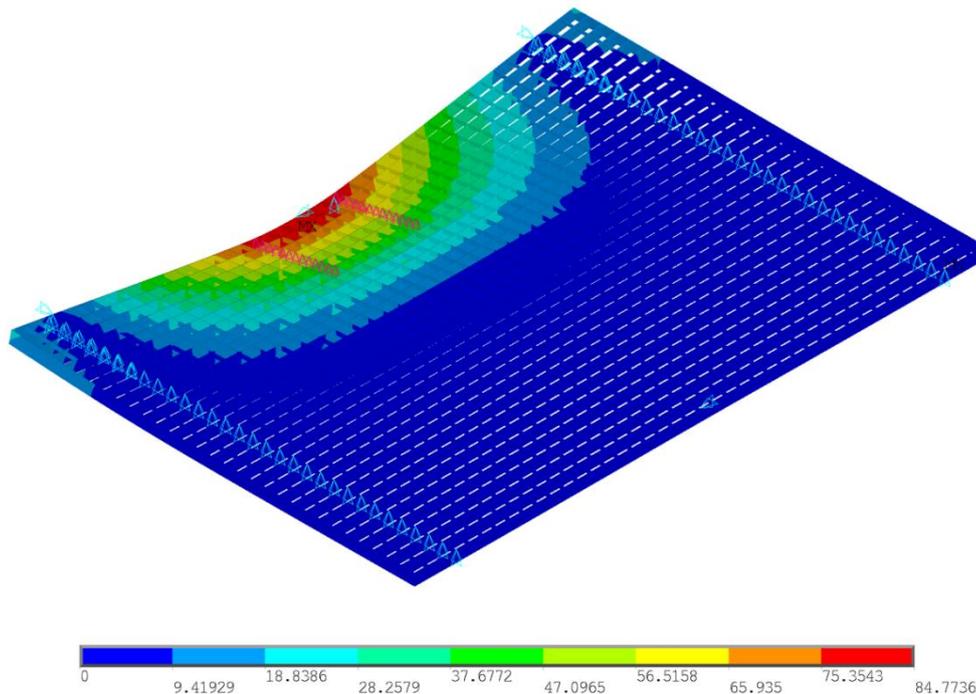


Abbildung 5-3: Darstellung der numerischen Durchbiegung des ersten Probekörpers in Ansys [23]

Um diese Ergebnisse im Anschluss auswerten und mit den realen Versuchsergebnissen vergleichen zu können, ist eine Abspeicherung der relevanten Daten in einer Textdatei notwendig. Dazu wird eine letzte Befehlsdatei angelegt, in der die Durchbiegungen an den Knoten unter der Würfelmitte und dem Würfelrand sowie die zugehörige Kraft im Master-Knoten für jeden Zeitschritt ausgelesen werden. Diese entsprechen den vorhandenen Kolbenkräften beziehungsweise der Kraftsumme aus den Kraftmessdosen und den Wegen der Seilzüge aus den Versuchen. Zusätzlich werden für den höchstbelasteten Tragstab auch die Spannungen und Dehnungen gespeichert, um den Zeitpunkt des Erreichens der Fließgrenze bestimmen zu können.

5.3 Validierung des numerischen Modells

Die zuvor beschriebenen Inhalte des parametrisierten Skriptes werden als erstes mit den Versuchsergebnissen verglichen, um die Genauigkeit des FE-Modells im Vergleich zu den realen Probekörpern zu bestimmen. Dazu werden alle 71 verschiedenen Gitterrostplatten jeweils mit den vorhandenen Abmessungen in die entsprechenden Variablen eingetragen und für eine ähnliche Durchbiegung berechnet. Zur Berücksichtigung und Untersuchung des Einflusses der effektiven Tragstabhöhe auf die Traglast der Gitterrostplatten werden die numerischen Ergebnisse für jeden Probekörper sowohl mit der vorhandenen als auch mit der effektiven Tragstabhöhe ermittelt. Des Weiteren wird besonders bei den Probekörpern mit Stabilitätsversagen der Tragstäbe auf die maximal erreichte Last im Vergleich zu den Versuchen geschaut und weiterhin untersucht, ob Imperfektionen einen maßgebenden Einfluss auf diese besitzen.

5.3.1 Vergleich von experimentellen und numerischen Ergebnissen

Nach einigen Variationen der Randbedingungen und Untersuchung verschiedenster Einflüsse wie beispielsweise der beschriebenen Freiheitsgrade an den Knotenpunkten der Trag- und Querstäbe kann mit dem beschriebenen Skript eine gute Übereinstimmung der numerischen mit den experimentellen Ergebnissen gefunden werden. Abbildung 5-4 zeigt die Kraft-Verformungskurve für den Seilzug unter Würfelmitte mit den zwei verschiedenen Berechnungsansätzen für die vorhandene und die effektive Tragstabhöhe. Auffällig ist, dass mit der vorhandenen Tragstabhöhe, wie auch bei den Gitterroststreifen in Kapitel 4.2.2 herausgestellt wurde, die Traglast und die Steigung im elastischen Bereich überschätzt werden. Die numerische Kurve mit der effektiven Tragstabhöhe liegt im anfänglichen Bereich sehr genau über den experimentellen Ergebnissen und besitzt im plastischen Bereich eine etwas höhere Steigung. Dies liegt vermutlich entweder an der etwas ungenauen Abbildung der wahren Spannungs-Dehnungs-Kurve im Bereich des Fließplateaus, da dort die niedrigeren Spannungen nicht berücksichtigt werden können, oder an leichten Abweichungen der Geometrie des Versuchs.

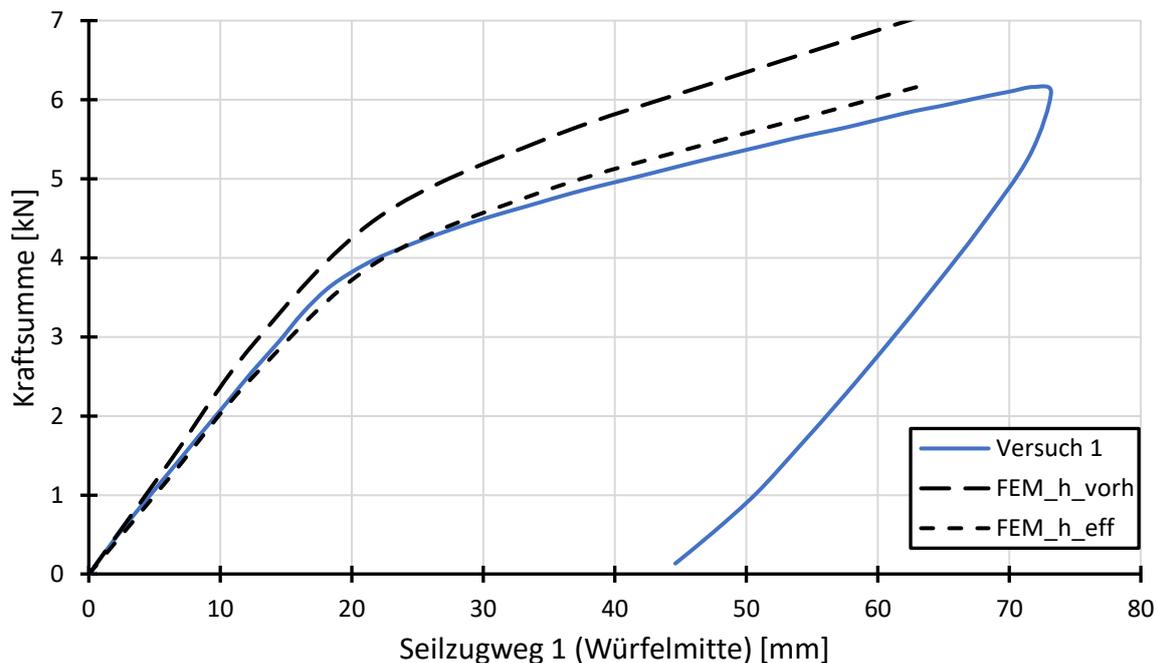


Abbildung 5-4: Gegenüberstellung der numerischen und experimentellen Ergebnisse (Mitte)

Die effektive Tragstabhöhe aus den Streifenversuchen wird für die Nachrechnung der Gitterrostplatten teilweise angepasst, um die abweichenden Tragstababmessungen zwischen Streifen- und Plattenprobekörpern berücksichtigen zu können. Dazu wird die zuvor ermittelte effektive Tragstabhöhe mit dem Verhältnis der Tragstabbreiten von Streifen- und Plattenprobekörper unter der dritten Wurzel infolge der Herleitung über das Flächenträgheitsmoment multipliziert. Dies führt bei einigen Gitterrostgruppen zu besseren Übereinstimmungen mit den Versuchsergebnissen. Die abgewandelten effektiven Tragstabhöhen für die Gitterrostplatten sind in der Tabelle in Anhang A.2 aufgeführt.

Des Weiteren verhilft die Belastung der Randknoten statt einer vollflächigen Belastung unter dem Lastwürfel zu einer höheren Genauigkeit der FE-Ergebnisse. Dieses Phänomen ist bereits in Kapitel 2.4 und Abbildung 2-10 beschrieben worden und kann auch in den Versuchen beobachtet werden. Die Tragstäbe erfahren aufgrund der Durchbiegung eine Krümmung, wodurch der Kontakt zur Unterfläche des Lastwürfels ab einer gewissen Durchbiegung verloren geht und lediglich die Außenkanten die Kräfte in die Tragstäbe weiter einleiten. In der FE-Modellierung ist ein Wechsel der Lasteinleitung jedoch schwer möglich, weshalb nur einer der beiden Ansätze in die Berechnung einfließen kann. Bei dem Vergleich beider Ansätze für den ersten Probekörper in Abbildung 5-5 ist zu erkennen, dass die Steigung des elastischen Bereichs geringer ist, der Übergang in die plastische Verformung bei einer vollflächigen Belastung früher eintritt und die Traglast niedriger ausfällt. Da bei einer Betrachtung aller FE-Kurven in Anhang A.6 die Berechnung mit der Lasteinleitung in die Randknoten mal über und mal unterhalb der Traglastkurve des Experiments liegt, ist dieser Ansatz der genauere und wird für die weiteren Berechnungen gewählt.

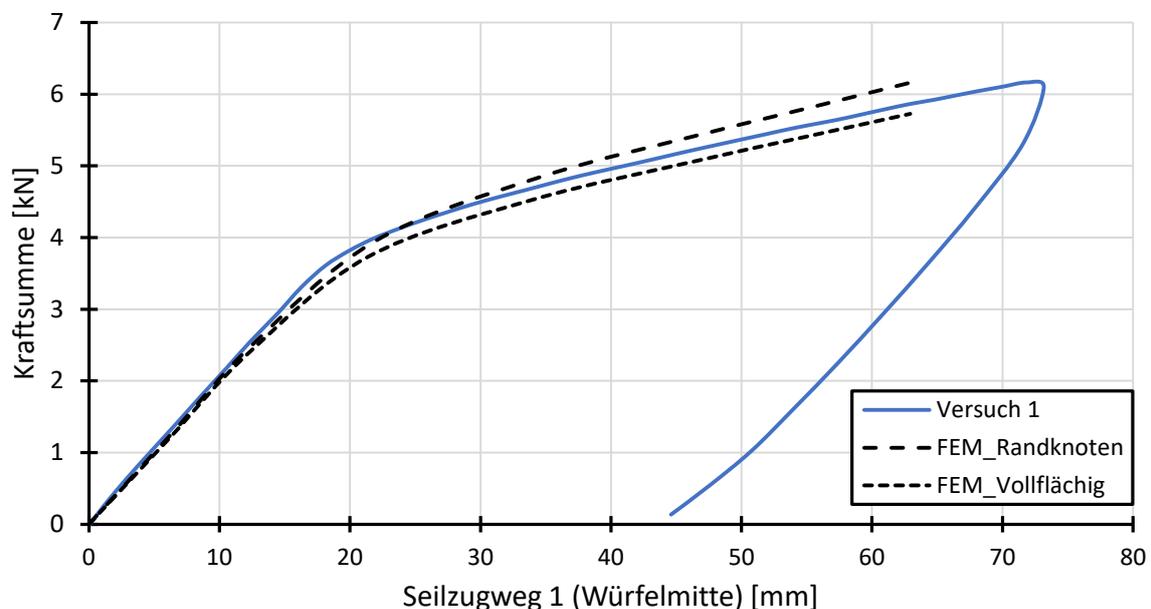


Abbildung 5-5: Vergleich von der Lasteinleitung über die Randknoten und die volle Fläche

Ähnlich zu der Genauigkeit der numerischen Berechnungen unter der Würfelmitte sieht auch die Übereinstimmung der Ergebnisse im Kraft-Verformungs-Diagramm für den Rand in Abbildung 5-6 aus. Dies ist wichtig, da so sichergestellt ist, dass auch die Schiefstellung der Plattenebene im Einflussbereich der Lasteinleitung richtig abgebildet wird und die Anzahl an mittragenden Stäben über die numerische Lösung möglichst genau ermittelt werden kann.

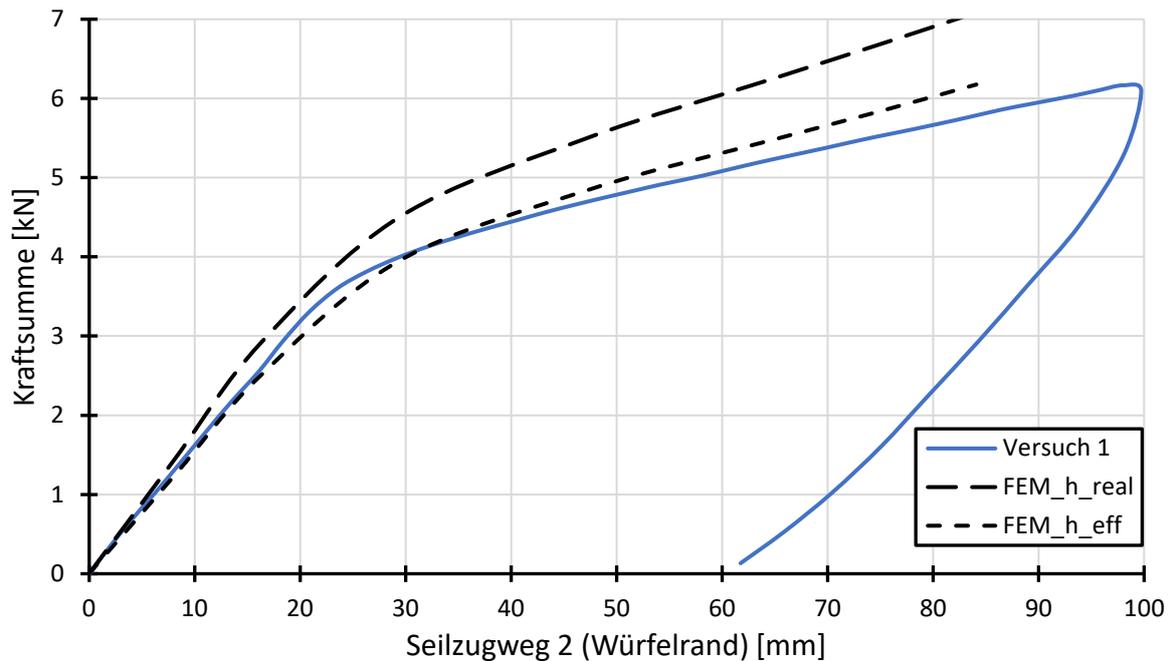


Abbildung 5-6: Gegenüberstellung der numerischen und experimentellen Ergebnisse (Rand)

Zudem stimmt somit auch die in Kapitel 4.3.2 ermittelte Steigung des elastischen Bereichs und die daraus berechnete effektive Biegesteifigkeit zwischen der experimentellen und numerischen Lösung überein, sodass der zweite Ansatz mithilfe der numerisch ermittelten Spannung im höchstbelasteten Tragstab, wie es in [8] bereits am mittleren Tragstab umgesetzt wurde, verfolgt und mit dem Ansatz der effektiven Biegesteifigkeit verglichen werden kann. Dazu wird ein Zeitpunkt i gewählt, an dem die Spannung σ_i in dem Tragstab geringer als die zum Material zugehörige Fließspannung f_y ist. Aufgrund des linear elastischen Verhaltens bis zum Erreichen dieser Grenzspannung kann die Kraft zu diesem Zeitpunkt hochgerechnet werden, bei dem der Tragstab in den Randfasern die Fließspannung erreicht. Die Formel zur Berechnung dieser elastischen Tragfähigkeit bezogen auf die gesamte Gitterrostplatte ist in Gleichung (5.1) gegeben.

$$F_{el} = \frac{f_y}{\sigma_i} \cdot F_i \quad (5.1)$$

Zur Berechnung einer Anzahl von mittragenden Stäben n beziehungsweise m ist in diesem Fall die Momententragfähigkeit des Gitterrostes mit der Momententragfähigkeit eines einzelnen Tragstabes zu vergleichen. Die Momententragfähigkeit des Gitterrostes errechnet sich für das vorhandene statische System analog zur Gleichung (2.5) aus der RAL-GZ [1] in Abhängigkeit der Stützweite L und der Lastwürfelbreite b_{LW} nach folgender Gleichung (5.2):

$$M_{el,ges} = \frac{F_{el} \cdot (L - b_{LW}/2)}{4} \quad (5.2)$$

Die Momententragfähigkeit eines einzelnen Tragstabes kann dagegen mithilfe der Formel für Rechteckquerschnitte aus Stahl durch Gleichung (5.3) ermittelt werden.

$$M_{el,TS} = \frac{h_{TS,eff}^2 \cdot b_{TS,vorh}}{6} \cdot f_y \quad (5.3)$$

Die Anzahl der mittragenden Stäbe n lässt sich schließlich mithilfe des Verhältnisses aus den beiden Tragfähigkeiten in Gleichung (5.4) bestimmen. Die mittragenden Stäbe m außerhalb der Lasteinleitungsfläche werden analog zur Gleichung (4.8) bestimmt.

$$n = \frac{M_{el,ges}}{M_{el,TS}} \quad (5.4)$$

Nach der tabellarischen Berechnung dieser Werte für alle Probekörper werden die Werte der beiden verschiedenen Ansätze in Abbildung 5-7 miteinander verglichen. Die durchgezogene Diagonale stellt in dem Graphen die exakte Genauigkeit zwischen den beiden Ansätzen dar und die zwei äußeren, gestrichelten Linien die Abweichung um zehn Prozent.

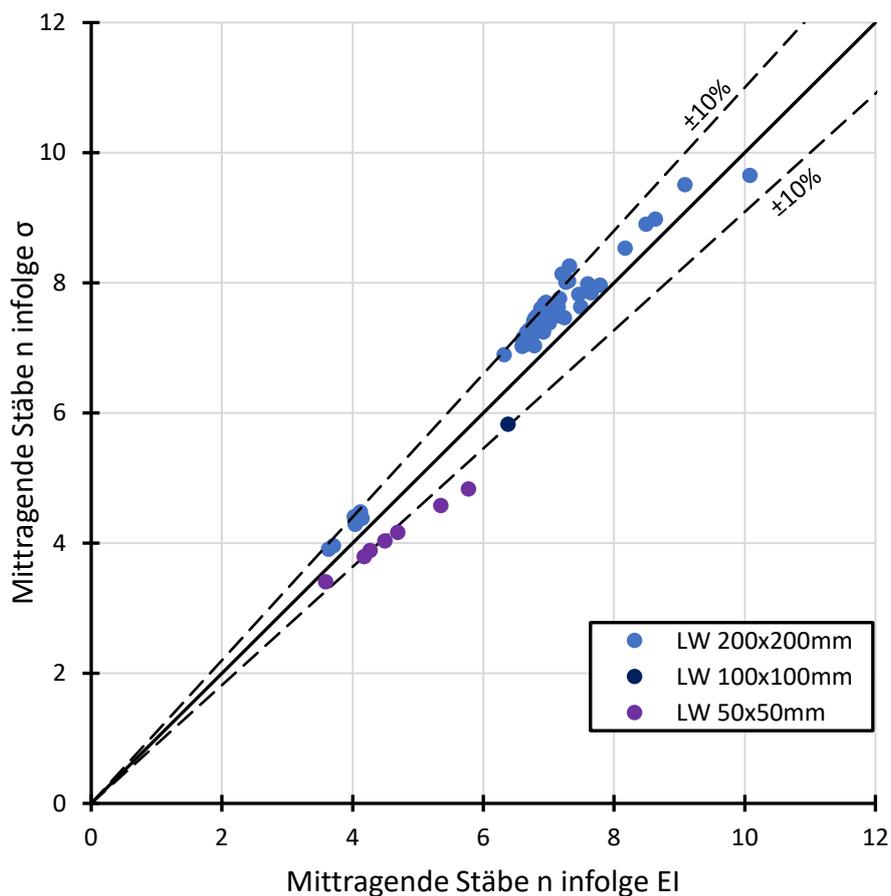


Abbildung 5-7: Vergleich der mittragenden Stäbe n in Folge Biegesteifigkeits- und Spannungsansatz

Zunächst fällt auf, dass auch hier eine Abhängigkeit von der Lastwürfelbreite besteht. In diesem Zusammenhang bedeutet dies, dass die Modellierung der Lasteinleitung nicht für beliebige Abmessungen der Realität entspricht. Wie jedoch schon zuvor bei dem Vergleich der numerischen und experimentellen Kurven herausgestellt wurde, ist es nicht möglich jeden Ein-

fluss realitätsnah und vor allem simultan zu erfassen, sodass bei der vorherrschenden maximalen Abweichung von etwa zehn Prozent in beide Richtungen die Genauigkeit im Toleranzbereich liegt.

Die Graphen der mittragenden Stäbe m in Kapitel 4.3.2 verändern sich mit den Werten des neuen Ansatzes insofern, dass die hohen Werte mit kleinen Lastwürfelabmessungen etwas verringert und die niedrigeren Werte mit einer großen Lastwürfelseitenlänge angehoben werden. Eine Ausnahme bildet wieder der Wert des Probekörpers 49, der als einziger Probekörper mit Lastwürfelseitenlängen von 200mm eine geringere Anzahl mittragender Stäbe n infolge des Ansatzes der Spannungen erhält. An der Tatsache, dass die Versuchsergebnisse große Abweichungen zu den Werten der bisherigen RAL-GZ [1] aufweisen, ändert sich jedoch nichts. Der graphische Vergleich der mittragenden Stäbe m mit dem alternativen Berechnungsansatz über die Spannungen ist in Anhang A.7 dargestellt.

5.3.2 Abbildung des Stabilitätsversagens

Einen weiteren wichtigen Punkt in der Nachrechnung der Versuchsergebnisse mit der Finite Elemente Methode stellt das Stabilitätsversagen dar. Wie in Kapitel 2.6 zur Stabilität bereits erläutert wurde, kommt es bei perfekt geraden Stäben mit uniaxialer Spannungsverteilung erst durch sehr hohe Belastungen zu einem Ausknicken. Jedoch erreichen Stäbe unter realen Bedingungen nicht ansatzweise diese theoretische Verzweigungslast, da Imperfektionen wie Stabkrümmungen oder Eigenspannungen und Schiefstellungen der Tragstäbe ein Ausknicken bei viel geringerer Kraft hervorrufen [25].

Die numerischen Lösungen zu den Gitterrostplatten mit hohen Maschenweiten wiesen jedoch bereits ohne zusätzlichen Einfluss von Imperfektionen ein Beulen der höchstbelasteten Tragstäbe und somit einen Abfall der Tragfähigkeit auf. In einer ersten Durchsicht der Ergebnisse erscheint dies zunächst nicht eindeutig klar zu sein. Allerdings stellt sich durch die Betrachtung der Verformungsfigur und der inneren Schnittgrößen heraus, dass die Schiefstellung der Plattenebene und die damit verbundene Schiefstellung der Tragstäbe für eine zusätzliche Belastung um die schwache Achse dieser Stäbe sorgt. Darüber hinaus wird die in den Experimenten erreichte, maximale Kraft in den meisten numerischen Berechnungen mit dem Modell ohne den Ansatz von Imperfektionen bereits sehr gut getroffen. Sowohl die Kraft als auch die vorhandene Durchbiegung zum Zeitpunkt des ersten Beulens stimmen meist mit denen der Versuchsergebnisse ausreichend überein. Zu erkennen ist dies beispielhaft in Abbildung 5-8 für Probekörper zwei und bei allen weiteren Probekörpern mit Stabilitätsversagen in den Graphen in Anhang A.6.

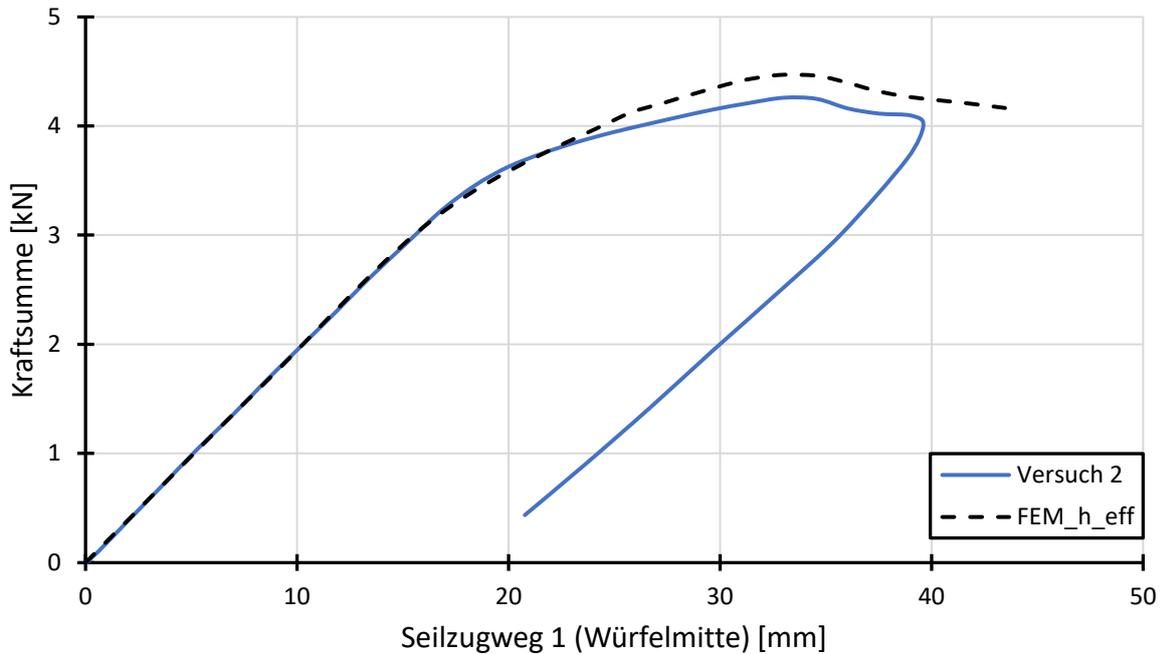


Abbildung 5-8: Vergleich der numerischen und experimentellen Ergebnisse von Probekörper 2

Ein Vergleich zu der numerischen Lösung derselben Gitterrostplatte mit Berücksichtigung von Stabimperfektionen zwischen $1/1000$ und $1/5000$ der Maschenweite zwischen den Querstäben ist in Abbildung 5-9 gegeben. Erwartungsgemäß erreichen die Kraft-Verformungs-Kurven unter Berücksichtigung von Imperfektionen früher ihre maximale Traglast gegenüber der Berechnung ohne Imperfektionen. Umso höher dabei die Stabimperfektionen gewählt sind, desto niedriger fällt die maximale Traglast aus. Aus diesem Grund stimmt die jeweils vorhandene Durchbiegung nicht mehr mit dem Versuch überein, jedoch kann für den zweiten Probekörper eine bessere Genauigkeit der maximalen Tragfähigkeit erreicht werden.

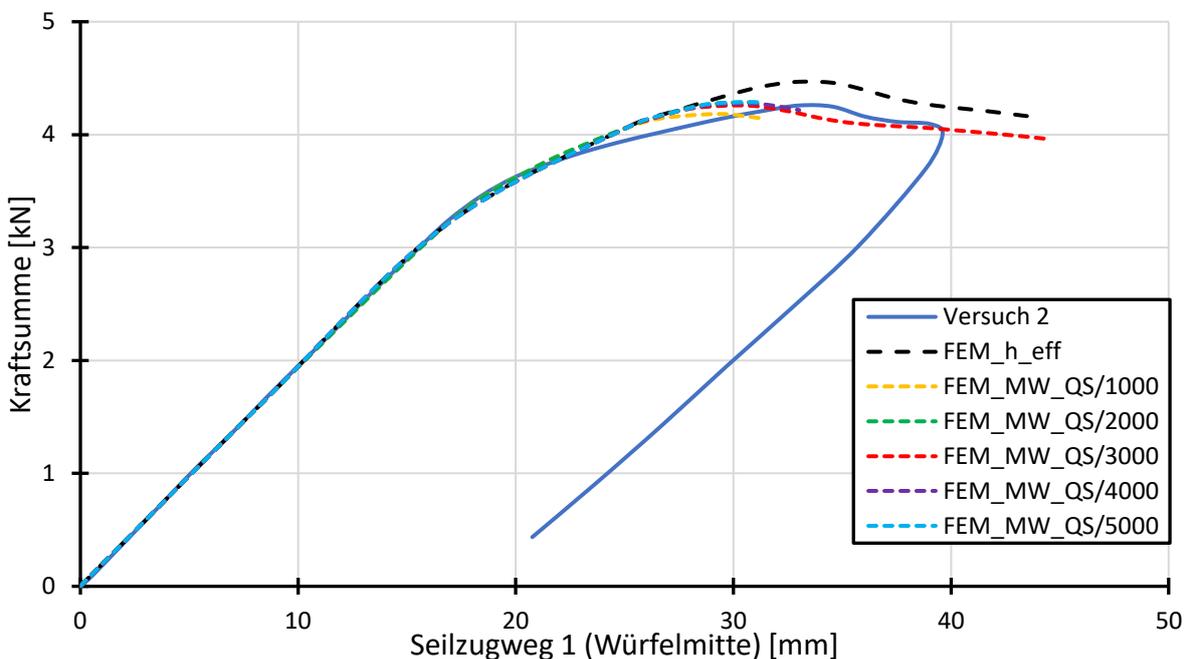


Abbildung 5-9: Vergleich des numerischen Ergebnisses mit und ohne Ansatz von Imperfektionen

Dieses Ergebnis ist hingegen nicht repräsentativ für alle Probekörper, da die im Versuch erreichte Maximallast für manche Probekörper auch über der numerischen Traglast ohne Berücksichtigung von Imperfektionen liegt. Dies zeigt die Gegenüberstellung in Abbildung 5-10, in der die erreichten Traglasten der experimentellen und der numerischen Ergebnisse ohne Einfluss durch Imperfektionen eingetragen sind. Viele Traglasten der Gitterrostplatten aus den numerischen Untersuchungen sind etwas höher als die zugehörigen experimentellen Traglasten, jedoch gibt es auch einige Gitterrostplatten, bei denen die numerischen Traglasten niedriger ausfallen. Letzterer Fall liegt für Parameterstudien auf der sicheren Seite, da die numerisch ermittelte Tragfähigkeit gegenüber der real möglichen Tragfähigkeit niedriger abgeschätzt wird. Insgesamt liegen die meisten zu vergleichenden Traglasten hingegen nicht weiter als zehn Prozent auseinander, wie der Bereich zwischen den zwei gestrichelten Linien zeigt.

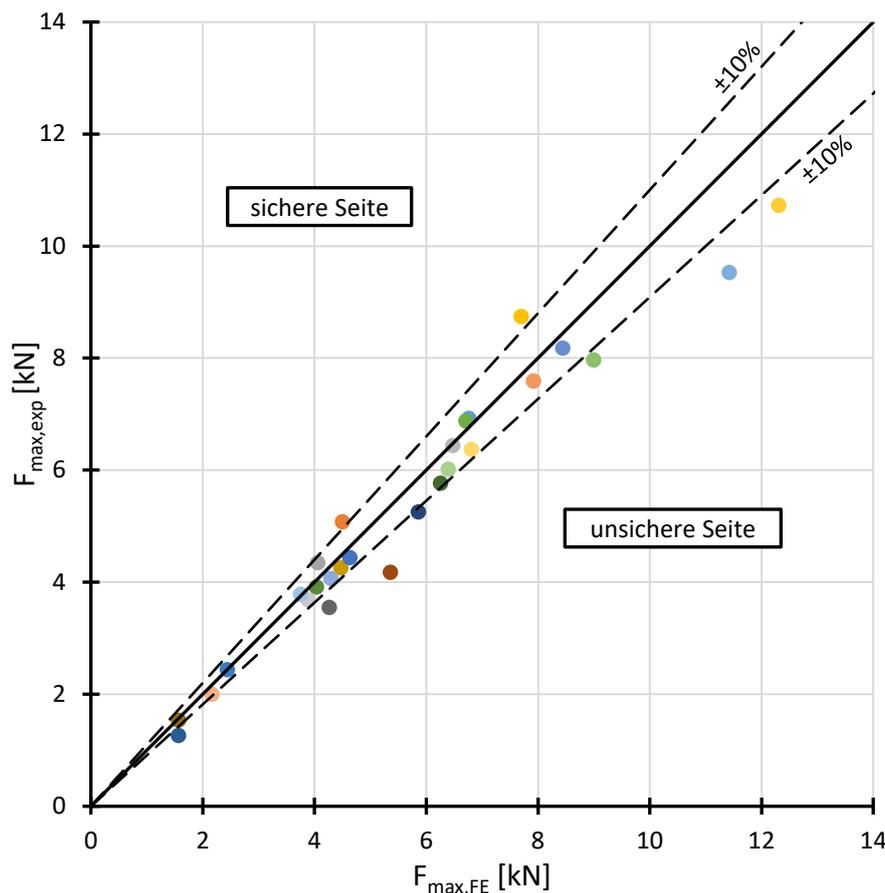


Abbildung 5-10: Vergleich numerisch und experimentell erreichter Lasten bei Stabilitätsversagen

Daher wird von einer weiteren Berücksichtigung der Imperfektionen in dem numerischen Modell und in der folgenden Parameterstudie abgesehen. Einerseits könnte der Einfluss von Imperfektionen für einige Probekörper, die in Abbildung 5-10 auf der unsicheren Seite liegen, die Traglasten aus den numerischen Untersuchungen im Vergleich zu den experimentellen Ergebnissen verbessern. Andererseits würden dadurch die bereits geringeren numerischen Traglasten noch weiter reduziert sowie stärkere Abweichungen von der Realität erzeugt werden und die Streuung der Ergebnisse würde deutlich anwachsen.

5.4 Parameterstudien

In dem nächsten Schritt kann auf Grundlage des validierten FE-Modells eine Reihe von weiteren, bisher nicht betrachteten Gitterrostkonfigurationen gerechnet und untersucht werden. In Anbetracht der vorherigen Versuchsergebnisse sind insbesondere die Querverteilung durch die verschiedenen Querstababmessungen und die daraus resultierende Anzahl der mittragenden Stäbe sowie das Auftreten des Stabilitätsversagens für unterschiedlich schlanke Abmessungen interessant. Insbesondere können durch diese numerischen Studien im Übergangsbereich zwischen dem elastischen und plastischen Tragverhalten, wo das Stabilitätsversagen dominiert, die geometrischen Einflüsse des Gitterrostes genauer untersucht und gegebenenfalls identifiziert werden. Im Folgenden wird dazu aufgeführt, welche weiteren Konfigurationen von Gitterrostplatten dafür untersucht und im Anschluss ausgewertet werden.

5.4.1 Durchgeführte Studien

Insgesamt werden neun verschiedene Parameterstudien mit unterschiedlich vielen numerischen Probekörpern durchgeführt. Eine Übersicht über diese Studien mit dem verwendeten Material, den variabel gehaltenen Größen und der Anzahl der Probekörper ist in Tabelle 5-1 gegeben. Die Lastwürfelbreite wird aufgrund der einfacheren Modellierung und Ergebnisauswertung sowie der Wichtigkeit für die neue Bemessungsnorm in allen Parameterstudien zu 200mm Seitenlänge festgelegt. Für die Materialien werden passende Materialmodelle aus den vorhandenen Zugprobenversuchen gewählt.

Tabelle 5-1: Übersicht zu den durchgeführten Parameterstudien in Ansys

Nr.	Material	Variable	Anzahl
1	S235	Querstabhöhe von 2mm bis 30mm (Tragstabhöhe) in 2mm-Schritten erhöhen	15
2	S235	Verschiedene Maschenweiten zwischen den Querstäben von 10 bis 200mm	24
3	S355	Verschiedene Maschenweiten zwischen den Querstäben von 10 bis 200mm	24
4	S460	Verschiedene Maschenweiten zwischen den Querstäben von 10 bis 200mm	24
5	S235	Variation der Tragstababmessungen ($h_{TS}=20$ bis 50mm) mit jeweils sinnvollen Querstababmessungen und verschiedenen Querstabmaschenweiten	56
6	S460	Variation der Tragstababmessungen ($h_{TS}=20$ bis 50mm) mit jeweils sinnvollen Querstababmessungen und verschiedenen Querstabmaschenweiten	56
7	S235	Variation der Plattenbreite ($B=1200$ bis 300mm) und der Querstabmaschenweite bei einer Stützweite von 1200mm	40
8	S235	Variation der Plattenbreite ($B=1200$ bis 300mm) und der Querstabmaschenweite bei einer Stützweite von 1000mm	40
9	S235	Variation der Plattenbreite ($B=1200$ bis 300mm) und der Querstabmaschenweite bei einer Stützweite von 800mm	40

In der ersten Parameterstudie wird der Einfluss des Trägheitsmomentes von den Querstäben auf die Querverteilung beziehungsweise auf die mittragende Anzahl der Tragstäbe untersucht. Dazu bleiben die Tragstababmessung mit 30x2mm sowie die Maschenteilungen zwischen Trag- und Querstäben von 33x100mm gleich, sodass keine anderen Einflüsse betrachtet und lediglich die Verhältnisse der Trägheitsmomente variiert werden.

Mithilfe der Parameterstudien zwei bis vier sollen viele weitere Maschenteilungen und dadurch unterschiedlich schlanke Geometrien untersucht werden. Interessant ist demnach vor allem das Auftreten des Stabilitätsversagens, welches sowohl durch unterschiedlich große Feldlängen zwischen den Querstäben als auch durch verschieden hohe Festigkeiten beeinflusst wird. Die Tragstäbe und Querstäbe werden dazu mit denselben Größen angenommen, wie sie in der Versuchsserie eins vorhanden sind.

Einen weiteren Einfluss auf die Stabilität besitzt die Tragstabhöhe, welche in den Parameterstudien fünf und sechs variiert wird. Da unterschiedlich hohe Tragstäbe laut der RAL-GZ für Gitterroste [1] verschieden große Stabbreiten sowie Querstababmessungen erfordern, werden diese entsprechend variiert. Zudem werden je Tragstabhöhe acht verschiedene Querstabmaschenweiten betrachtet, welche allesamt ein Vielfaches der Lastwürfelseitenlänge von 200mm sind.

In den letzten drei Parameterstudien werden die Plattenbreiten für drei verschiedene Stützweiten immer weiter verringert, bis sie nahezu so breit wie die Lastwürfel sind. Dazu werden die vier typischen Maschenteilungen 11, 33, 66 und 100mm zwischen den Querstäben je Gitterrostabmessung untersucht. Dadurch wird erneut eine Vielzahl an Werten für die mittragenden Stäbe erzeugt und eine Untersuchung des Einflusses der verfügbaren Gitterrostbreite vorgenommen.

Insgesamt ist die Zielsetzung, die bisherigen Annahmen für die Anzahl der mittragenden Stäbe n und m zu bestätigen und im Weiteren eine hohe Anzahl an Versuchswerten für die Untersuchung des Stabilitätsphänomens zu erlangen.

5.4.2 Ergebnisse der Parameterstudien

Zur Auswertung der numerischen Ergebnisse werden analog zur Nachrechnung der Versuchsergebnisse die aufgebrachten Kräfte und die Durchbiegungen an den zwei betrachteten Punkten unter der Lasteinleitungsfläche abgespeichert und in vorgefertigte *Excel*-Tabellen exportiert. Dort werden anschließend die Steigung im elastischen Bereich sowie die erreichte Traglast ermittelt und die graphische Darstellung der numerischen Kraft-Verformungs-Kurven vorgenommen. Auf Letztere wird im Folgenden für die verschiedenen Parameterstudien zuerst eingegangen.

5.4.2.1 Parameterstudie zur Querverteilung durch die Querstäbe

Die Variation der Querstabhöhe in der ersten Parameterstudie ergibt erwartungsgemäß unterschiedlich hohe Gesamtlasten und Steigungen im elastischen Bereich geordnet nach der Größe der Querstäbe, wie es in Abbildung 5-11 zu erkennen ist. Der parametrische Probekörper eins, der aufgrund seiner Querstabseitenlängen von zwei Millimetern einem Schweißpressrost ähnelt, besitzt die geringste Querverteilung und daher auch die geringste Traglast, da die Tragstäbe unter der Lasteinleitungsfläche nahezu die gesamte Belastung aufnehmen.

Die Probekörper, die eine Querstabhöhe gleich oder annähernd gleich der Tragstabhöhe besitzen, weisen dagegen die höchste Lastverteilung auf die weiteren Tragstäbe auf und können dadurch die insgesamt höchste Last aushalten. Dazwischen reihen sich die Ergebnisse im Verhältnis zu der erreichten Last und der bei Versagen vorhandenen Durchbiegung nahezu linear ansteigend in das Gesamtbild ein.

Die unterschiedlich langen Kurven nach Erreichen der Traglast hängen mit der Konvergenzfindung des Programms *Ansys* [23] und dem damit verbundenen Abbruchkriterium zusammen. Die Software berechnet anhand der Belastung im Zusammenhang mit dem gewählten Mesh an Elementen und Knoten für jeden Zeitschritt das innere Gleichgewicht am System. Falls kein Gleichgewicht gefunden werden kann, weil beispielsweise aufgrund eines Stabilitätsversagens beliebig große Verformungen entstehen, wird die Berechnung abgebrochen. Da ein Abbruch jedoch immer erst nach Erreichen der Traglast geschieht, werden die relevanten Ergebnisse nicht beeinflusst.

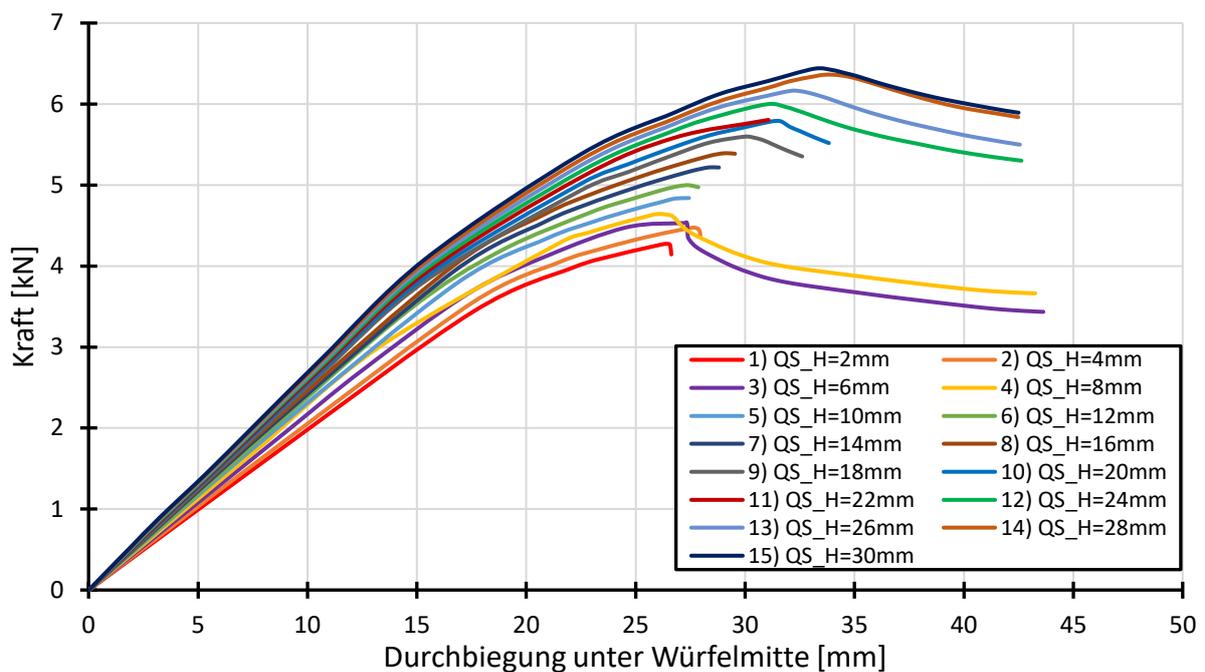


Abbildung 5-11: Last-Verformungs-Diagramm zur ersten Parameterstudie

In dieser numerischen Versuchsreihe entsprechen die verwendeten Materialien für die Trag- und Querstäbe denen der Gruppe 25-30. Da die Querstäbe dadurch eine wesentlich höhere Fließspannung besitzen und dies für die großen Querstabhöhen nicht den realen Bedingungen wie bei den Vollrosten entspricht, wird der Einfluss des Querstabmaterials ebenfalls noch untersucht. Dazu werden bei der größten Querstabhöhe des numerischen Probekörpers 15 in Abbildung 5-12 die Ergebnisse von der Gitterrostplatte mit für die Querstäbe verwendetem Querstab- und Tragstabmaterial verglichen.

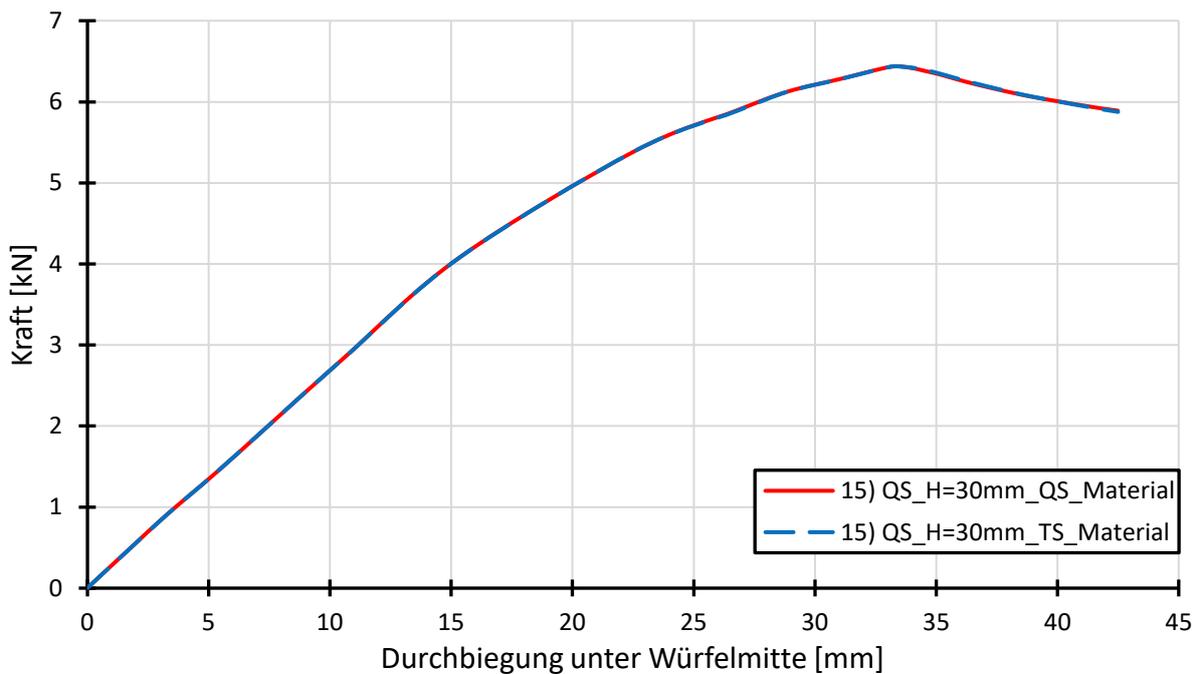


Abbildung 5-12: Last-Verformungs-Diagramm des Probekörpers 15 mit verschiedenen Materialien

Da die zwei Kurven selbst bei dem auftretenden Stabilitätsversagen nahezu exakt übereinander liegen, ist der Einfluss des Materials vernachlässigbar. Eventuell kommt es bei geringeren Maschenteilungen zum Fließen des Querstabmaterials, jedoch ist dies für die zu berechnende Traglast und die Einschätzung des Stabilitätsversagens irrelevant.

5.4.2.2 Parameterstudien zu verschiedenen Maschenweiten

Bei den Parameterstudien zwei bis vier wird die Untersuchung des Einflusses der Maschenweiten und der Fließspannung auf die Querverteilung und die Traglast erweitert. Auch hier sind die Zusammenhänge zwischen der Maschenteilung und der Steigung im elastischen Bereich sowie bei der maximal erreichten Traglast in Abbildung 5-13 für den Baustahl S235 zu erkennen. Je niedriger der Abstand zwischen den Querstäben ist, desto höher ist die Steigung im elastischen Bereich und somit auch die errechnete Biegesteifigkeit. Die erreichte Traglast ist aufgrund dessen ebenfalls höher. Zusätzlich fällt auf, dass die parametrischen Probekörper mit Maschenteilungen kleiner 33mm die aufgebrachte Durchbiegung von knapp über 60mm ohne Stabilitätsversagen der Tragstäbe mitgehen. Erst bei größeren Maschenteilungen fangen die Tragstäbe an zu beulen, wobei die weitere Erhöhung der Maschenweiten zu immer früherem Beulen führt. Die Probekörper mit Maschenweiten von 150 oder sogar 200mm erreichen ihre Traglast sogar bereits am Ende des linear elastischen Bereichs.

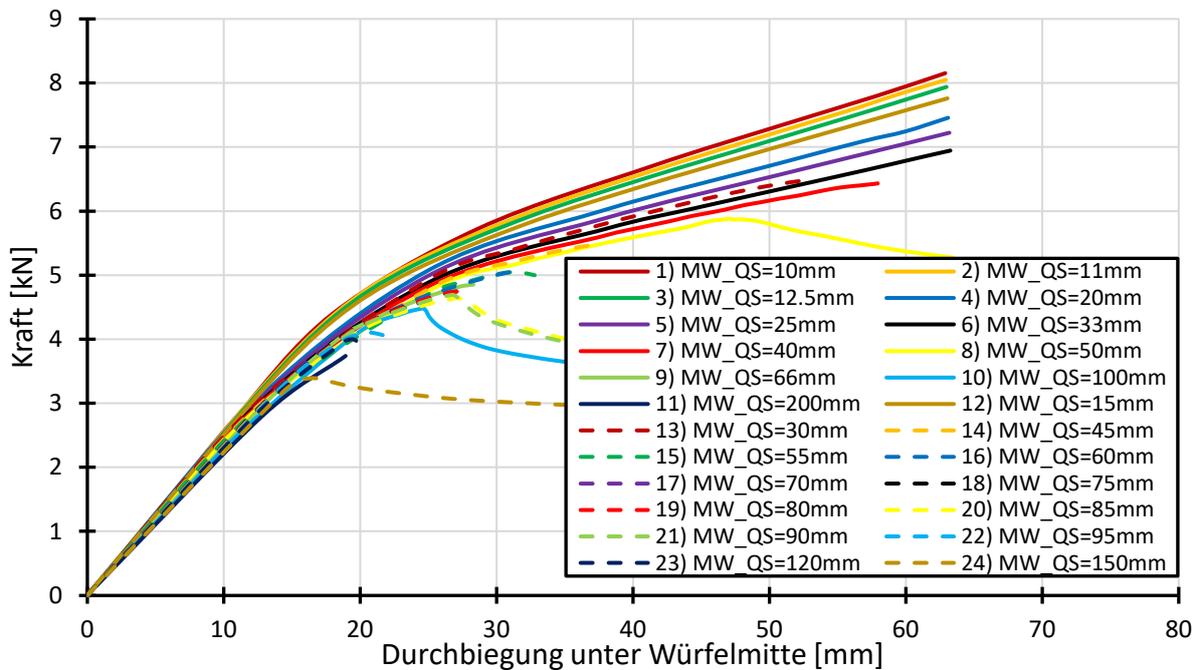


Abbildung 5-13: Last-Verformungs-Diagramm zur zweiten Parameterstudie

Die Kraft-Verformungs-Diagramme zu den weiteren Baustählen S355 und S460 ergeben ein ähnliches Bild, wobei die maximalen Traglasten für hohe Maschenteilungen teilweise bereits vor Erreichen der elastischen Grenzlast auftritt. Dies hängt mit der höheren Festigkeit des Materials und der damit verbundenen, höheren allgemeinen Tragfähigkeit der Gitterrostplatte bei gleichbleibender Tragstabgeometrie und gleichen Feldlänge zwischen den Querstäben zusammen. Die dazu durchgeführten Parameterstudien sind in den Graphen in Anhang A.8 dargestellt.

5.4.2.3 Parameterstudien zu verschiedenen Tragstababmessungen

Die fünfte und sechste Parameterstudie beschäftigt sich in erster Linie mit der Variation der Tragstabhöhe, wodurch sowohl verschieden hohe Tragfähigkeiten als auch unterschiedlich schlanke Geometrien erzeugt werden. Zusammen mit acht unterschiedlichen Maschenweiten zwischen den Querstäben je Tragstabhöhe werden viele zusätzliche, numerische Probekörper sowohl mit als auch ohne Stabilitätsversagen erzeugt. Um eine gewisse Proportionalität beizubehalten, werden die Tragstabbreite und die Querstababmessungen entsprechend der Tragstabhöhe angepasst.

Abbildung 5-14 zeigt die Last-Verformungs-Diagramme zu den numerischen Probekörpern aus einem Baustahl S235. Die Kurven lassen sich aufgrund der steigenden Tragstabhöhe und der damit zusammenhängenden erhöhten Tragfähigkeit in sieben Gruppen mit je acht verschiedenen Traglastverläufen aufteilen. Die Gitterroste mit der niedrigsten Tragstabhöhe von 20mm weisen die geringste Tragfähigkeit auf und lassen sich weiter nach der Maschenweite unterscheiden, bei der das Gitterrost mit der engsten Maschenteilung von 11mm die höchste Tragfähigkeit aufgrund der besten Querverteilung durch die vielen Querstäbe besitzt. Die Git-

terroste mit den hohen Maschenteilungen weisen wiederum bereits bei dieser geringen Tragstabhöhe ein Stabilitätsversagen auf und erreichen nicht annähernd die Tragfähigkeit der Gitterroste mit niedrigen Maschenweiten.

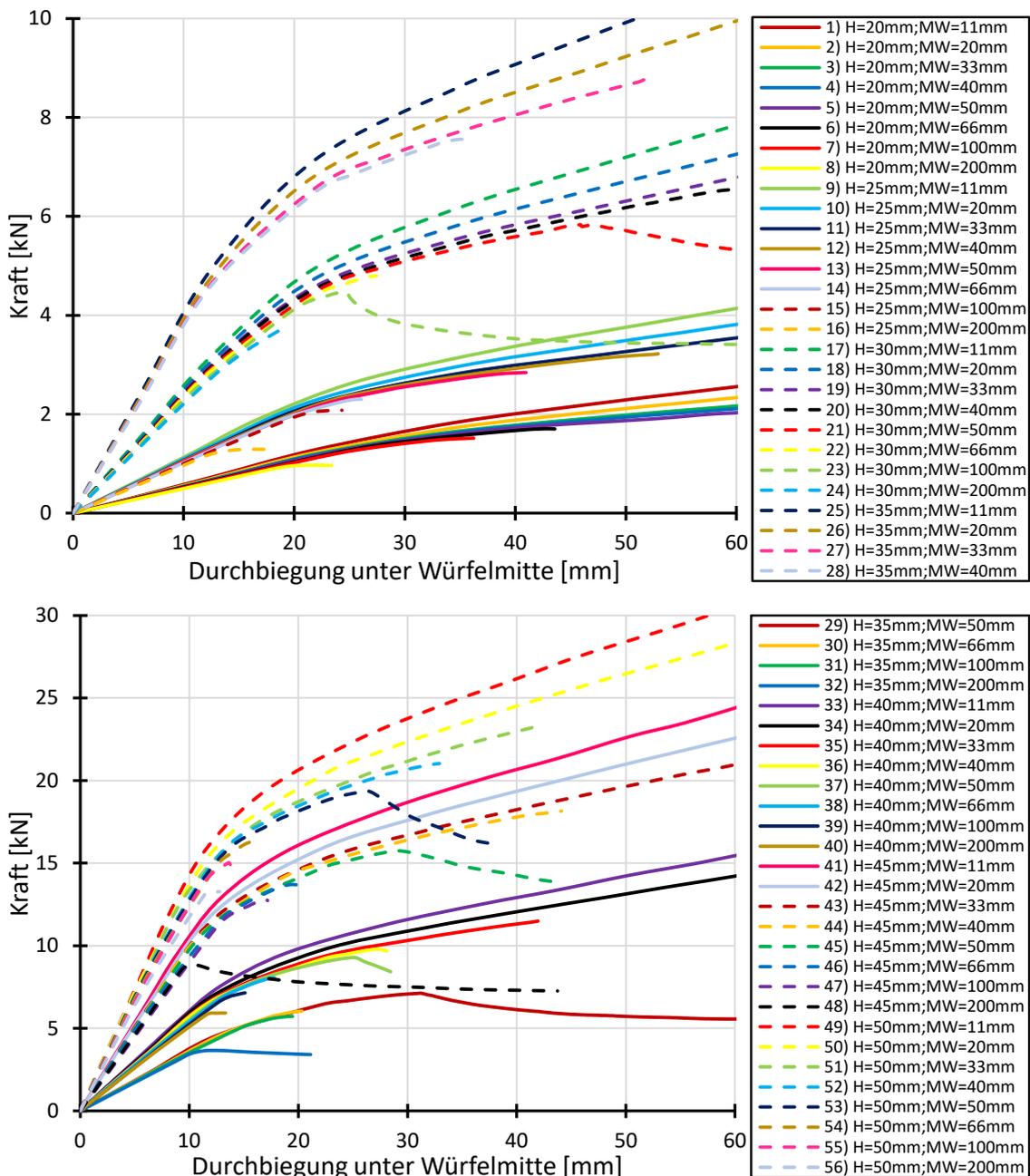


Abbildung 5-14: Last-Verformungs-Diagramme zur fünften Parameterstudie

Dieselben Zusammenhänge gelten für alle weiteren Tragstabhöhen, da sich lediglich die Biegesteifigkeit der Gitterrostplatte aufgrund der erhöhten Abmessungen von Trag- und Querstäben und daher auch die Tragfähigkeit jedes Gitterrostes erhöhen. Weiterhin nimmt scheinbar auch die Schlankheit der Geometrien zu, da bei großen Stababmessungen ein Stabilitätsversagen bereits bei niedrigeren Maschenweiten ab 33mm auftritt.

Ein ähnliches Bild mit erhöhten Lasten und teils früherem Ausknicken der Tragstäbe weist die Parameterstudie mit dem Baustahl S460 auf, welche in Anhang A.8 beigefügt ist.

5.4.2.4 Parameterstudien zur Variation der Plattenabmessungen

In der siebten bis neunten Parameterstudie wird zuletzt der Einfluss der Plattenbreite und Stützweite auf die Anzahl der mittragenden Stäbe für vier verschiedene Maschenweiten untersucht. Abbildung 5-15 zeigt die Ergebnisse für die Gitterroste mit einer Stützweite von 1200mm. Wie bei den vorherigen Parameterstudien ist die Abhängigkeit der elastischen Steigung und allgemeinen Tragfähigkeit von der Maschenweite zu erkennen, da die Gitterroste mit der geringsten Maschenteilung die Kurven mit der höchsten Belastbarkeit darstellen. Die weiteren Gitterroste mit derselben Maschenteilung stufen sich nach der abnehmenden Plattenbreite ab.

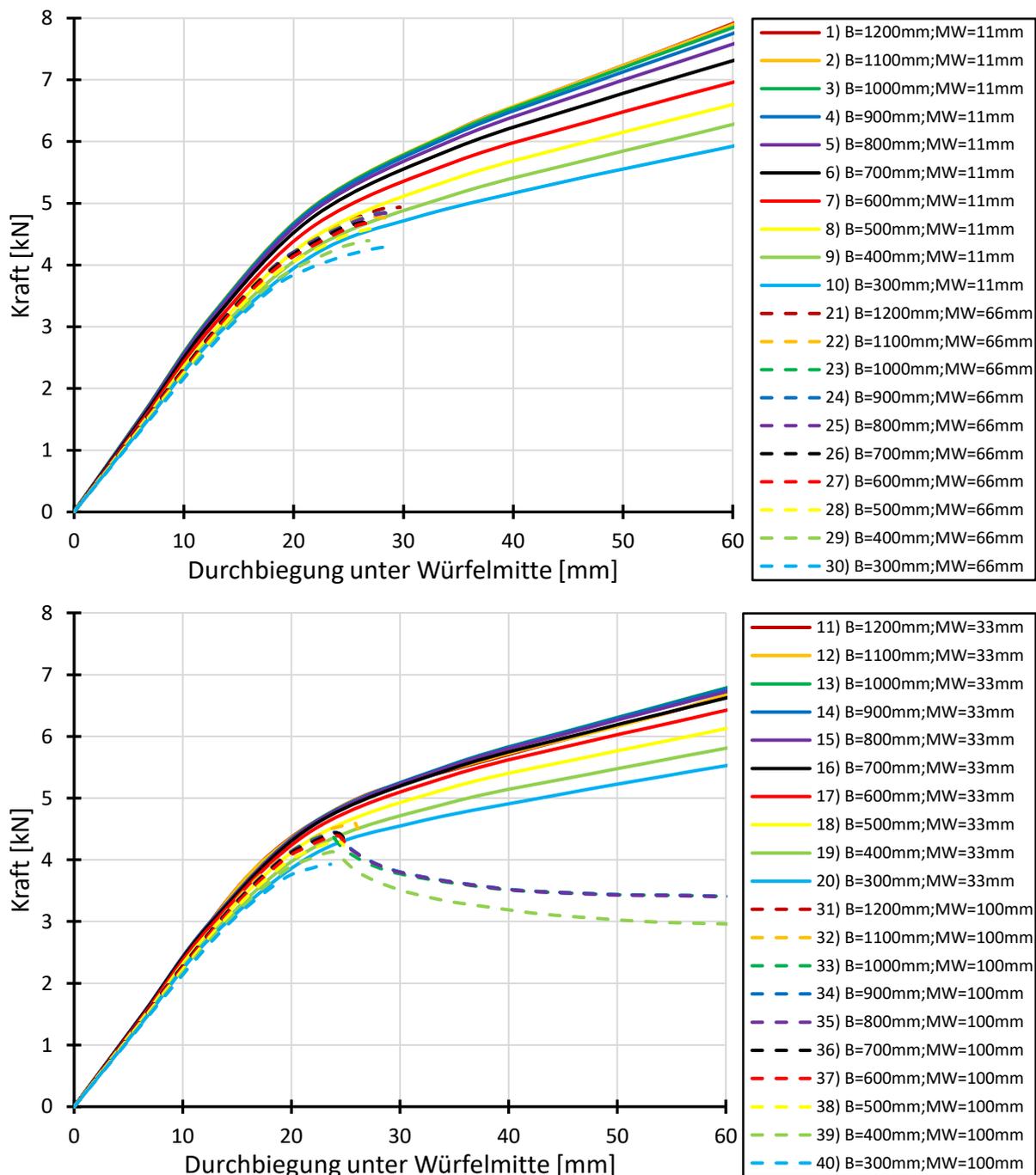


Abbildung 5-15: Last-Verformungs-Diagramme zur siebten Parameterstudie

Weiterhin werden die Unterschiede zwischen den elastischen Steigungen bei abnehmender Plattenbreite größer, bis die geringste Breite von 300mm erreicht ist. Dies liegt daran, dass die Anzahl mittragender Stäbe maßgeblich durch die Tragstäbe unter und unmittelbar neben der Lasteinleitungsfläche bestimmt wird. Umso weiter die Tragstäbe von der Lasteinleitung weg liegen, desto geringer ist der Traganteil dieser Stäbe. Ab einer bestimmten Breite ist die Querverteilung schließlich zu gering, um weitere Tragstäbe zu aktivieren. Diese Stäbe bleiben in ihrer ursprünglichen Lage unverändert oder heben aufgrund der Kippbewegung der Plattenebene sogar etwas ab. Eine weitere Zunahme der Plattenbreite wäre für die Tragfähigkeit der Gitterrostplatte daher ohne Mehrwert.

Bei den numerischen Probekörpern mit den zwei höheren Maschenteilungen 66 und 100mm ergeben sich ähnliche Zusammenhänge, wobei die Unterschiede zwischen den einzelnen Kurven aufgrund des verfrühten Versagens und der generell niedrigeren Querverteilung geringer ausfallen. Für die zwei weiteren Stützweiten sehen die Zusammenhänge wiederum ähnlich aus mit Ausnahme der höheren erreichten Traglast aufgrund der geringeren Spannweite der Gitterroste. Die Graphen der beiden letzten Parameterstudien sind ebenfalls in Anhang A.8 dargestellt.

5.4.3 Auswertung der numerischen Ergebnisse

Ein Grund zur Erweiterung der Versuchsergebnisse mit numerischen Parameterstudien ist die Ableitung beziehungsweise Bestätigung von unterschiedlichen Einflussgrößen auf die Anzahl der mittragenden Stäbe n , mithilfe derer die Tragfähigkeit von Gitterrosten unter einer Einzelbelastung analog zur bisherigen RAL-GZ [1] ermittelt wird. In Kapitel 4.3.2 sind dazu bereits Zusammenhänge erkannt worden, die durch die Parameterstudien nun erweitert werden.

Die mittragenden Stäbe n und m können wieder mithilfe der Biegesteifigkeit nach Gleichungen (4.6) bis (4.8) beziehungsweise der vorhandenen Spannung im Randtragstab nach Gleichungen (5.1) bis (5.4) ermittelt werden. Im Falle des Ansatzes der Biegesteifigkeit kann die Referenzgröße EI_{Streifen} nun umgekehrt berechnet werden, indem die in den Parameterstudien angesetzte Tragstabhöhe in das Flächenträgheitsmoment umgewandelt und mit dem nominellen Wert des E-Moduls für Stahl multipliziert wird. Da die effektiven Tragstabhöhen aus den Versuchen für die numerischen Berechnungen der Plattenversuche angesetzt wurden, ist diese Größe äquivalent zu den angenommenen, glatten Werten in der Parameterstudie. Somit ist auch die hieraus ermittelte Referenzbiegesteifigkeit EI_{Streifen} dieselbe Vergleichsgröße und kann deshalb zur Ermittlung der Anzahl mittragender Stäbe angesetzt werden.

Zur Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Versuchen und Parameterstudie wird dieselbe graphische Darstellung wie in Kapitel 4.3.2 gewählt. Diese berücksichtigt Steifigkeits- und Maschenweitenverhältnisse und wird nun mit den Punkten aus den Parameterstudien ergänzt. Da die Zusammenhänge dieser Verhältnisse mit den verschiedenen Gitterrosttypen sehr auffällig waren, wird in Abbildung 5-16 zunächst nur das Ergebnis der ersten Parameterstudie, dessen Probekörper die Eigenschaften aller drei Gitterrosttypen aufweisen, hinzugefügt.

Diese zeigen eine große Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen, da sich die Anzahl der mittragenden Stäbe m durch die Variation der Querstabgrößen exakt nach den entsprechenden Gitterrosttypen einfügt. Bei gleicher Querstab- und Tragstabhöhe fügt sich der höchste Punkt der Parameterstudie an die in einer Geraden liegenden Versuchspunkte der Vollroste an und die stetige Verringerung der Querstabhöhe führt zur Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Pressroste. Selbst der Anstieg der mittragenden Stäbe bei den Schweißpressrosten für sehr geringe Steifigkeitsverhältnisse ist in der numerischen Lösung vorhanden.

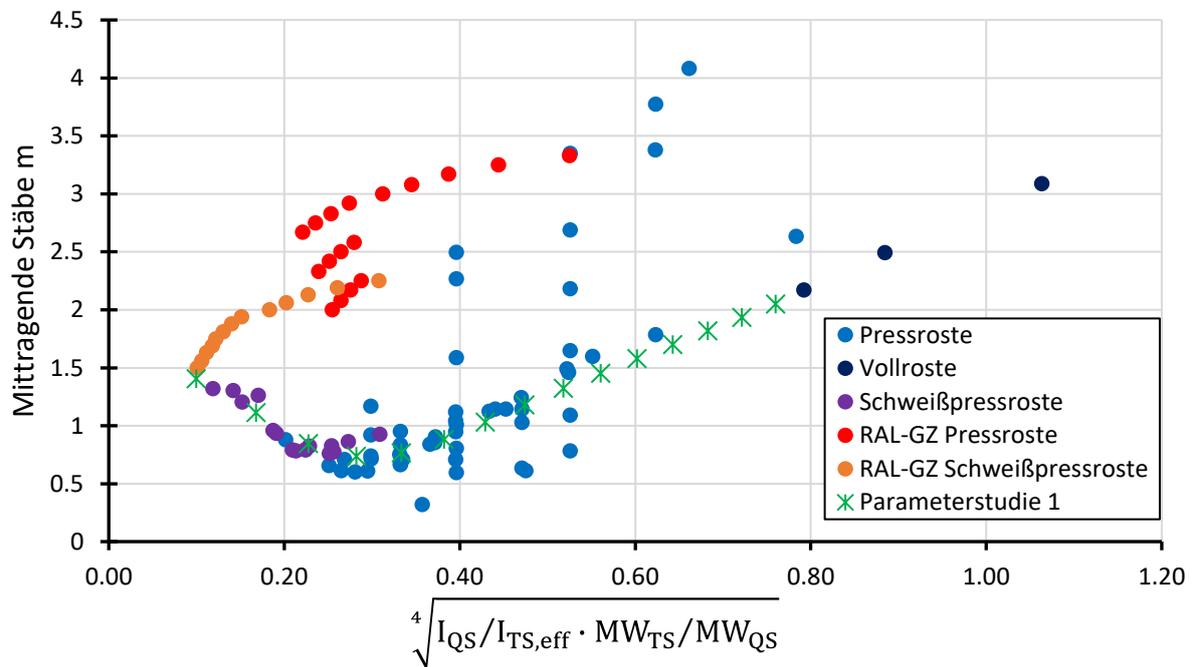


Abbildung 5-16: Mittragende Stäbe der Versuche, Parameterstudie 1 und Bemessungsnorm

Das Hinzufügen aller weiteren Parameterstudien in Abbildung 5-17 ergibt ein dazu passendes Bild. Die Geometrien in den weiteren Parameterstudien sind allesamt angelehnt an die Proportionen von Pressrosten und ordnen sich entsprechend ein. Die Punktedichte ist dabei nun sehr hoch und weist trotzdem nur eine geringe Streuung der Werte auf. Die weiteren Parameterstudien mit höherer Baustahlfestigkeit sind zudem nicht dargestellt, da die Werte mit den Ergebnissen der niedrigeren Baustähle exakt übereinstimmen. Dies resultiert aus der Herleitung der mittragenden Stäbe n , die in diesem Fall mit der Biegesteifigkeit ermittelt werden und dort kein Einfluss der Fließspannung besteht. Dennoch würde auch die alternative Berechnung über die Spannungen diese Unabhängigkeit aufweisen, da sich die Fließspannung in dem Verhältnis der Tragfähigkeiten von der Gitterrostplatte und einem Tragstab herauskürzt.

Die siebte Parameterstudie zeigt darüber hinaus das bereits erwartete Verhalten aufgrund der abnehmenden elastischen Steigung für geringere Plattenbreiten. Die vier verschiedenen untersuchten Maschenweiten erzeugen die vier unterschiedlichen Verhältnismäßigkeiten bei ansonsten gleichbleibender Steifigkeit. Für die hohen Plattenbreiten sind mehrere Punkte nah beieinander und besitzen eine verhältnismäßig hohe Anzahl an mittragenden Stäben, wogegen die niedrigeren Breiten in einer geringeren Anzahl m resultiert.

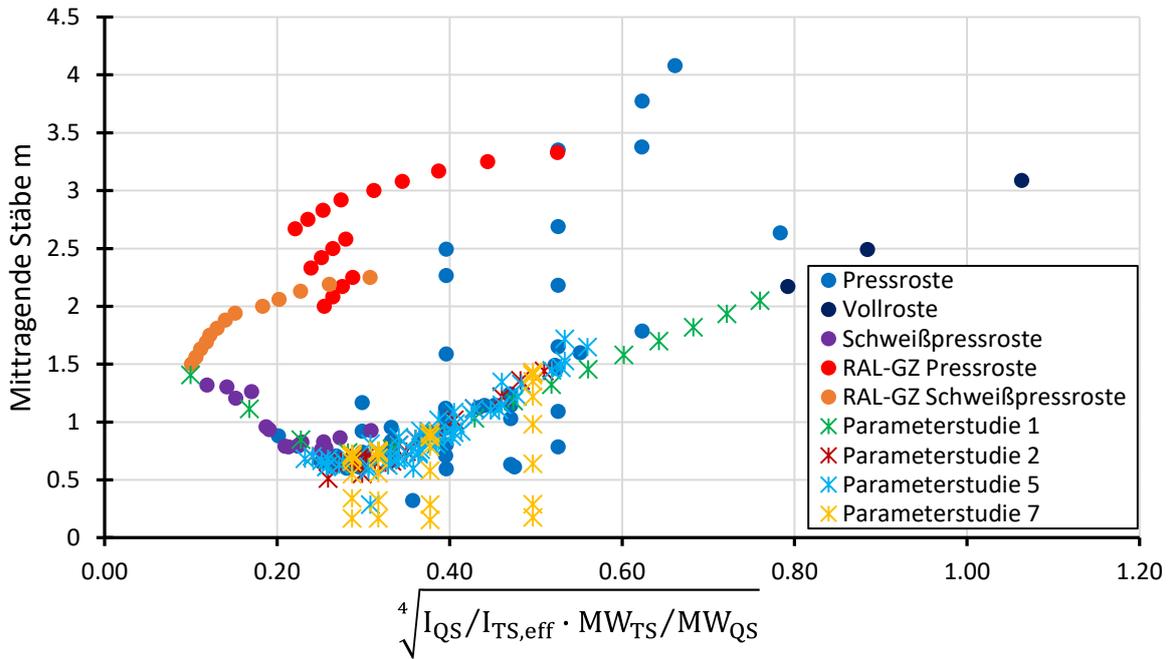


Abbildung 5-17: Mittragende Stäbe der Versuche, Parameterstudien und Bemessungsnorm

Eine bessere Übersicht über diesen Zusammenhang bringt Abbildung 5-18, in der die mittragenden Stäbe nach der Stützweite der jeweiligen Parameterstudie und der Maschenweiten sortiert und über die Plattenbreite dargestellt sind. Eindeutig für alle Konfigurationen ist zu erkennen, dass die Anzahl der mittragenden Stäbe für eine Plattenbreite, die gegen unendlich strebt, konvergiert. Erst bei einer Breite zwischen 600 und 900mm scheint die Anzahl bei der vorhandenen Tragstabmaschenweite von 33mm abzunehmen. Für die geringste untersuchte Breite ist die Anzahl der mittragenden Tragstäbe teilweise nahezu null, sodass lediglich die Stäbe unter dem Lastwürfel in Rechnung gestellt werden können.

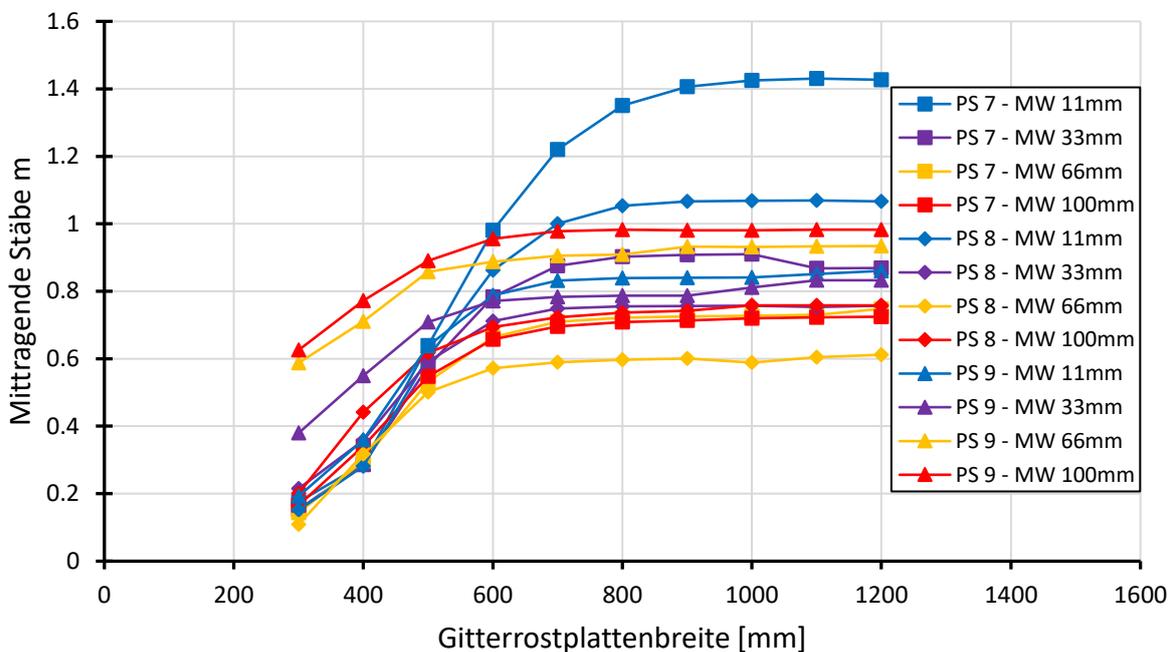


Abbildung 5-18: Abhängigkeit der mittragenden Stäbe m von der Gitterrostplattenbreite

Des Weiteren scheinen bei geringerer Stützweite die Maschenweiten nicht mehr maßgeblich die Höhe der Anzahl mittragender Tragstäbe auszumachen. Bei der höchsten Stützweite sind die Kurven von den höchsten zu den niedrigsten Werten nach der zunehmenden Maschenweite zwischen den Querstäben geordnet, jedoch ist diese Reihenfolge für die niedrigeren Stützweiten nicht mehr zutreffend. Dort besitzt im Falle der 800mm Stützweite sogar die Gitterrostplatte mit der größten Maschenweite die höchsten Werte für die mittragenden Stäbe. Dieser Einfluss ist im Zusammenhang mit der Herleitung der Formel für die Anzahl mittragender Tragstäbe n in [22] noch näher erläutert und in die Berechnung integriert.

Damit sind durch eine umfangreiche Parameterstudie die Einflussgrößen auf die mittragenden Stäbe aus den Versuchsserien bestätigt und weiter ausgeführt worden. Welchen Einfluss jedoch die erreichten maximalen Traglasten auf die Einschätzung der Stabilität haben und inwieweit sich die verschiedenen, untersuchten Geometrien zusammen betrachten lassen, wird in Kapitel 6.3.3 im Rahmen der Überlegungen zu dem neuen Bemessungskonzept weiter untersucht.

6 Vorüberlegungen zu einem Bemessungskonzept

Mit den bisherigen Erkenntnissen zu dem Tragverhalten der Gitterrostplatten wird das Ziel verfolgt eine neue und vor allem erweiterte Bemessungsgrundlage für die RAL-GZ [1] zu schaffen. Neben der Bemessung von sehr spezifischen Konfigurationen soll in Zukunft eine Vielzahl an verschiedenen Abmessungen genau berechnet und dabei möglichst viel der vorhandenen Tragkapazitäten ausgenutzt werden können. Die Untersuchungen an den experimentellen Traglastkurven in Kapitel 4.3.1 und an den numerischen Traglastkurven in Kapitel 5.4.2 zeigen, dass ein plastisches Tragverhalten der Gitterroste generell vorhanden ist, jedoch nicht immer erreicht wird, da es bei schlankeren Geometrien zum Ausknicken der Tragstäbe kommt.

Im Folgenden wird im Hinblick auf das neue Bemessungskonzept zunächst eine mögliche elastische und plastische Tragfähigkeit definiert, die auf Grundlage der bisherigen Erkenntnisse basiert. Dabei sind insbesondere die Anzahl der mittragenden Stäbe n und die effektive Tragstabhöhe wichtig, die für eine effiziente Bemessung nach Möglichkeit durch Formeln beschrieben werden sollen. Für die sichere Bemessung wird daraufhin eine mechanisch sinnvolle Definition der Schlankheit erfolgen, um die jeweilige Traglast trotz eines aufkommenden Stabilitätsversagens gewährleisten zu können. Dazu sind Grenzwerte zu ermitteln, die das Stabilitätsversagen in Bezug auf die anzusetzende Tragfähigkeit eingrenzen und so eine zuverlässige Vorhersage zulassen. Im Anschluss werden alle Bestandteile der Tragfähigkeitsermittlung in einen sinnvollen Zusammenhang gebracht, der als Vorschlag für das neue Vorgehen in der kommenden Bemessungsnorm gilt.

6.1 Ermittlung einer Formel für die effektive Höhe

Wie bereits bei der Validierung des numerischen Modells in Kapitel 5.3 zu erkennen war, ist eine richtige Einschätzung der Gitterrosttragfähigkeit nur mithilfe der abgeminderten, effektiven Tragstabhöhe möglich. In den Gitterroststreifenversuchen sind für alle Probekörper die effektiven Tragstabhöhen ermittelt worden, die als Grundlage zur Ermittlung einer Formel dienen. Aufgrund der geringen Probenzahl der stark abweichenden Gitterroste aus unverzinkten Baustahl, Edelstahl und Aluminium infolge der nicht gut verpressten Schlitzungen ist die Bestimmung einer genauen Formel für diese nicht möglich. Dazu sind zunächst weitere Versuche und Untersuchungen zu der Beschaffenheit der Schlitzungen durchzuführen, um eine präzise Aussage zu diesen Gitterrosten treffen zu können.

Die verzinkten Pressroste und die Schweißpressroste aus Baustahl weisen dagegen bereits eine ausreichende Anzahl an Probekörpern auf, die zur Ermittlung einer Formel für die effektive Tragstabhöhe dienen sollen. In Kapitel 4.2.1 und 4.2.2 ist dazu sowohl der Einfluss der Maschenweite zwischen den Querstäben als auch von der Größe der Querstäbe auf die effektive Tragstabhöhe ausgemacht worden. Ein guter Indikator für den Grund der Abminderung ist der in Abbildung 6-1 erneut gezeigt Spannungsverlauf in der Längsachse der Tragstäbe, welcher an den Schlitzten einer Störung unterliegt.

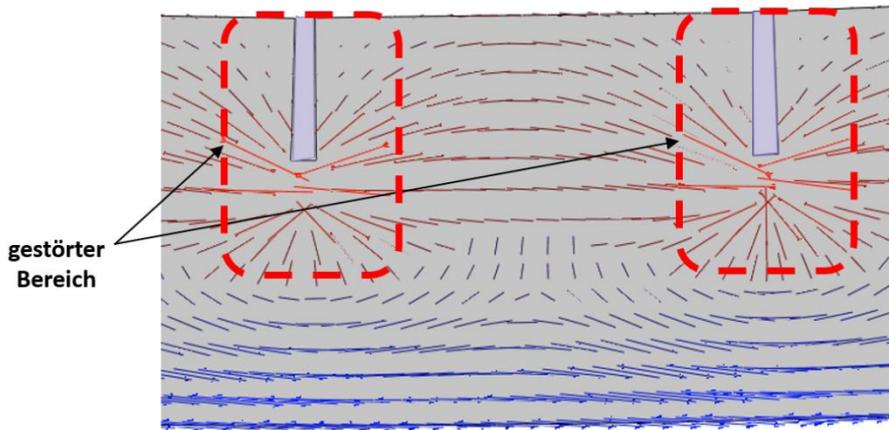


Abbildung 6-1: Spannungsverlauf in einem Tragstab infolge der Störung durch die Schlitzzug

Zwischen den gestörten Bereichen kommt es je nach Abstand der Querstäbe zueinander wieder zu einem ungestörten Spannungsverlauf, der die gesamte Tragstabhöhe ausnutzt. Daher lässt sich der Bereich von einer Maschenweite in zwei verschiedene Abschnitte unterteilen, die in Abbildung 6-2 mit den jeweiligen Abmessungen optisch hervorgehoben werden.

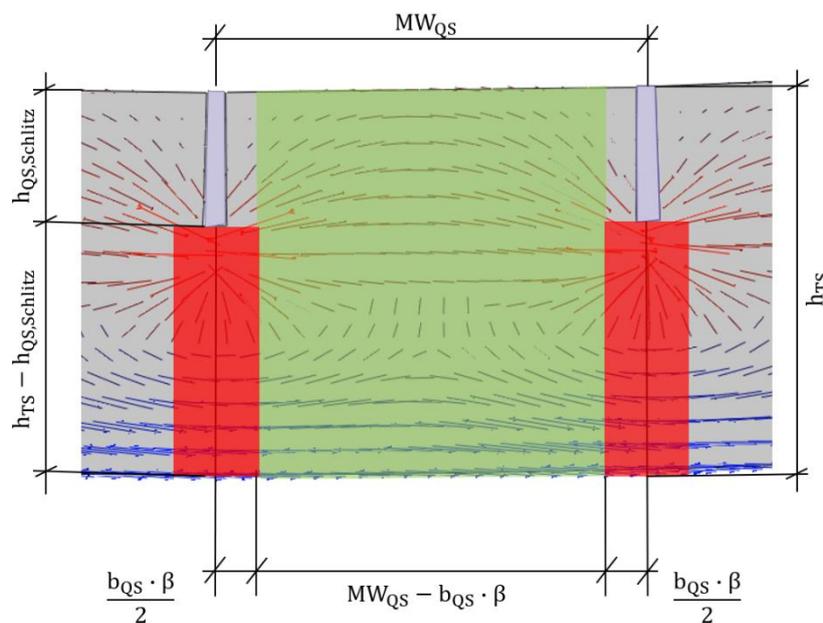


Abbildung 6-2: Bereiche der gestörten und der ungestörten Spannungsverläufe

Die Schlitzhöhe infolge eines eingelassenen Querstabes, welche bei Pressrosten etwa der gesamten und bei Vollrosten der halben Querstabhöhe entspricht, verringert die nutzbare Querschnittshöhe in dem Bereich der Störung. Die Breite dieser Störung ist je nach Häufigkeit der Schlitzen unterschiedlich groß und wird daher zunächst mit einem variablen Faktor β auf die halbe Breite des Querstabes bezogen. Die Länge des ungestörten Bereichs ist folglich eine Maschenweite zwischen den Querstäben abzüglich einer vollen Breite des Störbereichs. Um nun daraus eine über die gesamte Länge gleichmäßig verschmierte, effektive Querschnittshöhe für die Tragstäbe zu ermitteln, werden die Bereiche der Schwächung und der vollen

Höhe auf eine Maschenweite bezogen. Die resultierende Formel ist in Gleichung (6.1) aufgeführt.

$$h_{TS,eff} = h_{TS} \cdot \frac{MW_{QS} - b_{QS} \cdot \beta}{MW_{QS}} + (h_{TS} - h_{QS,schlitz}) \cdot \frac{b_{QS} \cdot \beta}{MW_{QS}} \quad (6.1)$$

Der erste Term beschreibt den ungestörten Bereich, bei dem die volle Tragstabhöhe angesetzt werden kann, und der zweite Term zweimal den halben, gestörten Bereich, der die Tragstabhöhe abzüglich der Schlitzhöhe auf einer Länge von der β -fachen Schlitzbreite berücksichtigt.

Somit ist lediglich die Bestimmung des bisher unbekanntem β -Faktors übrig, welcher mithilfe einer Zielwertanalyse und die durch Versuche ermittelten, effektiven Tragstabhöhen festgelegt werden kann. Für die verzinkten Pressroste und die Schweißpressroste wird dabei der Faktor so lange in der Analyse variiert, bis das Ergebnis nach Gleichung (6.1) für jedes Gitterrost den effektiven Tragstabhöhen aus den Versuchen entspricht. Für jeden einzelnen Streifenprobekörper werden die vorhandenen, im Vorhinein gemessenen Querschnittsgrößen sowie die aus der Biegesteifigkeit ermittelte effektive Tragstabhöhe in die Formel eingesetzt, sodass nur der β -Faktor unbekannt ist. Als Ergebnis aus der Zielwertanalyse wird jeweils ein Wert für diesen Faktor ermittelt, welcher für den bestimmten Gitterroststreifen die effektive Tragstabhöhe ermitteln lässt. Die Ergebnisse für die verzinkten Pressroste sind in Abbildung 6-3 über die Maschenweite und einen Normierungsfaktor aus der vorhandenen Querstab- zur Tragstabhöhe dargestellt.

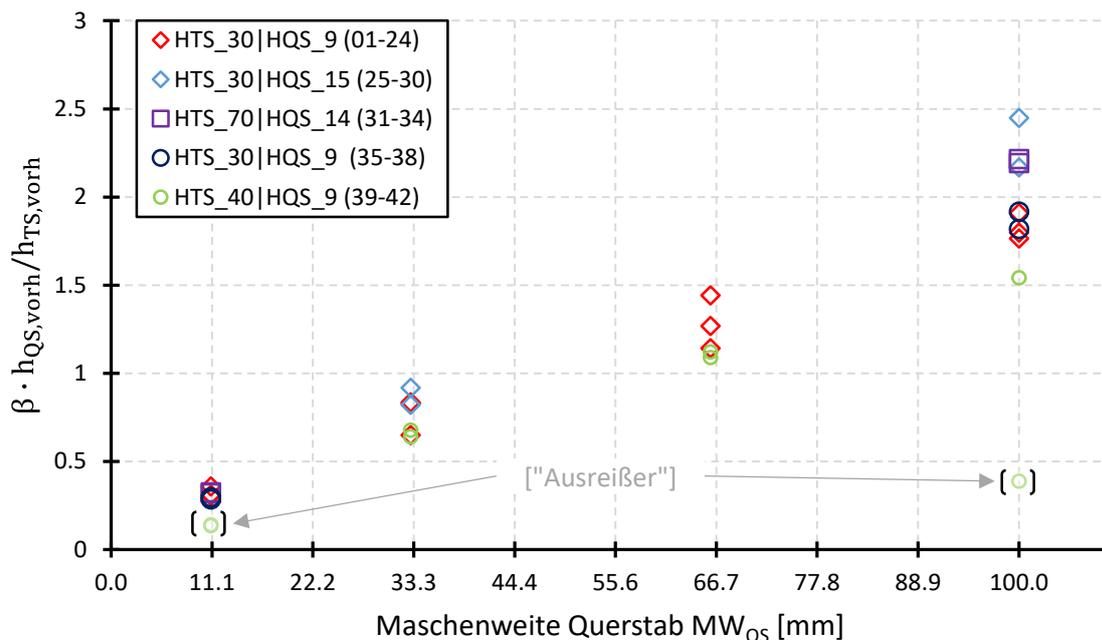


Abbildung 6-3: Graphische Darstellung der β -Faktoren aus der Zielwertanalyse für Pressroste

Zu erkennen ist eine linear ansteigende Tendenz für alle Gitterroste mit Ausnahme von zwei stark abweichenden Ergebnissen, die im Folgenden nicht weiter berücksichtigt werden. Durch diesen Zusammenhang kann eine Regressionsgerade durch die Punkte gelegt werden, sodass

sich eine Funktion in Abhängigkeit der vorhandenen Schlitz- und Tragstabhöhe sowie der Maschenweite zwischen den Querstäben ergibt. Punkte, die sehr nah an dieser Geraden liegen, werden sehr genau beschrieben und diejenigen Punkte, die weiter von dieser entfernt liegen, werden dagegen nicht präzise getroffen. Dadurch ergibt sich für einige Probekörper eine gewisse Abweichung für die effektiven Tragstabhöhen, die sich aufgrund der vorhandenen Streuung der Werte nicht verhindern lässt. Die Regressionsgerade zu den Werten ist in Abbildung 6-4 dargestellt und als Formel in Gleichung (6.2) gegeben.

$$\beta = \frac{h_{TS}}{h_{QS, Schlitz}} \cdot (0,0187 \cdot MW_{QS} + 0,0841) \quad (6.2)$$

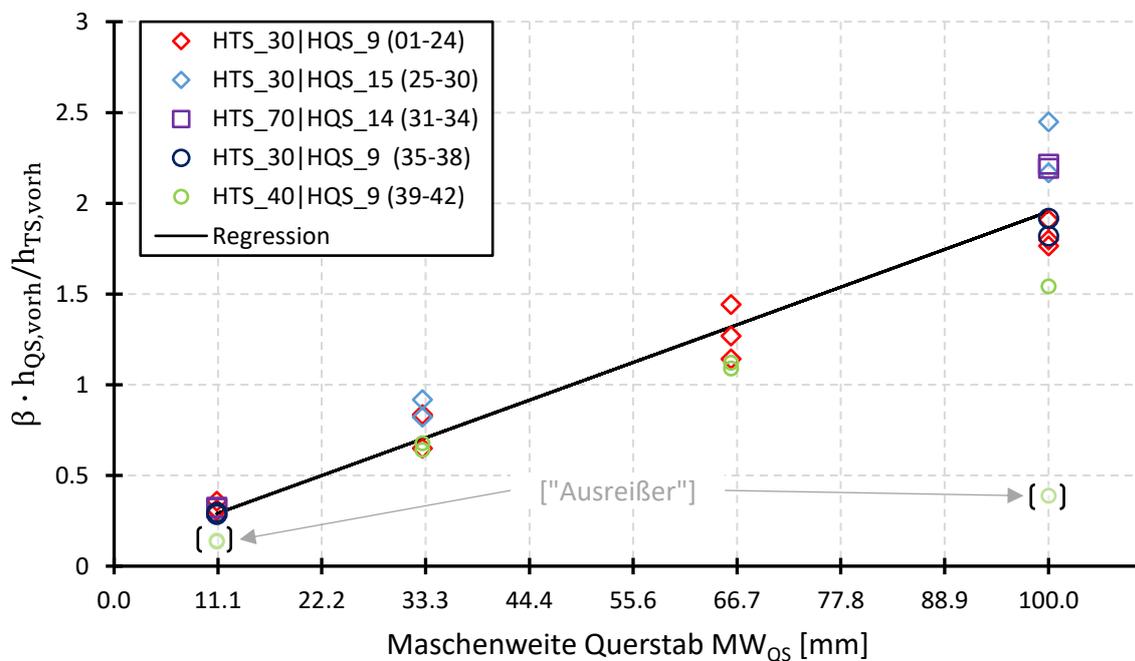


Abbildung 6-4: Graphische Darstellung der β -Faktoren und der Regressionsgeraden

Der Fehler, der mit den aus Gleichung (6.2) berechneten β -Faktoren entsteht, kann entweder über den Vergleich der experimentell und über die Formel ermittelten effektiven Höhen oder die zugehörigen Biegesteifigkeiten visualisiert werden. Da in letztere die effektive Tragstabhöhe und somit die Abweichung mit der dritten Potenz eingeht, wird aus den Biegesteifigkeiten das Verhältnis ermittelt und in Abbildung 6-5 gegenübergestellt. Die Abweichung der Verhältnisse in beide Richtungen resultiert aus der Regressionsgeraden, die die Ergebniswerte im Mittelwert berücksichtigt. Ein Verhältnis über eins wird dabei als sicher angesehen, weil die effektive Tragstabhöhe und Biegesteifigkeit aus der Formel niedriger ist und somit eine geringere rechnerische Tragfähigkeit angesetzt werden würde. Bei den Verhältniswerten unter eins ist dies dementsprechend umgekehrt und damit auf der unsicheren Seite liegend. Dennoch ist zu erkennen, dass die meisten Abweichungen nicht größer als drei Prozent sind und daher eine überwiegend genaue Übereinstimmung getroffen wird. Aufgrund der verschiedenen Geometrien und insgesamt hohen Anzahl an getesteten Pressrosten kann die Formel nach Gleichungen (6.1) und (6.2) allgemeingültig für verzinkte Pressroste angesetzt werden.

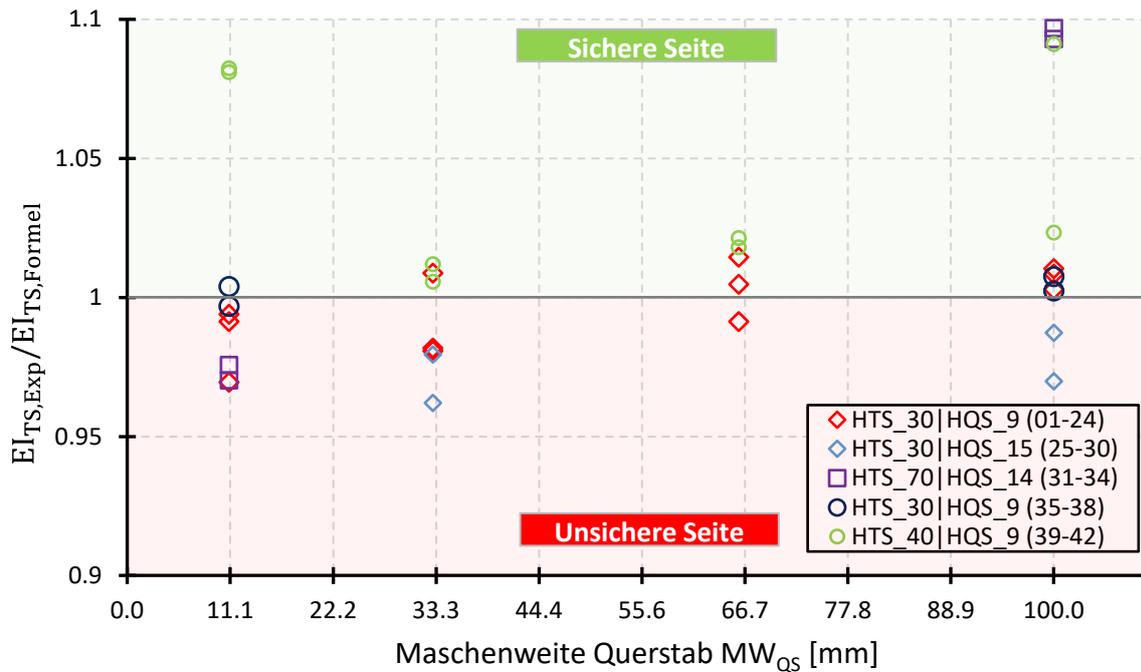


Abbildung 6-5: Vergleich der experimentell und nach Formel ermittelten Biegesteifigkeiten

Dagegen weisen die Vollroste und die Schweißpressroste genauso wie die Pressroste aus unverzinktem Baustahl, Edelstahl und Aluminium eine nicht ganz so hohe Regelmäßigkeit und Probenzahl auf, weshalb bei diesen Gitterrosttypen keine so umfangreiche und allgemeingültige Aussage getroffen werden kann. Allerdings kann für die Schweißpressroste analog zu der bisherigen RAL-GZ [1] ein Abminderungsfaktor anhand der Verhältnismerte von den effektiven und den vorhandenen Tragstabhöhen festgelegt werden. Die Verhältnisse sind in Abbildung 6-6 für alle vorhandenen Gitterroststreifenversuche dargestellt.

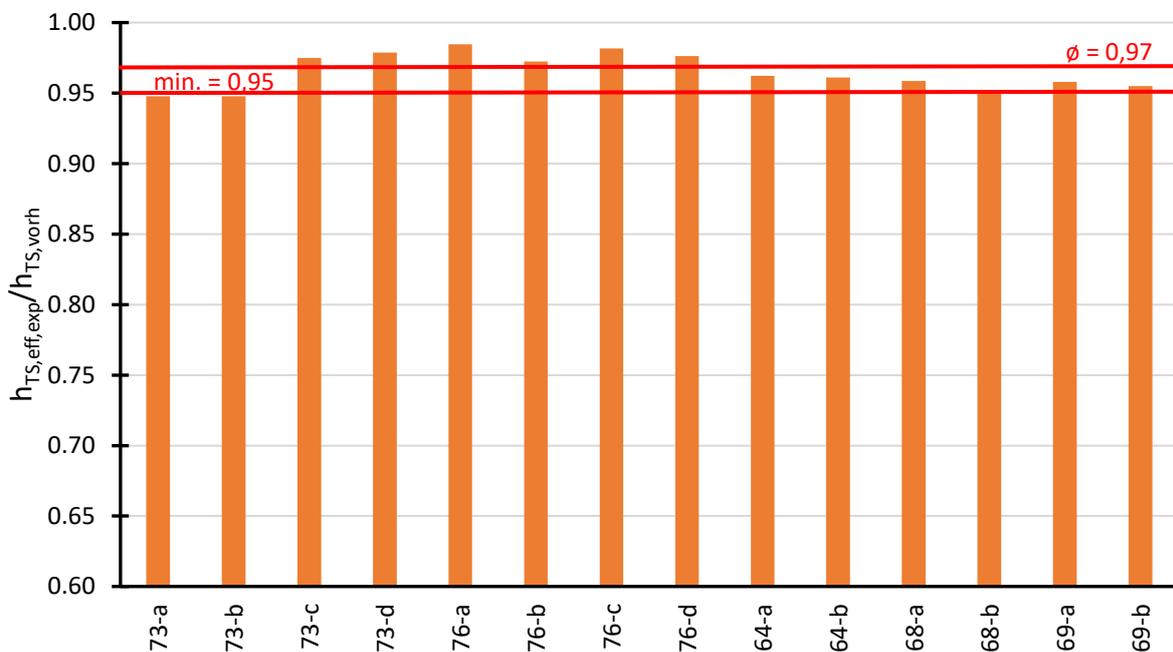


Abbildung 6-6: Verhältnisse der vorhandenen und effektiven Tragstabhöhen für Schweißpressroste

Die eingezeichneten Linien kennzeichnen den unteren Grenzwert und den Mittelwert der vorhandenen Verhältnisse, welche entweder auf der sicheren Seite liegend zu 0,95 oder für einen wirtschaftlicheren Wert zu 0,97 gewählt werden können.

Alles in allem sind für die Pressroste aus verzinktem Baustahl und die Schweißpressroste die effektiven Tragstabhöhen somit analytisch beziehungsweise durch Grenzwerte erfassbar. Für die weiteren Materialien und die Vollroste sollten weitere Versuchsreihen in Betracht gezogen werden, damit die effektive Querschnittshöhe der Tragstäbe genauer betrachtet und ermittelt werden kann.

6.2 Berechnung von elastischen und plastischen Tragfähigkeiten

Die nun bestimmbaren effektiven Tragstabhöhen im Zusammenhang mit der Anzahl an mittragenden Tragstäben n ermöglichen die Berechnung der Tragfähigkeit von verzinkten Pressrosten und Schweißpressrosten. Für die Anzahl der mittragenden Stäbe n sind für die getesteten Probekörper jeweils die Werte aus der Berechnung über die Biegesteifigkeit oder alternativ über die Spannung vorhanden, sodass diese für die Berechnung der Tragfähigkeit von den Gitterrostplatten angesetzt werden können. Für eine allgemeine Berechnung mit beliebigen Geometrien kann dagegen die Formel für die mittragenden Stäbe n nach [22] verwendet werden.

Die effektive Tragstabhöhe ist für die Tragfähigkeit eine entscheidende Querschnittsgröße, wie es die numerische Untersuchung an den Gitterrostplatten in Kapitel 5.3.1 gezeigt hat. Mit der Formel für die Pressroste beziehungsweise den Grenzwerten für die Schweißpressroste kann diese Größe ermittelt werden und in den Querschnittswiderstand eingesetzt werden. Die elastischen und plastischen Widerstandsmomente werden entsprechend nach Gleichung (6.3) und (6.4) ermittelt, wodurch die Abminderung durch die Querstabeinlassung gegenüber der bisherigen Berücksichtigung des Abminderungsfaktors ν genauer berücksichtigt wird.

$$W_{TS,el} = \frac{h_{TS,eff}^2 \cdot b_{TS}}{6} \quad (6.3)$$

$$W_{TS,pl} = \frac{h_{TS,eff}^2 \cdot b_{TS}}{4} \quad (6.4)$$

Die Widerstandsmomente stellen lediglich die Größe eines einzelnen Tragstabes dar, sodass diese mithilfe der Anzahl an mittragenden Stäben n auf die gesamte Gitterrostplatte hochgerechnet werden. Durch die Multiplikation mit der Fließspannung f_y des Materials kann zudem der gesamte Momentenwiderstand der Gitterrostplatte berechnet werden. Die Formeln dazu sind in Gleichung (6.5) und (6.6) aufgeführt.

$$M_{el,ges} = n \cdot W_{TS,el} \cdot f_y \quad (6.5)$$

$$M_{pl,ges} = n \cdot W_{TS,pl} \cdot f_y \quad (6.6)$$

Um die Tragfähigkeiten mit den experimentellen Ergebnissen vergleichen zu können, ist des Weiteren noch eine Umrechnung in die zugehörigen Kräfte notwendig. Dazu kann die Formel für das zweidimensionale statische System analog zu Gleichung (2.5) aus der bisherigen RAL-GZ [1] verwendet werden, mithilfe derer der Momentenwiderstand in eine Kraft in Abhängigkeit der Stützweite L und der mittigen Lasteinleitungslänge b_{LW} umgerechnet werden kann. Die entsprechenden Formeln sind in Gleichung (6.7) und (6.8) dargestellt.

$$F_{el,ges} = \frac{4 \cdot M_{el,ges}}{L - b_{LW}/2} \quad (6.7)$$

$$F_{pl,ges} = \frac{4 \cdot M_{pl,ges}}{L - b_{LW}/2} \quad (6.8)$$

Mit diesen Gleichungen können die elastischen und plastischen Grenzkraft für alle Probekörper mit den bereits ermittelten mittragenden Stäben n und den effektiven Tragstabhöhen berechnet werden. In Abbildung 6-7 sind diese Grenzen für den ersten Probekörper berechnet und dargestellt. Zu erkennen ist, dass die elastische Kraft bereits im Bereich der linear elastischen Steigung liegt und erst die plastische Tragfähigkeit den Knick zwischen den zwei verschiedenen Tragverhalten der Gitterrostplatte trifft. Dies liegt daran, dass die elastische Grenze das Kraftniveau beschreibt, bei dem der höchstbelastete Tragstab die Fließspannung in den Randfasern erreicht. Erst bei weiterer Laststeigerung fängt dieser Stab an zu fließen und weitere Tragstäbe können die plastischen Traglastreserven aktivieren.

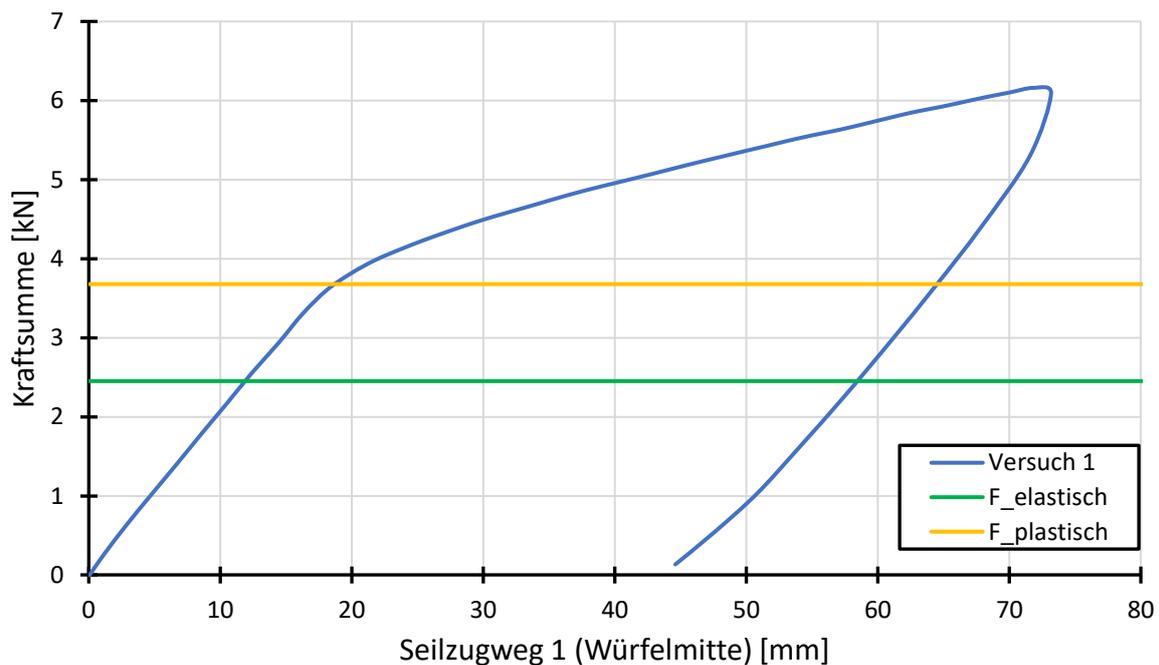


Abbildung 6-7: Elastische und plastische Tragfähigkeit des ersten Probekörpers

Bei Betrachtung aller Kraft-Verformungs-Diagramme der Probekörper mit den zugehörigen, eingezeichneten Traglastniveaus in Anhang A.6 fällt auf, dass die maximale, plastische Tragfähigkeit nahezu immer genau in dem Punkt der Steigungsänderung zwischen dem elastischen und dem plastischen Verhalten der jeweiligen Gitterrostplatte liegt. Diese Tatsache ist für eine spätere Bemessung sehr günstig, da eine höhere Tragfähigkeit auch weitaus höhere Verformungen mit sich bringen würde. Weiterhin sind alle Gitterrostplatten, die ein Stabilitätsversagen in dem plastischen Bereich der Platte aufweisen, auf Grundlage dieser anzusetzenden Tragfähigkeiten im Bemessungsfall nicht gefährdet. Jedoch gibt es auch Konfigurationen wie Probekörper 40 in Abbildung 6-8, die in dem Knick der Kurve oder bereits in dem linear elastischen Bereich ein Ausknicken der Tragstäbe aufweisen, sodass diese nicht mit der plastischen Tragfähigkeit bemessen werden können.

Dazu werden im Folgenden Untersuchungen zu der Einschätzung der Schlankheit angestellt.

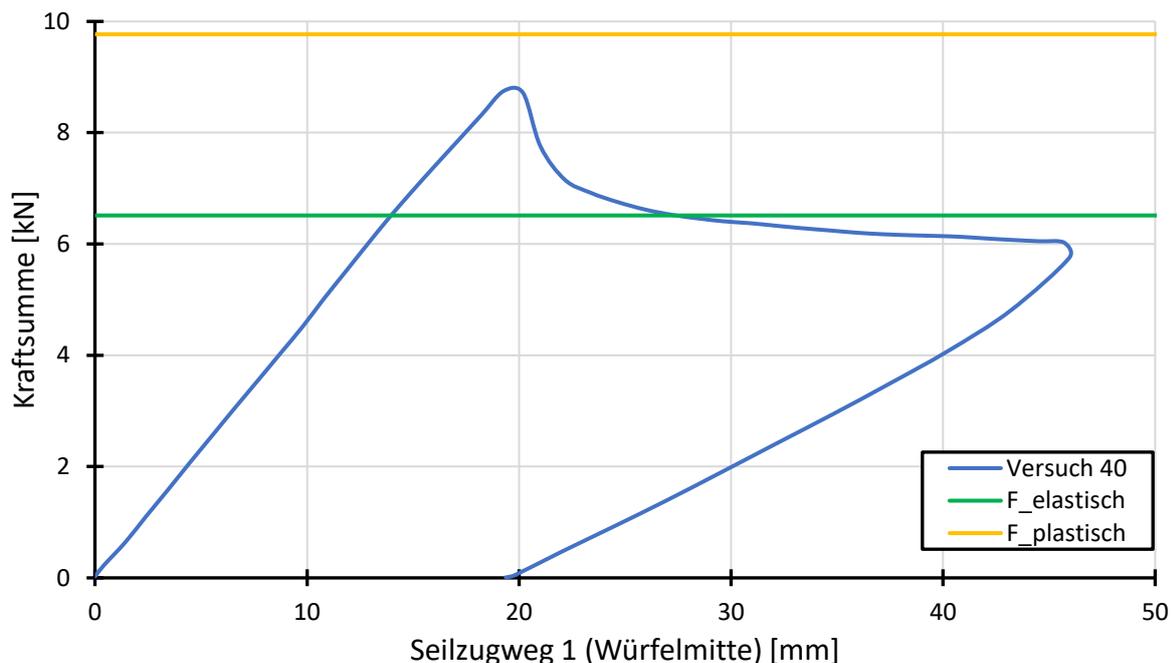


Abbildung 6-8: Elastische und plastische Tragfähigkeit des 40. Probekörpers

6.3 Ermittlung der vorhandenen Schlankheit

Im Bauingenieurwesen und speziell im Stahlbau gibt es bereits einige Anwendungsgebiete wie das Biegeknicken, das Biegedrillknicken und das Plattenbeulen, in denen eine Schlankheit zur Einschätzung des Stabilitätsversagens definiert wird. Insbesondere das Biegedrillknicken und das Plattenbeulen, welche in Kapitel 2.6 näher erläutert wurden, scheinen eine Ähnlichkeit zu dem vorliegenden Fall bei den Gitterrostplatten aufzuweisen, da die dünnen Tragstäbe zwischen zwei Querstäben im Druckgurt ausweichen. Um die Analogien auf die Gitterrostplatte anwenden zu können, wird dazu zunächst ein Ersatzsystem mit sinnvollen Randbedingungen bestimmt und an diesem anschließend eine kritische Verzweigungslast ermittelt. Diese bildet wiederum die Grundlage zur Bestimmung einer Schlankheit für das definierte Ersatzsystem.

6.3.1 Ersatzstab

Bei Betrachtung der getesteten Probekörper, die aufgrund hoher Maschenteilungen ein Stabilitätsversagen in den Tragstäben aufweisen, fällt eine generelle Regelmäßigkeit auf. Die Beulen in den oben liegenden Druckzonen befinden sich ohne Ausnahme zwischen den Querstäben und erzeugen daher keine Verformung aus der Tragstabebene an den Kreuzungspunkten. Diese Erkenntnis lässt die Annahme zu, dass ein mögliches Ersatzsystem für die Tragstäbe eine Feldlänge zwischen zwei Querstäben darstellt. Ein weiteres Indiz dafür gibt eine numerische Eigenwertanalyse an einer Gitterrostplatte mit hoher Querstabmaschenweite, welche in der Software *Abaqus* [21] durchgeführt wird und dessen erste Eigenform für die untersuchte Einzelbelastung am Plattenrand in Abbildung 6-9 dargestellt ist.

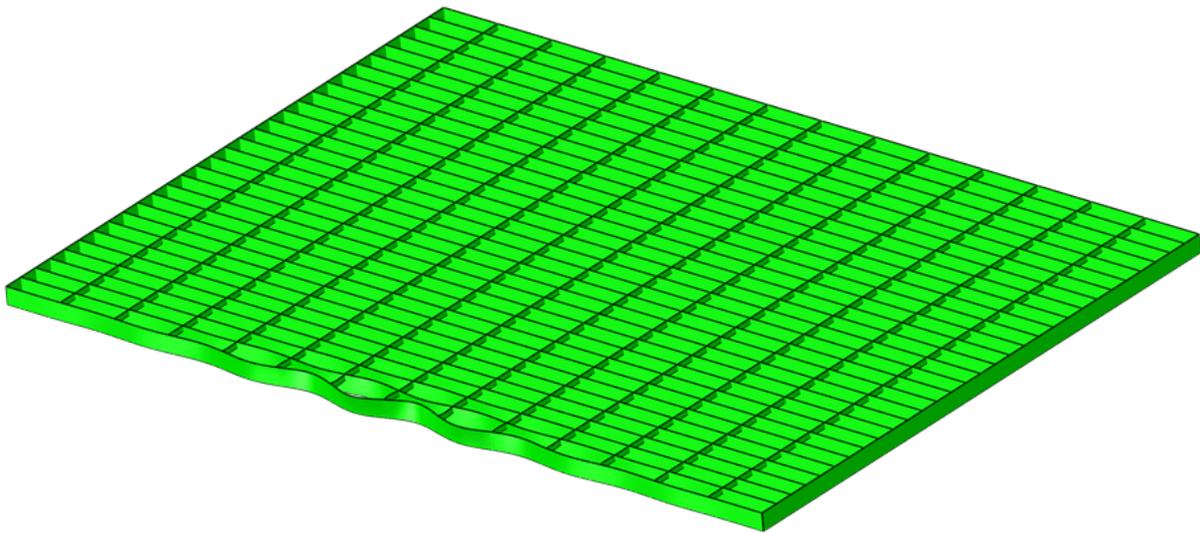


Abbildung 6-9: Erste Eigenform aus der Eigenwertanalyse zu Probekörper 6

An den äußeren Tragstäben sind die Beulen in den mittleren Feldern zu erkennen, wobei der Randstab die höchste Ausprägung der Verformungen aufweist und die benachbarten Tragstäbe nur noch schwache Beulen im Vergleich dazu besitzen. Um eine bessere Übersicht auf die Beulen und das Verhalten an den Knotenpunkten zu gewinnen, ist die Betrachtung der Unterseite an den ausknickenden Tragstäben sinnvoll. Dies geschieht in Abbildung 6-10, in der die seitliche Verformung der Tragstäbe infolge des Stabilitätsversagens deutlich sichtbar wird.

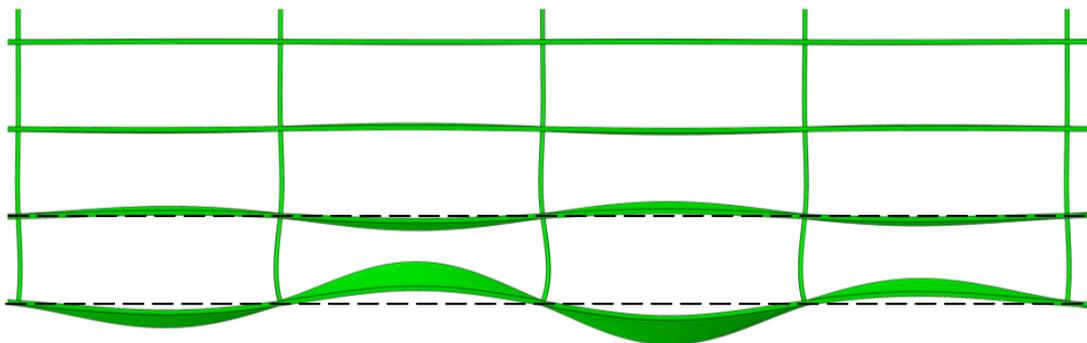


Abbildung 6-10: Ansicht der Unterseite auf die ausknickenden Tragstäbe mit eingezeichneter Flucht

Zusätzlich ist für die ersten beiden Tragstäbe die ursprüngliche Lage mit einer gestrichelten Linie eingezeichnet, sodass die Lage aller Knotenpunkte zwischen den Trag- und Querstäben in der Flucht erkennbar wird. Dies ist eine wichtige Erkenntnis, da die Beulen dementsprechend wie bereits angenommen auf ein Feld zwischen den Knotenpunkten beschränkt werden können. Die Tatsache, dass die Tragstäbe in den Knotenpunkten nicht nur an der Verbindung zum Querstab, sondern auch auf der restlichen Höhe in der Flucht liegen, ermöglicht die Annahme einer gelenkigen Lagerung an den beiden Enden des Ersatzstabes entlang der gesamten Tragstabhöhe. Dadurch ergibt sich das Ersatzstabsystem in Abbildung 6-11 mit den angegebenen Abmessungen und Lagerungsbedingungen.

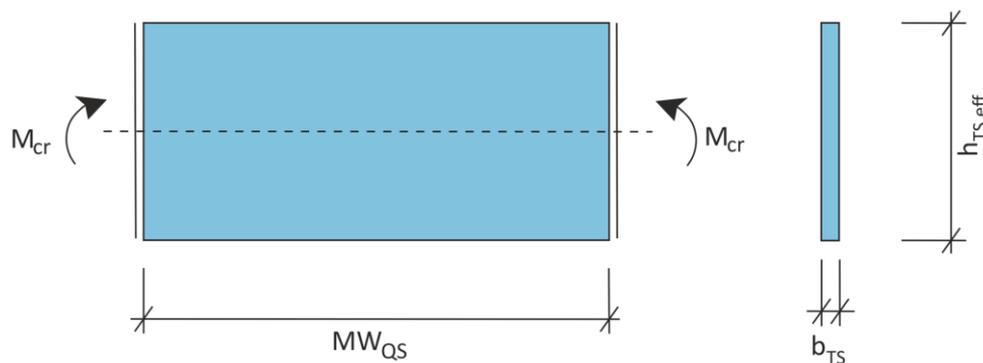


Abbildung 6-11: Ersatzstab mit Abmessungen und Randbedingungen

Das eingezeichnete Moment M_{cr} stellt die in Kapitel 2.6.1 erläuterte kritische Verzweigungslast dar, welche theoretisch notwendig ist, um den untersuchten Ersatzstab in einem perfekten Zustand zum Stabilitätsversagen zu bringen. Diese kann ebenfalls über die Querschnittsfläche in eine Spannung umgerechnet werden, sodass das Biegedrillknicken und der Ansatz über die Spannung beim Plattenbeulen ineinander überführbar sind.

6.3.2 Ermittlung der kritischen Verzweigungslast

Durch die Implementierung des gezeigten Ersatzsystems in ein FE-Programm können die kritischen Verzweigungslasten für alle möglichen Abmessungen numerisch ermittelt werden. Dies kann sowohl an den einfachen Balkenelementen sowie den etwas aufwändigeren Schalenelementen geschehen. Zum Vergleich der Ergebnisse werden beide Ansätze im Folgenden untersucht und gegenübergestellt. Da diese Verzweigungslast innerhalb eines möglichst einfachen Bemessungskonzeptes nicht mithilfe von der Finite-Elemente-Methode ermittelt werden soll, wird im Anschluss ein analytischer Weg über bekannte Formeln vorgestellt und ebenfalls mit dem numerischen Ansatz zur Überprüfung der Genauigkeit verglichen.

6.3.2.1 Numerische Berechnung mit Balken- und Schalenmodell

Zur Berechnung der Verzweigungslast mit Balkenmodellen wird das Programm *Ansys* [23] verwendet. Hierzu wird analog zur Parameterstudie ein Skript mithilfe der *ADPL* Befehlssprache erstellt und in dem Programm eingelesen. Dieses beinhaltet die Erstellung der Geometrie, die Aufbringung der Randbedingungen und die Belastung durch ein „1“-Moment an beiden Enden

des Balkenelements. Die Systemabmessungen werden bei Balkenelementen nur über die Länge, welche bei dem Ersatzstab der Maschenweite entspricht, modelliert und die Querschnittsfläche über eine gesonderte Angabe den Elementen zugeordnet. Die Berechnung wird in Form einer Eigenwertanalyse durchgeführt und als Ergebnis wird der Erhöhungsfaktor für die Belastung ausgegeben, bei der es zum Eintreten der Eigenform kommt. Dieser Faktor entspricht aufgrund der „1“-Belastung unmittelbar der kritischen Verzweigungslast.

Die Schalenmodelle werden dagegen mit dem Finite-Elemente-Programm *Abaqus* [21] erstellt und berechnet. Auch hier ist die parametrische Vorgehensweise hilfreich, sodass eine Vielzahl an Ersatzstäben mit verschiedenen Abmessungen in kürzester Zeit berechnet werden können. Im Gegensatz zu den Balkenmodellen kann bei dieser Elementart neben der Maschenweite als Länge des Stabes auch die Tragstabhöhe modelliert werden. Lediglich die Breite des Tragstabes wird für die flächigen Elemente per Querschnittsangabe definiert. Dies soll insbesondere für geringe Systemlängen genauere Ergebnisse liefern, als es bei den Balkenelementen der Fall ist.

Für eine hohe Anzahl an Vergleichswerten werden alle bereits vorhandenen Geometrien aus den Versuchen und Parameterstudien mithilfe des Ersatzstabes und den zwei verschiedenen Elementarten berechnet und in die Ergebnistabellen in *Microsoft Excel* exportiert. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Abhängigkeit der kritischen Verzweigungslasten von der Maschenweite zwischen den Querstäben, wie es die Gegenüberstellung der Ergebnisse für die Probekörper aus Versuchsserie eins in Abbildung 6-12 zeigt.

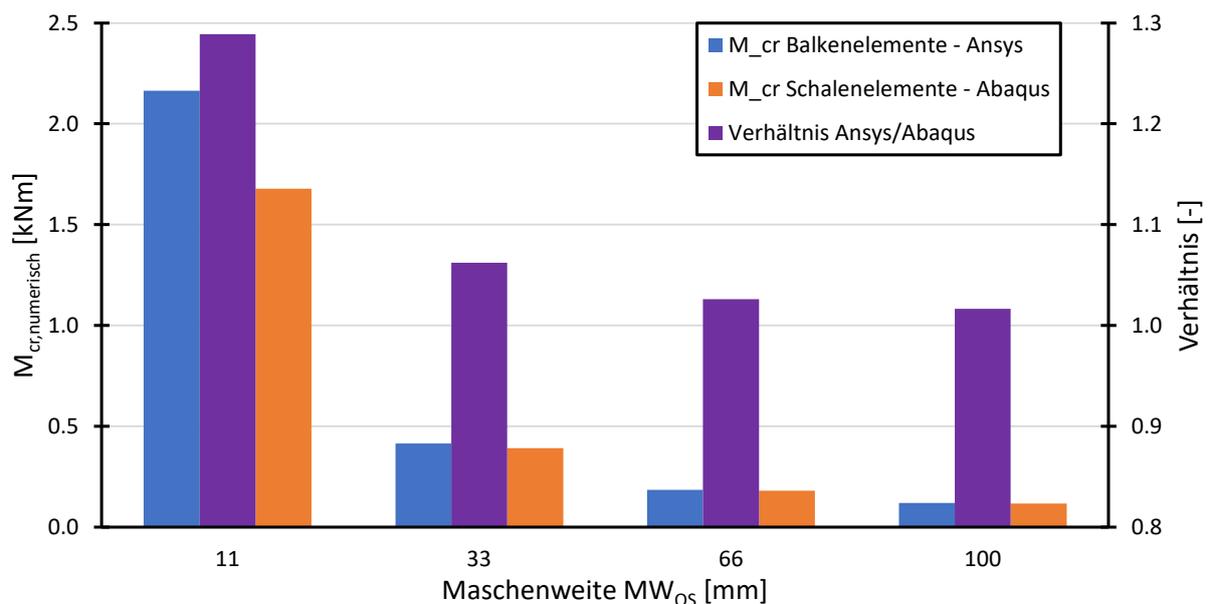


Abbildung 6-12: Gegenüberstellung der Verzweigungslasten in Abhängigkeit der Maschenweite

Die kritische Verzweigungslast ist für hohe Maschenweiten sehr gering und steigt für kleinere Maschenweiten sehr stark an. Dies gilt auch für den Unterschied zwischen den zwei Modellierungsarten, da die numerischen Verzweigungslasten des Balken- und des Schalenmodells bei hohen Maschenweiten nahezu identisch sind und bei abnehmender Maschenweite größere

Abweichungen zueinander aufweisen. Verdeutlicht wird der Unterschied durch die violetten Balken, die das Verhältnis zwischen den beiden Berechnungen auf der rechten Skala angeben.

Dies ist jedoch nicht weiter problematisch, da hohe Verzweigungslasten einen höheren Widerstand gegen das Stabilitätsversagen bedeuten und dies bei niedrigen Maschenweiten, wie in den Traglastkurven in Anhang A.6 zu sehen ist, nicht maßgebend wird. Dieser Zusammenhang zeigt sich auch durch die Betrachtung der Verformungsfigur des modellierten Ersatzsystems aus Schalenelementen, welche in Abbildung 6-13 für eine schlanke, 100mm Maschenweite und für eine gedrungene, 33mm Maschenweite dargestellt ist.

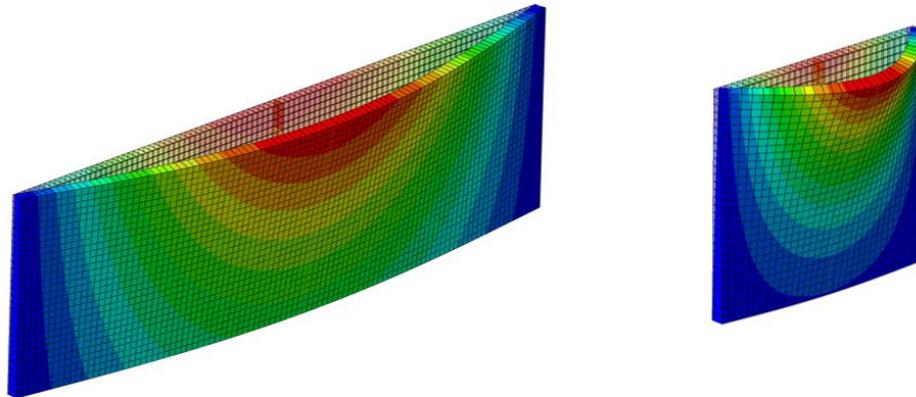


Abbildung 6-13: Verformungsfigur zur kritischen Verzweigungslast am Ersatzstab

Bei der schlanken Geometrie besitzt die größere Stablänge das Vermögen, mit weniger Krümmung aus der Plattenebene heraus die ausweichende Verformung zu erzeugen. Der gedrungene Stab muss dagegen eine wesentlich höhere Deformation und Krümmung ausbilden, um dieselbe Ausweichung und damit das Stabilitätsversagen zu entwickeln. Der geringere Energieaufwand, der für das Versagen bei hohen Maschenweiten gebraucht wird, ist somit der Grund, weshalb das kritische Verzweigungsmoment um ein Vielfaches kleiner ist als bei den Tragstäben mit einer kurzen Maschenweite zwischen den Querstäben.

Dennoch wird zur weiteren Überprüfung noch ein drittes Finite-Elemente-Programm *RFEM* [26] hinzugezogen, welches mit dem Zusatzmodul *FE-BEUL* die Berechnung der kritischen Last, bei der es zu dem theoretischen Ausknicken des Stabes kommt, über einen Spannungsansatz erlaubt. Dazu wird das bisher angesetzte „1“-Moment für jeden untersuchten Querschnitt in eine lineare Spannungsverteilung mithilfe des elastischen Widerstandsmomentes nach Gleichung (6.9) umgerechnet. Die anzugebenden Spannungen an dem oberen und unteren Querschnittsrand sind entsprechend gleich groß und besitzen umgekehrte Vorzeichen, wie in der Eingabeansicht von *RFEM* [26] in Abbildung 6-14 zu erkennen ist.

$$\sigma_{1|2} = \pm \frac{M}{W_{TS,eff}} = \pm \frac{M}{\frac{h_{TS,eff}^2 \cdot b_{TS}}{6}} \quad (6.9)$$

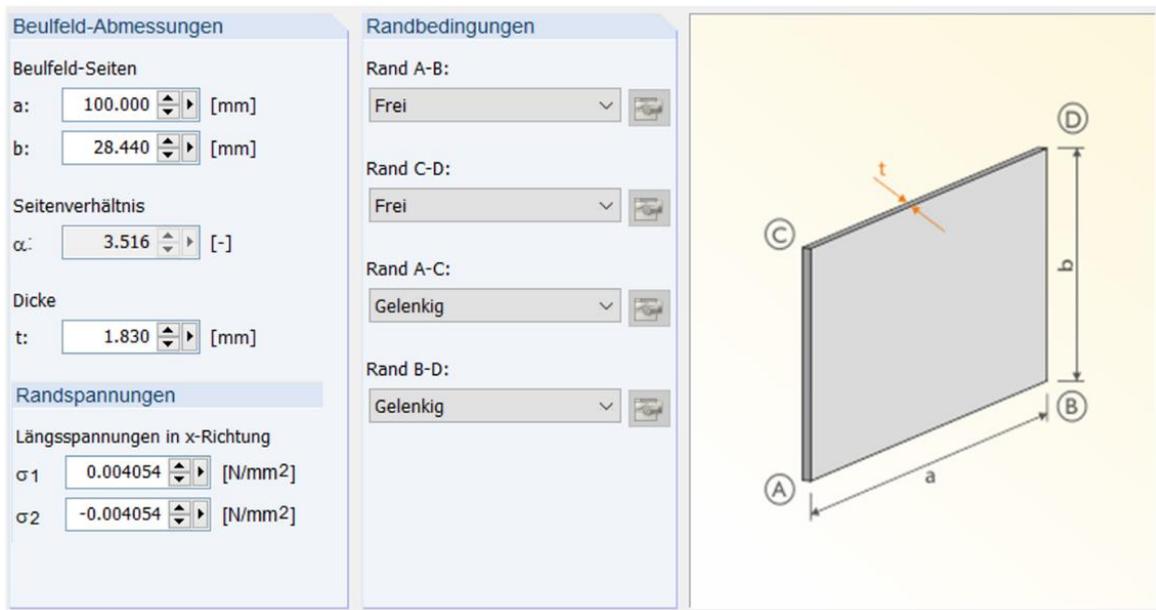


Abbildung 6-14: Numerische Untersuchung zur kritischen Verzweigungslast in RFEM [26]

Da diese Prozedur gegenüber den bisherigen Berechnungen nicht parametrisch durchführbar ist, werden die vorherigen Ergebnisse nur stichprobenartig für einige Konfigurationen der Versuchsreihen überprüft. In Abbildung 6-15 sind die Ergebnisse aus der dritten Variante hinzugefügt, die sehr ähnliche kritische Verzweigungslasten zu den Schalenelementen aus *Abaqus* [21] und demnach für hohe Maschenteilungen auch zu den Balkenelementen aus *Ansys* [23] aufweisen. Daher ist von einer generell ausreichenden Genauigkeit der numerischen Berechnungen auszugehen.

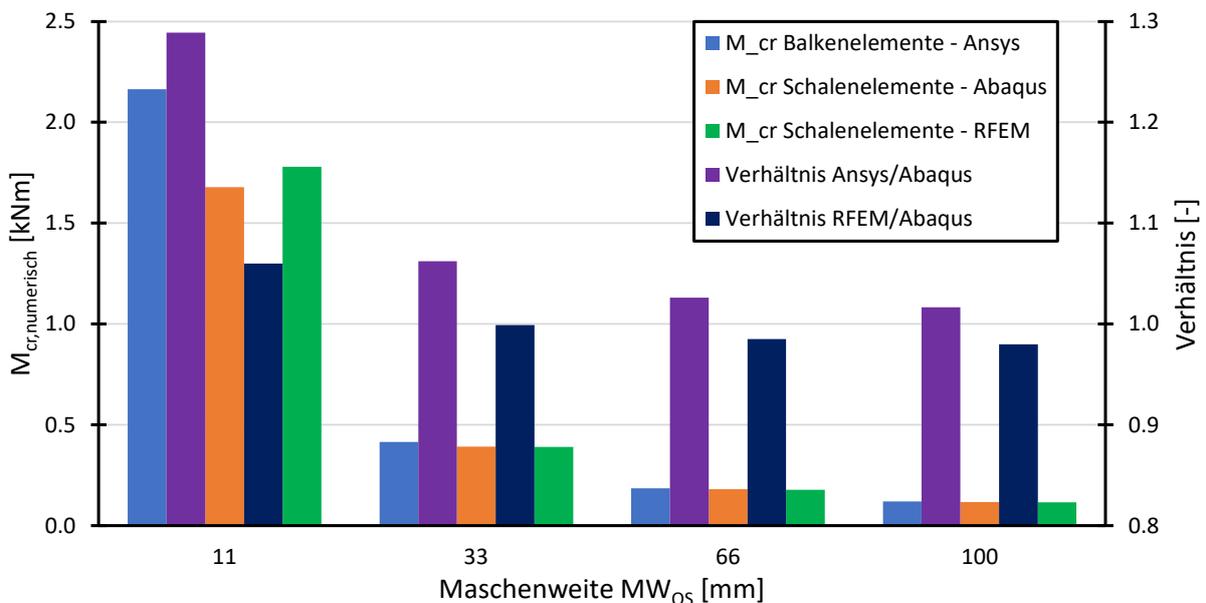


Abbildung 6-15: Gegenüberstellung der Verzweigungslasten in Abhängigkeit der Maschenweite

Nachdem die kritischen Verzweigungslasten auf numerischer Basis ermittelt sind, gilt es im nächsten Schritt eine analytisch sinnvolle Formel zur einfachen Berechnung dieser Verzweigungslast am Ersatzstab herzuleiten.

6.3.2.2 Berechnung des kritischen Moments am Ersatzstab für Gitterroste

Analytische Formeln zur Berechnung der kritischen Verzweigungslast gibt es für verschiedenste Querschnittsformen und statische Systeme bereits angepasst auf die entsprechenden Fälle, um eine einfache und schnelle Berechnung zu ermöglichen. Eine allgemeingültige Formel für einen in Abbildung 6-16 dargestellten Einfeldträger mit Randmomenten und beliebigem Querschnitt gibt beispielsweise C. Petersen [14] an, welche in Kapitel 2.6.1 bereits vorgestellt wurde. Mit dieser Formel kann eine weitere Konkretisierung für den vorliegenden Fall des Ersatzstabes aus dem Gitterrost durchgeführt werden. Die Formel ist in Gleichung (6.10) erneut angegeben und beinhaltet geometrische Querschnittsgrößen, die Systemlänge und die Materialkennwerte Elastizitäts- und Schubmodul.

$$M_{cr} = \zeta \cdot \frac{\pi}{L} \cdot \sqrt{E \cdot I_z \cdot G \cdot I_T} \cdot \sqrt{1 + \frac{E \cdot I_w \cdot \pi^2}{G \cdot I_T \cdot L^2}} \quad (6.10)$$

Diese Gleichung für das kritische Verzweigungsmoment kann auf die vorhandenen Größen des Ersatzstabes weiter angepasst und für das angestrebte Bemessungskonzept vereinfacht werden. Dazu wird zunächst der Beiwert ζ gemäß der Angaben nach C. Petersen [14] zu eins gesetzt, da dieser Wert für eine konstante Momentenverteilung gilt. Diese ist in dem betrachteten Ersatzstab für das maßgebende Feld immer vorhanden, da das Ausknicken der Tragstäbe primär zwischen den Lasteinleitungspunkten geschieht und dort aufgrund des statischen Systems eine konstante Momentenverteilung herrscht.

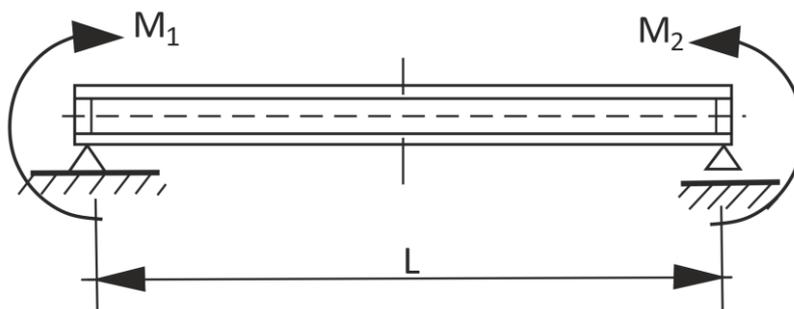


Abbildung 6-16: Statisches System zur Ermittlung der Verzweigungslast [14]

Die betrachtete Systemlänge L definiert das Maß zwischen den beiden Auflagern des Einfeldträgers und entspricht für den Ersatzstab der Maschenweite MW_{QS} zwischen den Querstäben.

Die geometrischen Querschnittsgrößen in der Formel entsprechen dem Flächenträgheitsmoment um die schwache Achse I_z , dem Torsionsträgheitsmoment I_T und dem Wölbträgheitsmoment I_w , die allesamt für den vorliegenden Rechteckquerschnitt des Tragstabes konkretisiert werden können. Die ersten beiden Querschnittsgrößen können dazu in nahezu jedem Tabellenwerk wie den Schneider Bautabellen [19] gefunden werden. Das Wölbträgheitsmoment bedarf dagegen einer tiefgründigeren Recherche, da dieses generell schwerer herzustellen ist.

Das Flächenträgheitsmoment I_z ist nach der allgemein hergeleiteten Formel für Rechteckquerschnitte zu berechnen und kann der folgenden Gleichung (6.11) inklusive der einzusetzenden Querschnittsgrößen des Ersatzstabes entnommen werden.

$$I_z = \frac{h_{TS,eff} \cdot b_{TS}^3}{12} \quad (6.11)$$

Das Torsionsträgheitsmoment I_T für einen Rechteckquerschnitt ist ebenfalls ermittelbar aus den zwei Querschnittsgrößen des Tragstabes, wobei der zugehörige Faktor abhängig von dem Verhältnis der Höhe zur Breite des Querschnitts ist. So ergibt sich für die vorliegenden Tragstäbe ein Verhältnis zwischen 12 und 20, sodass für alle Gitterroste auf der sicheren Seite liegend ein Wert für das Verhältnis von 12 abgeschätzt werden kann. Der zugehörige Faktor ist in der Formel für das Trägheitsmoment in Gleichung (6.12) aufgeführt.

$$I_T = 0,319 \cdot h_{TS,eff} \cdot b_{TS}^3 \quad (6.12)$$

Ähnlich dazu verhält sich auch das Wölbträgheitsmoment I_ω , welches ebenfalls eine Abhängigkeit von dem h/b-Verhältnis aufweist. Nach [27] ergibt sich für ein Seitenverhältnis von größer fünf, welches wie bereits erwähnt für die betrachteten Geometrien in jedem Fall vorhanden ist, die Gleichung (6.13) für den betrachteten Ersatzstab.

$$I_\omega = \frac{h_{TS,eff}^3 \cdot b_{TS}^3}{144} \quad (6.13)$$

Zuletzt kann die Abhängigkeit des Elastizitäts- und Schubmoduls für eine weitere Vereinfachung genutzt werden. Diese ist abhängig von der Querkontraktionszahl ν und ergibt sich nach Gleichung (6.14).

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (6.14)$$

Mithilfe all dieser Zusammenhänge kann die ursprüngliche Gleichung (6.10) in Abhängigkeit der bekannten Größen des Ersatzstabes gesetzt werden. Infolge von wiederholtem Vorkommen verschiedenster Querschnittsgrößen kann die Formel zudem gekürzt und auf das Wesentliche vereinfacht werden. Die resultierende Formel für den Ersatzstab nach Abbildung 6-11 ist in der folgenden Gleichung (6.15) dargestellt.

$$M_{cr} = \frac{\pi \cdot h_{TS,eff} \cdot b_{TS}^3 \cdot E}{MW_{QS}} \cdot \sqrt{\frac{0,319}{24 \cdot (1 + \nu)} + \frac{h_{TS,eff}^2 \cdot \pi^2}{1728 \cdot MW_{QS}^2}} \quad (6.15)$$

Der E-Modul kann für die verschiedenen Materialien mit dem nominellen Wert angesetzt werden und beträgt für Baustahl 210.000, für Edelstahl 200.000 und für Aluminium 70.000 N/mm². Die Querkontraktionszahl ν ist ebenfalls konstant für das jeweilige Material und beträgt für Bau- und Edelstahl 0,3 und für Aluminium 0,35.

6.3.2.3 Vergleich der numerischen und analytischen kritischen Verzweigungslasten

Durch die analytisch hergeleitete Formel für die kritische Verzweigungslast M_{cr} nach Gleichung (6.15) kann nun für alle Probekörper aus den Versuchsreihen sowie den Parameterstudien diese Last berechnet und den numerischen Ergebnissen gegenübergestellt werden. Dazu wird das Verhältnis aus dem analytischen Ergebnis nach der Formel zu dem numerischen Ergebnis aus dem Balkenmodell, welches dem Berechnungsansatz für die analytische Formel entspricht, berechnet.

Da eine genaue Ermittlung der Schlankheit erst mit der vorhandenen Definition der kritischen Verzweigungslast möglich ist und noch festgelegt werden muss, wird zum Vergleichen der Verhältnisse eine Ersatzsteifigkeit definiert. Sinnvoll erscheint hier zum einen der Einfluss der Maschenweite zwischen den Querstäben, die wie bereits gezeigt eine wesentliche Größe zur Beschreibung der Stabilitätsgefahr ist, und zum anderen die effektive Tragstabhöhe, da diese maßgeblich die Höhe der Druckzone und damit auch die Anfälligkeit für ein Ausknicken des Stabes bestimmt.

Für den Vergleich zwischen den analytischen und numerischen Ergebnissen werden die Verhältnisse in Abbildung 6-17 für die definierte Ersatzschlankheit dargestellt. Die Punkte stellen in dem Graphen die Ergebnisse für die durchgeführten Versuche dar, wogegen die Kreuze die berechneten Verhältnisse für die parametrischen Probekörper repräsentieren. Die gestrichelt eingezeichnete Linie gibt das Verhältnis von eins an und beschreibt die identische Übereinstimmung der analytischen und numerischen Verzweigungslast. Darunterliegende Werte befinden sich auf der sicheren Seite, da eine kleinere analytische Verzweigungslast ein früheres Einschätzen des Stabilitätsversagens in der Bemessung bedeutet. Die Werte über der Linie resultieren entsprechend in eine unsichere Bemessung, da die analytische über der numerisch ermittelten Verzweigungslast liegt.

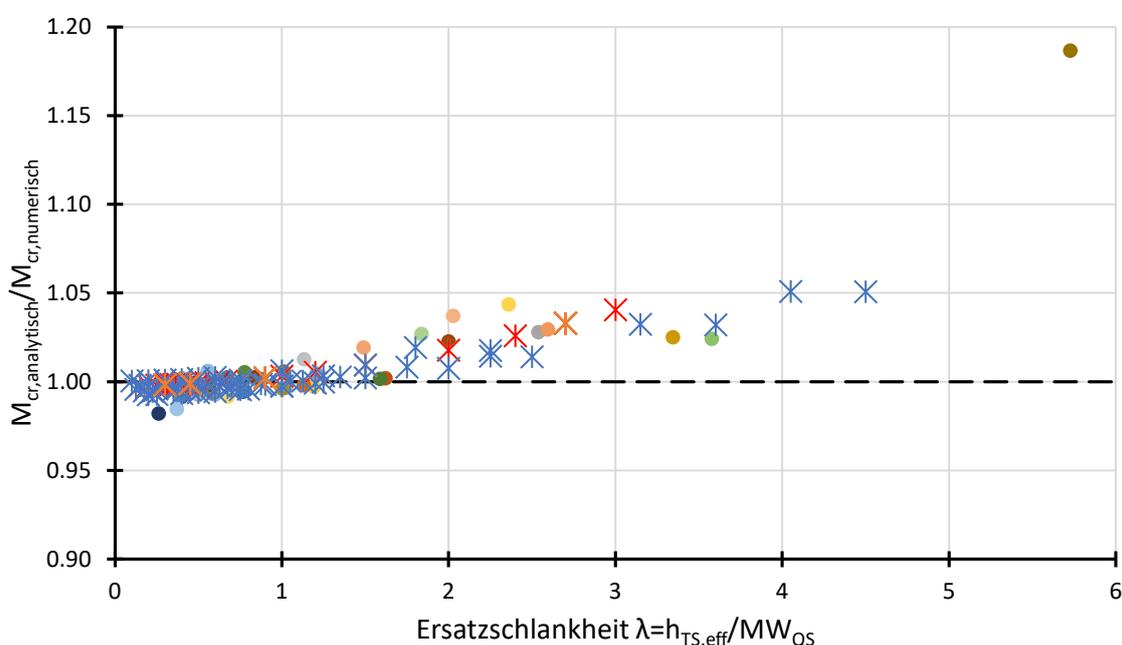


Abbildung 6-17: Vergleich der analytisch und numerisch ermittelten Verzweigungslasten

Die Ergebnisse weisen für eine niedrige Ersatzschlankheit eine nahezu identische analytische und numerische Lösung mit Tendenz zur sicheren Seite auf. Erst ab einer Ersatzschlankheit von eins bis zwei gehen die Verhältnisse über zur unsicheren Bemessungsseite und weichen teilweise sogar bis zu fünf oder sogar fast zwanzig Prozent ab. Dieser Zusammenhang erweist sich nach näherer Betrachtung jedoch analog zu den Ergebnissen der Abbildung 6-12 als unproblematisch, denn eine hohe Ersatzschlankheit bedeutet im Umkehrschluss auch eine niedrige Maschenweite, die für die Einschätzung der Stabilitätsgefahr weniger relevant ist. Daher sind die analytischen Ergebnisse insbesondere für eine niedrige Ersatzschlankheit interessant, die entsprechend der Abbildung 6-17 nahezu identisch zu den numerischen Ergebnissen sind. Daher gilt die analytische Formel für die kritische Verzweigungslast nach Gleichung (6.15) als ausreichend genau, um im Folgenden eine Schlankheit mithilfe dieser zu definieren.

6.3.3 Elastische und Plastische Schlankheit

Im Stahlbau werden nach Eurocode 3 [9] für das Biegeknicken und Biegedrillknicken die Schlankheit mithilfe der zugehörigen kritischen Verzweigungslast und dem Normalkraft- beziehungsweise Momentenwiderstand berechnet. Analog dazu kann für den Ersatzstab ebenfalls die Momententragfähigkeit berechnet werden und mit der kritischen Verzweigungslast ins Verhältnis gesetzt werden. Da sowohl eine elastische wie auch eine plastische Tragfähigkeit berechnet wird, kann dies ebenfalls für die Schlankheit geschehen. Die Formeln sind in den Gleichungen (6.16) und (6.17) gegeben.

$$\bar{\lambda}_{el} = \sqrt{\frac{M_{el,TS}}{M_{cr}}} \quad (6.16)$$

$$\bar{\lambda}_{pl} = \sqrt{\frac{M_{pl,TS}}{M_{cr}}} \quad (6.17)$$

Die Momententragfähigkeit errechnet sich für die jeweilige Schlankheit gemäß nach den Gleichungen (6.18) und (6.19).

$$M_{el,TS} = \frac{h_{TS,eff}^2 \cdot b_{TS}}{6} \cdot f_y \quad (6.18)$$

$$M_{pl,TS} = \frac{h_{TS,eff}^2 \cdot b_{TS}}{4} \cdot f_y \quad (6.19)$$

Mithilfe der bereits berechneten kritischen Verzweigungslast für alle vorhandenen experimentellen und parametrischen Probekörper und der einfachen Bestimmung der jeweiligen Momententragfähigkeit kann für jeden Probekörper die elastische und plastische Schlankheit ermittelt werden. Die kritische Verzweigungslast ist dabei für beide Formeln dieselbe, lediglich die elastische und plastische Momententragfähigkeit bringt einen Unterschied zwischen den

beiden Werten. Dieser Faktor beträgt aufgrund der fünfzig Prozent höheren plastischen Traglastreserve bei rechteckigen Querschnitten und aufgrund der Wurzel in der Formel für die Schlankheit in jedem Fall das $\sqrt{1,5}$ -fache.

In dem nächsten Schritt wird überprüft, ob diese Definition der Schlankheit für die vorliegende Vielzahl an Probekörpern mit und ohne Stabilitätsversagen eine sinnvolle Einschätzung der Stabilität bringt. Ein erstes Indiz gibt die erneute Betrachtung der Genauigkeit der Formel für die kritische Verzweigungslast nach Gleichung (6.15), die nun über der wirklichen Schlankheit statt der Ersatzschlankheit dargestellt werden kann. In Abbildung 6-18 ist zu erkennen, dass die Abweichungen für sehr gedrungene Tragstäbe nun einer Gesetzmäßigkeit folgend bei geringer, für das Stabilitätsversagen nicht relevanter Schlankheit auftreten. Die schlankeren Geometrien ab einer plastischen Schlankheit von 0,60 bewegen sich dagegen um beziehungsweise knapp unter dem Verhältnis von eins und weisen damit eine sehr hohe Genauigkeit für die analytische Formel auf. Die Abweichung der analytischen Verzweigungslasten bei einer geringen Schlankheit unter 0,40 könnte mithilfe von Korrekturfaktoren angepasst werden, jedoch wird aufgrund der Irrelevanz für die Bemessung darauf verzichtet.

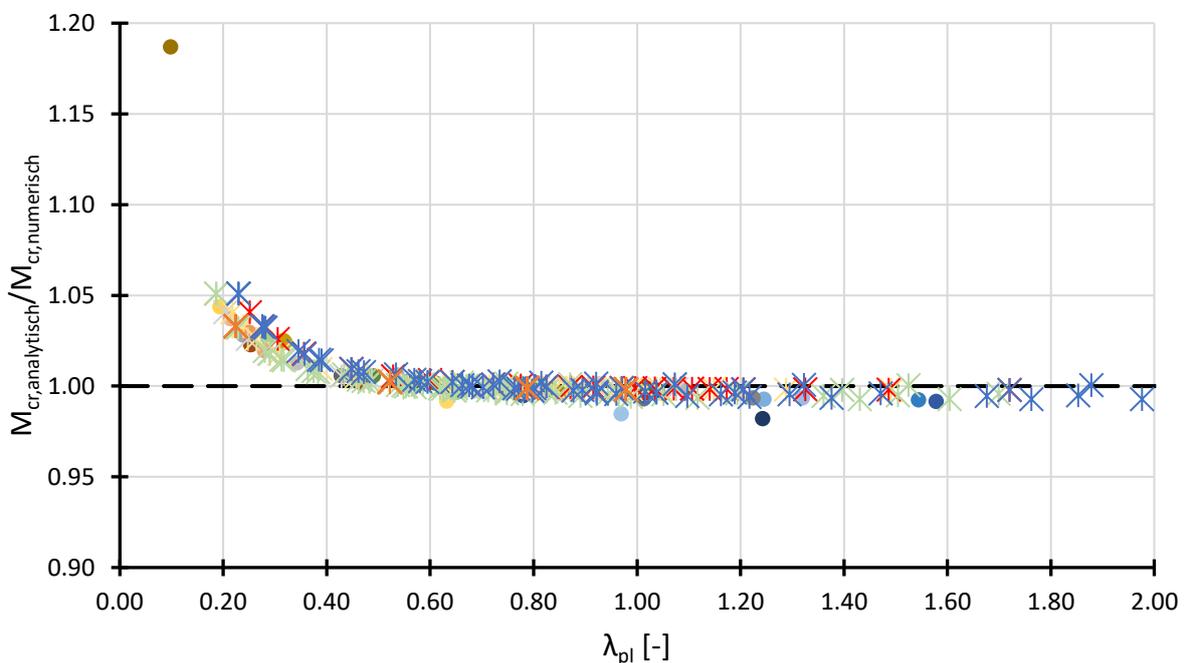


Abbildung 6-18: Zweiter Vergleich der analytisch und numerisch ermittelten Verzweigungslasten

Des Weiteren können nun die erreichten Traglasten den elastischen und plastischen Tragfähigkeiten nach den Gleichungen (6.7) und (6.8) in Abhängigkeit der zugehörigen Schlankheit gegenübergestellt und das Auftreten des Stabilitätsversagens dadurch näher betrachtet werden. Dazu wird für jeden experimentellen und parametrischen Probekörper die maximal erreichte Kraft ausgelesen. In den Kraft-Verformungs-Kurven ohne Stabilitätsversagen ist die Kraft maximal, sobald es zum Entlasten des Probekörpers kommt. Da die plastische Tragfähigkeit, wie in Kapitel 6.2 gezeigt worden ist, in jedem Fall in dem Übergang zum vollständig plastischen Verhalten der Gitterrostplatte liegt, ist dieser maximale Wert für alle Probekörper

ohne Stabilitätsversagen größer als die Tragfähigkeiten. Daher kann für diese Konfigurationen die volle elastische und auch plastische Tragfähigkeit angesetzt werden und wird in den folgenden Graphen mit dem Wert 1,0 beschrieben.

Auch die Probekörper mit einem Stabilitätsversagen im voll plastischen Bereich des Kraft-Verformungs-Diagramms der Probekörper können die definierte plastische Tragfähigkeit komplett ausnutzen. Erst wenn es zum Versagen vor Erreichen der jeweiligen Tragfähigkeit kommt, werden die Verhältnismerte aus maximal erreichter Kraft zur Tragfähigkeit kleiner 1,0 und sind relevant für die Bemessung.

Um diese Zusammenhänge für alle durchgeführten und berechneten Gitterrostplatten zu visualisieren, ist in Abbildung 6-19 dieses Verhältnis aus maximal erreichter Kraft zur elastischen Tragfähigkeit über der elastischen Schlankheit dargestellt. Der Verhältnismwert wird analog zum Eurocode 3 [9] mit dem griechischen Buchstaben χ bezeichnet und ist wie bereits beschrieben durch den Wert 1,0 nach oben hin begrenzt. Weiterhin ist zu erkennen, dass nur wenige Konfigurationen von Gitterrostplatten vor dem Erreichen der elastischen Grenztragfähigkeit ein Stabilitätsversagen aufweisen. Davon ist zudem nur ein Probekörper aus den experimentellen Versuchsreihen und die restlichen Punkte stellen parametrische Probekörper dar, die allesamt außergewöhnlich hohe Maschenweiten besitzen und daher sehr schlank ausfallen.

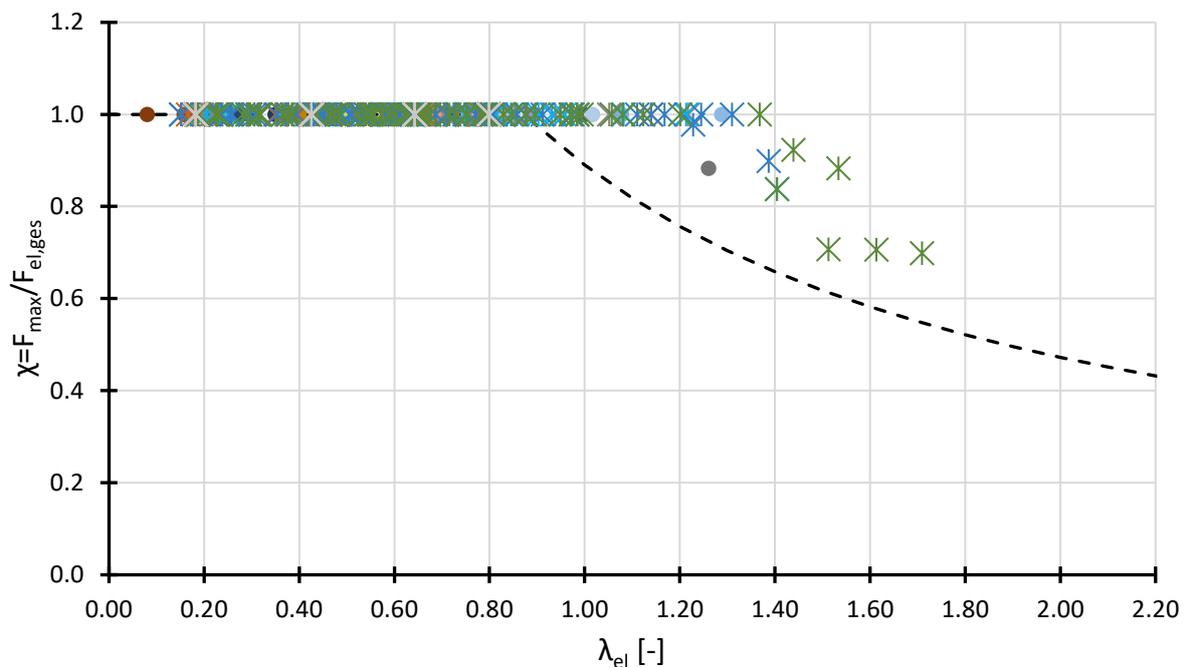


Abbildung 6-19: Verhältnis der erreichten Last zur elastischen Tragfähigkeit über der Schlankheit

Die eingezeichnete Kurve stellt in dem Zusammenhang die sogenannte Winter-Kurve dar, welche im Eurocode 3 Teil 5 [15] den Abminderungsfaktor ρ für das Beulen von beidseitig gehaltenen, plattenförmigen Bauteilen nach Gleichung (2.18) beschreibt. Da dort keine Unterscheidung zwischen der elastischen und plastischen Tragfähigkeit beziehungsweise Schlankheit vorhanden ist, wird diese Funktion für beide Tragfähigkeiten gleichermaßen in die Graphen

ingezeichnet. In Bezug auf die elastische Tragfähigkeit ist sichtbar, dass die erreichten Traglasten weit über der Winter-Kurve liegen und die Gitterroste daher erst bei schlankeren Geometrien beulen.

Anders sehen diese Erkenntnisse bei der Betrachtung der plastischen Tragfähigkeit und Schlankheit in Abbildung 6-20 aus, da in diesem Graphen wesentlich mehr Probekörper vor Erreichen der plastischen Tragfähigkeit ein Ausknicken der höchstbelasteten Tragstäbe aufweisen. Die vorhandene Schlankheit wird aufgrund des Faktors $\sqrt{1,5}$ zwischen der elastischen und plastischen Schlankheit entzerrt und es kommt bereits bei niedrigerer Schlankheit zu einem Stabilitätsversagen.

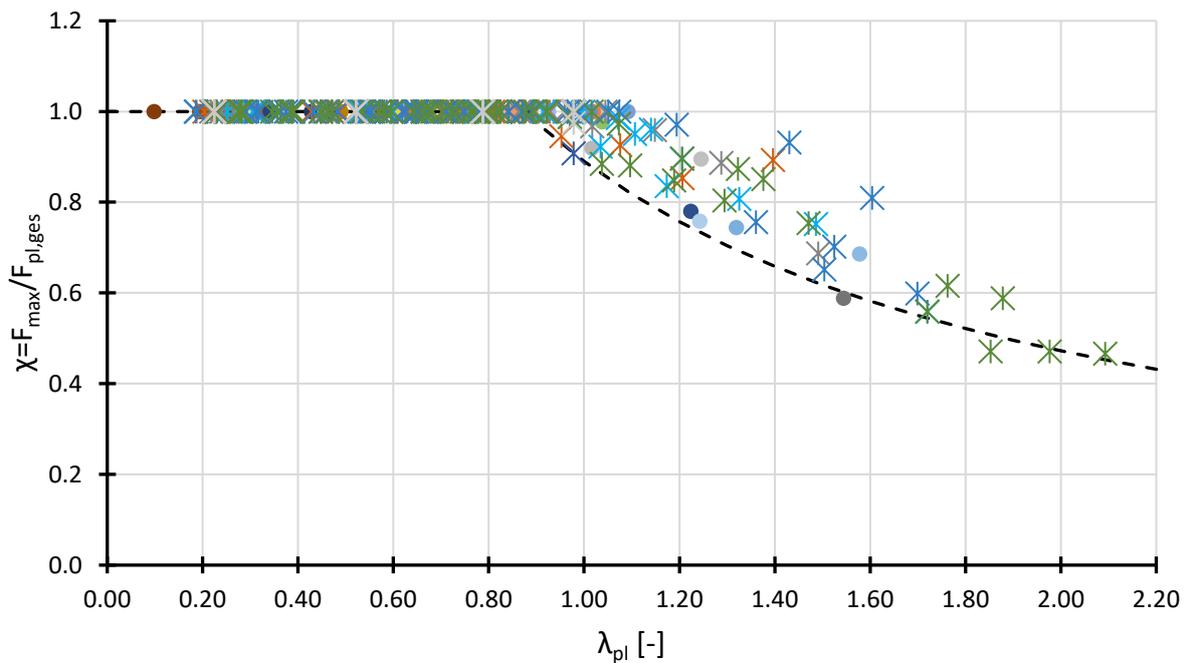


Abbildung 6-20: Verhältnis der erreichten Last zur plastischen Tragfähigkeit über der Schlankheit

Die Winter-Kurve stellt für die plastischen Tragfähigkeits- und Schlankheitszusammenhänge zudem eine gute Orientierung für die Abminderungsfaktoren χ dar, indem nahezu alle Werte knapp über dieser Kurve liegen. Der Ansatz des Plattenbeulens spiegelt sich in dem plastischen Tragverhalten deutlich wider.

Insgesamt erweist sich die berechnete Schlankheit als guter Indikator für eine Einschätzung des Stabilitätsversagens. Sowohl bei der elastischen als auch plastischen Gegenüberstellung tritt das Stabilitätsversagen vor Erreichen der Tragfähigkeit nur bei hoher Schlankheit auf. Zudem resultiert eine weitere Erhöhung der Schlankheit in stetig abnehmende Traglasten.

6.4 Definition der elastischen und plastischen Grenzschlankheit

Als letztes wird der Einfluss einer steigenden Schlankheit auf die Bemessung festgelegt. Dazu werden zwei Möglichkeiten in Betracht gezogen, die unter Beachtung der Zielsetzung für das neue Bemessungskonzept gegeneinander abgewogen werden.

Die erste Möglichkeit stellt die Begrenzung der Schlankheit dar, bis zu der eine Bemessung möglich ist. Dazu werden die zuvor gezeigten Verhältnisse zwischen der erreichten und vorhandenen Tragfähigkeit, die unter dem Wert 1,0 liegen, ausgeschlossen, indem eine Bemessung für die jeweilige Tragfähigkeit ab dieser Schlankheit nicht erlaubt wird.

Die Alternative dazu ist die Ermittlung von zwei weiteren Formeln in Abhängigkeit der elastischen beziehungsweise plastischen Schlankheit, mithilfe derer der Abminderungsfaktor χ berechnet wird. Dieser Faktor kann anschließend mit der elastischen beziehungsweise plastischen Tragfähigkeit multipliziert werden, um eine reduzierte Tragfähigkeit infolge der Stabilitätsgefahr zu ermitteln und diese für die Bemessung anzusetzen.

Ziel des neuen Bemessungskonzeptes ist es, eine möglichst simple Berechnung analog zu der bisherigen RAL-GZ für Gitterroste [1] beizubehalten. Aufgrund der bereits hinzugekommenen Formeln für die effektive Tragstabhöhe und die kritische Verzweigungslast erscheint es sinnvoller, eine weitere aufwändige Berechnung für die reduzierte Tragfähigkeit zu unterlassen. Insbesondere für die elastische Tragfähigkeit bringt diese Berechnung kaum einen Mehrwert, da bei typischen Gitterrostabmessungen ein Stabilitätsversagen nicht vorkommt. Somit wird der Ansatz über die Grenzschlankheit gewählt und im Folgenden anhand der Traglast-Schlankheit-Diagramme ermittelt.

Für die elastische Bemessung sind die Bereiche mit und ohne Stabilitätsversagen in Abbildung 6-21 eingezeichnet. Der erste Probekörper, der ein Stabilitätsversagen vor Erreichen der elastischen Tragfähigkeit aufweist, besitzt eine Schlankheit von knapp über 1,20, weshalb dieser Wert für eine elastische Grenzschlankheit vorgeschlagen wird. Jegliche Geometrien mit einer geringeren Schlankheit sind somit sicher zu bemessen, wogegen die Gitterroste mit einer höheren elastischen Schlankheit nicht bemessen werden können.

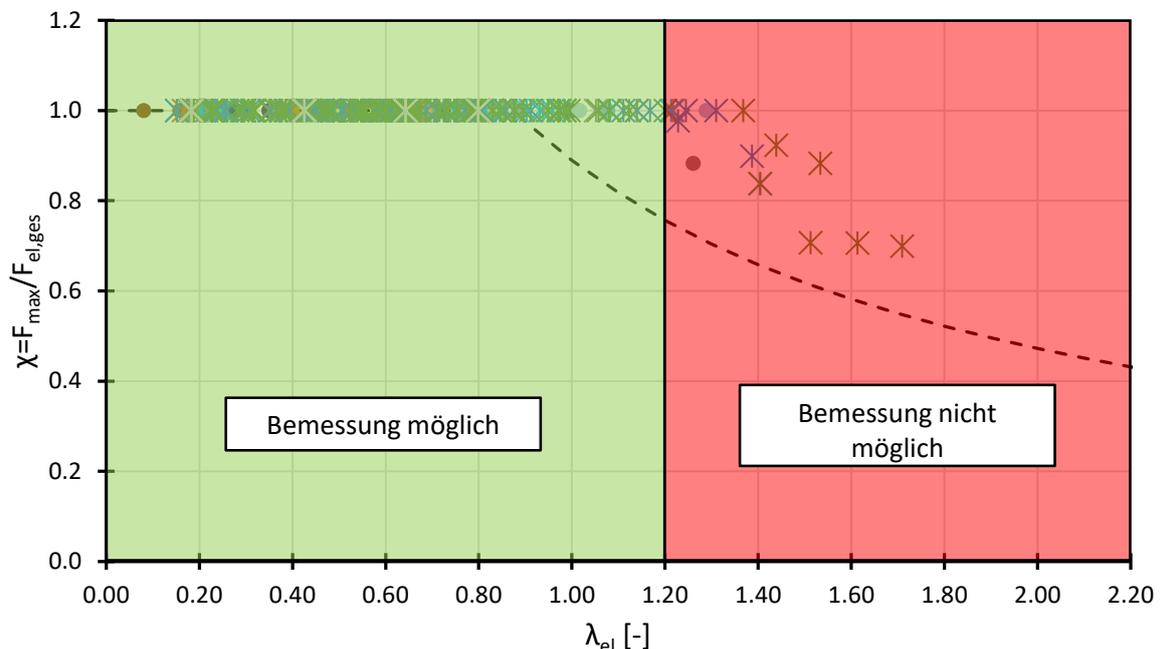


Abbildung 6-21: Grenzschlankheit für die elastische Bemessung

Dasselbe Vorgehen wird für die plastische Tragfähigkeit und Schlankheit in Abbildung 6-22 durchgeführt. Für eine plastische Bemessung ergibt sich demnach eine gewählte Grenzschlankheit von 0,95, bis zu der die Tragfähigkeit ohne Stabilitätsversagen der Tragstäbe erreicht wird. Diese Grenzschlankheit stimmt zudem nahezu mit dem Punkt der Winter-Kurve überein, ab dem eine Abminderung der Tragfähigkeit beim Plattenbeulen nach Eurocode 3 [15] berücksichtigt werden muss.

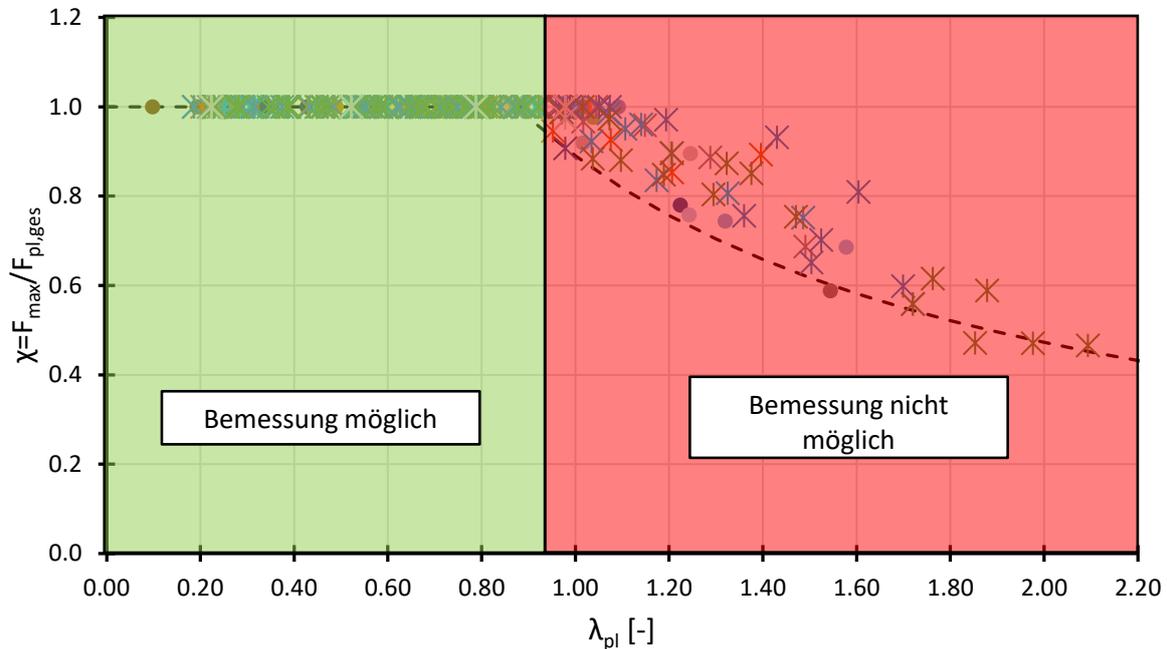


Abbildung 6-22: Grenzschlankheit für die plastische Bemessung

Diese zwei Grenzwerte für die Schlankheit sind im Rahmen der Vorüberlegungen lediglich Vorschläge für die Bemessung und können zur Sicherheit auch niedriger gewählt werden.

6.5 Vorgehen mithilfe eines neuen Bemessungskonzeptes

Für einen abschließenden Überblick über die Erkenntnisse und die Zusammenhänge zu den unterschiedlichen, ermittelten Formeln wird in diesem Kapitel das angedachte Vorgehen zur Bemessung einer Gitterrostplatte chronologisch aufgeführt. Dazu wird analog zur bisherigen RAL-GZ [1] zunächst die Einwirkung ermittelt und anschließend mit der Widerstandseite verglichen. Letztere wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes jedoch etwas erweitert. Zunächst wird die effektive Tragstabhöhe bestimmt, woraufhin eine kritische Verzweigungslast der Tragstäbe sowie die daraus resultierende Schlankheit ermittelt werden kann und anschließend die Tragfähigkeit der Gitterrostplatte berechnet wird.

Die Einwirkungsseite ändert sich in dem neuen Bemessungskonzept nicht und kann, wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben, über das statische System einer beidseitig gelenkig gelagerten Gitterrostplatte unter einer Einzellast F_p nach Gleichung (6.20) berechnet werden.

$$M_k = \frac{F_p \cdot \left(L - \frac{b_{LW}}{2}\right)}{4} \quad (6.20)$$

Die Bemessungseinwirkung ermittelt sich nach Gleichung (6.21) über den Sicherheitsfaktor γ_Q , der für eine veränderliche Einwirkung 1,5 beträgt.

$$M_d = \gamma_Q \cdot M_k \quad (6.21)$$

Als nächstes folgt die Ermittlung der Tragfähigkeit, die mit der Bestimmung der effektiven Tragstabhöhe beginnt. Diese kann für verzinkte Pressroste aus Baustahl nach der Gleichung (6.22) berechnet werden, worin der β -Faktor die Störbereichsbreite infolge der Schlitzung berücksichtigt und nach Gleichung (6.23) bestimmt wird.

$$h_{TS,eff} = h_{TS} \cdot \frac{MW_{QS} - b_{QS} \cdot \beta}{MW_{QS}} + (h_{TS} - h_{QS,Schlitz}) \cdot \frac{b_{QS} \cdot \beta}{MW_{QS}} \quad (6.22)$$

$$\beta = \frac{h_{TS}}{h_{QS,Schlitz}} \cdot (0,0187 \cdot MW_{QS} + 0,0841) \quad (6.23)$$

Für Schweißpressroste kann die effektive Tragstabhöhe mit der 0,95-fachen oder der 0,97-fachen vorhandenen Tragstabhöhe abgeschätzt werden, wobei der erste Wert dem unteren Grenzwert und der zweite Wert dem Mittelwert aus den Versuchen entspricht.

Mit der berechneten effektiven Tragstabhöhe kann im nächsten Schritt zunächst die plastische Schlankheit berechnet werden, da diese die Berücksichtigung einer höheren Tragfähigkeit ermöglicht. Dazu wird zum einen die plastische Momententragfähigkeit eines Tragstabes in Gleichung (6.24) und die kritische Verzweigungslast in Gleichung (6.25) benötigt.

$$M_{pl,TS} = \frac{h_{TS,eff}^2 \cdot b_{TS}}{4} \cdot f_y \quad (6.24)$$

$$M_{cr} = \frac{\pi \cdot h_{TS,eff} \cdot b_{TS}^3 \cdot E}{MW_{QS}} \cdot \sqrt{\frac{0,319}{24 \cdot (1 + \nu)} + \frac{h_{TS,eff}^2 \cdot \pi^2}{1728 \cdot MW_{QS}^2}} \quad (6.25)$$

Die plastische Schlankheit wird daraufhin nach Gleichung (6.26) ermittelt und muss für eine mögliche plastische Bemessung kleiner als die plastische Grenzschlankheit von 0,95 sein.

$$\bar{\lambda}_{pl} = \sqrt{\frac{M_{pl,TS}}{M_{cr}}} \leq \bar{\lambda}_{pl,grenz} = 0,95 \quad (6.26)$$

Falls diese Bedingung nicht eingehalten wird, ist die elastische Momententragfähigkeit eines Tragstabes in Gleichung (6.27) und die elastische Schlankheit in Gleichung (6.28) zu berechnen. Diese Schlankheit darf die elastische Grenzschlankheit von 1,20 nicht überschreiten, sonst ist eine Bemessung des betrachteten Gitterrostes generell nicht möglich.

$$M_{el,TS} = \frac{h_{TS,eff}^2 \cdot b_{TS}}{6} \cdot f_y \quad (6.27)$$

$$\bar{\lambda}_{el} = \sqrt{\frac{M_{el,TS}}{M_{cr}}} \leq \bar{\lambda}_{el,grenz} = 1,20 \quad (6.28)$$

Falls eine der beiden Grenzwerte eingehalten ist, darf im letzten Schritt der Momentenwiderstand der gesamten Gitterrostplatte ermittelt werden. Dazu wird zunächst die Anzahl der mittragenden Stäbe n benötigt, die mithilfe der Formel aus [22] bestimmt werden kann. Je nachdem, ob eine plastische Bemessung möglich ist oder nur eine elastische Bemessung durchgeführt werden darf, wird das Widerstandsmoment nach Gleichung (6.29) oder (6.30) bestimmt.

$$W_{pl,ges} = \frac{h_{TS,eff}^2 \cdot b_{TS}}{4} \cdot n \quad (6.29)$$

$$W_{el,ges} = \frac{h_{TS,eff}^2 \cdot b_{TS}}{6} \cdot n \quad (6.30)$$

Der Nachweis wird im Anschluss analog zur bisherigen RAL-GZ [1] über den Spannungsvergleich durchgeführt und ist je nach plastischer beziehungsweise elastischer Bemessung in Gleichung (6.31) und (6.32) dargestellt.

$$E_d = \sigma_{pl,d} = \frac{M_d}{W_{pl,ges}} \leq R_d = f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_M} \quad (6.31)$$

$$E_d = \sigma_{el,d} = \frac{M_d}{W_{el,ges}} \leq R_d = f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_M} \quad (6.32)$$

Damit ist ein Vorschlag für eine in sich schlüssige Bemessung von Gitterrostplatten gegeben, die nun sowohl mit elastischen als auch plastischen Tragfähigkeiten durchgeführt werden kann. Der Gewinn an Tragfähigkeit gegenüber der bisherigen RAL-GZ [1] für die darin enthaltenen Abmessungen ist dabei aufgrund der niedrigeren Anzahl an mittragenden Stäben nur marginal, jedoch ist nun eine Bemessung von beliebigen Gitterrostkonfigurationen möglich.

7 Schlussfolgerung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, die Tragfähigkeit von Gitterrosten mithilfe von experimentellen und numerischen Untersuchungen näher zu ergründen und darauf basierend eine Grundlage für ein neues Bemessungskonzept zu schaffen. Die experimentelle Durchführung von Traglastversuchen diente dabei als Basis für eine erste Auswertung des Tragverhaltens von Gitterrostplatten. Zusätzlich wurden Gitterroststreifenversuche, die als Referenzversuche zur Ermittlung der Tragfähigkeit einzelner Tragstäbe dienen, herangezogen. Zur Ermittlung der wichtigsten Materialparameter wurden zudem Zugprobenversuche durchgeführt. Anschließend ist ein FE-Modell an diesen Ergebnissen kalibriert und für eine Erweiterung der Versuchsmatrix genutzt worden. Anhand der experimentellen und numerischen Ergebnisse konnte zum Schluss eine weitestgehend analytische Herangehensweise gefunden werden, welche das aktuelle Vorgehen zur Bemessung von Gitterrosten nach der RAL-GZ [1] erweitern soll.

Die durchgeführten Traglastversuche der Gitterrostplatten wiesen abhängig von der Maschenweite und der Tragstabhöhe sehr regelmäßige Ergebnisse in Kapitel 4.3.1 auf. So besitzen die meisten Gitterroste mit Maschenteilungen bis einschließlich 33mm keinen Abfall der Tragfähigkeit, wogegen bei den Gitterrosten ab einer Maschenteilung von 66mm ein Stabilitätsversagen an den höchstbelasteten Tragstäben auftritt. Zudem besitzt die Querschnittsabmessung der Tragstäbe einen Einfluss auf diese Versagensart, da Gitterroste mit größerem h/b -Verhältnis der Tragstäbe ebenfalls häufiger ein Stabilitätsversagen aufweisen.

Des Weiteren ist in Kapitel 4.3.2 die allgemeine Tragfähigkeit der Gitterroste in Abhängigkeit ihrer geometrischen Randbedingungen untersucht worden, wobei in Anlehnung an die aktuelle RAL-GZ [1] der Berechnungsansatz über die mittragenden Stäbe n verfolgt wurde. Dazu sind sowohl ein Ansatz über die Durchbiegung und Biegesteifigkeit mithilfe der Referenzversuche als auch über die Spannung im höchstbelasteten Tragstab auf numerischer Basis durchgeführt worden. Beide Ansätze ergeben ähnliche Werte für die am Lastabtrag beteiligte Anzahl an Tragstäben, welche allerdings um einiges niedriger ausfallen, als sie in der momentanen Bemessung berücksichtigt werden. Grund dafür ist zum einen die unsichere Berechnung der Anzahl mittragender Stäbe auf Grundlage der Forschungsergebnisse aus dem MPA-Bericht [8] und zum anderen die nun genauere Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren. So sind statt eines alleinigen Einflusses der Tragstabhöhe sowohl die Flächen- und Torsionsträgheitsmomente der Trag- und Querstäbe als auch die Gitterrostabmessungen und die Lasteinleitungsfläche entscheidend für die Anzahl mittragender Stäbe. Eine Formel für die Ermittlung der Anzahl mittragender Tragstäbe n in Abhängigkeit dieser Parameter gibt [22] auf Grundlage der Forschungsergebnisse.

Die numerischen Untersuchungen in Kapitel 5.4 erweiterten die Versuchsergebnisse und unterstützen die zuvor erarbeiteten Zusammenhänge. Zusätzlich wurde das Stabilitätsversagen mithilfe der Finite-Elemente-Methode näher untersucht, sodass sowohl viele neue Gitterrost-

platten mit dieser Versagensart berechnet als auch ein Ersatzsystem und eine kritische Verzweigungslast in Bezug auf die jeweilige Konfiguration ermittelt werden konnte. Darauf basierend wurde in Analogie zum Eurocode 3 für Stahlbau [9] eine Schlankheit für das Ersatzsystem eines Tragstabfeldes in Kapitel 6.3.3 definiert und damit eine Einschätzung der Stabilitätsgefahr ermöglicht. Um jedoch eine anwenderfreundliche Bemessung einschließlich der Berechnung der Schlankheit zu ermöglichen, wurde ebenfalls ein analytischer Weg zur Bestimmung der kritischen Verzweigungslast und dadurch auch der Schlankheit gefunden.

Mithilfe von Grenzwerten für die elastische und plastische Schlankheit, bis zu denen eine Bemessung mit der jeweiligen Schlankheit durchgeführt werden können, wurde das Stabilitätsversagen aus der Bemessung vollständig ausgeschlossen. Die berechneten Tragfähigkeiten mit elastischen oder plastischen Tragfähigkeiten in Kapitel 6.2 resultierten dabei aus der Berechnung mithilfe der Anzahl mittragender Stäbe n und geben gute Grenztragfähigkeiten in Bezug auf die Traglastkurven der Probekörper vor. Insbesondere die Verformungen werden dabei insofern eingegrenzt, dass das Tragverhalten der gesamten Gitterrostplatte nicht in den vollständig plastischen Bereich übergeht, in dem die Verformungen im Vergleich zur Traglast überdimensional ansteigen.

Weiterhin konnten die Gitterroststreifenversuche in Kapitel 6.1 genutzt werden, um eine genauere Erfassung der Tragstabschwächung infolge der Einlassung der Querstäbe zu bewirken. Statt der bisherigen Berücksichtigung eines Abminderungsfaktors für Pressroste kann nun mithilfe einer Formel, die aus einer Zielwert- und linearen Regressionsanalyse stammt, die effektiv wirksame Tragstabhöhe ermittelt werden. Die Formel ist in Abhängigkeit der geometrischen Bedingungen des Trag- und Querstabes sowie der Maschenteilungen für Pressroste aus Baustahl anwendbar. Tragstäbe von Schweißpressrosten erfahren entgegen der bisherigen Annahme auch eine leichte Querschnittsschwächung der Tragstäbe und können über einen einheitlichen Grenzwertfaktor berücksichtigt werden. Die effektive Tragstabhöhe geht sowohl in die Berechnung der Schlankheit als auch in die Ermittlung der elastischen und plastischen Tragfähigkeit ein.

Zum Schluss wurde in Kapitel 6.5 aus all diesen Erkenntnissen ein Vorschlag für ein neues Bemessungskonzept erstellt, mithilfe dessen die Einwirkungen sowie die elastischen und plastischen Tragfähigkeiten für beliebige Gitterrostabmessungen berechnet und nachgewiesen werden können. Zwar ergibt die neue Bestimmung der Anzahl mittragender Tragstäbe im Vergleich zur bisherigen RAL-GZ [1] einen geringeren Wert, jedoch kann dieser Verlust der Tragfähigkeit durch die neue Berücksichtigung des plastischen Widerstands in etwa ausgeglichen werden. Dadurch basiert die Berechnung eines ungefähr gleich hohen Bemessungswiderstands nun auf einem mechanisch und analytisch konsistenten Ansatz.

Dennoch sind in der vorliegenden Abschlussarbeit aufgrund des Umfangs nicht alle Einflussfaktoren und Problematiken behandelt worden, sodass in Zukunft noch weitere Forschungsaspekte in diesem und in weiteren Projekten aufgegriffen werden können. Zum einen sind

sowohl die Messmarken der Photogrammetrie zur Beobachtung der gesamten Plattenverformung als auch die Dehnmessstreifen für eine genaue Spannungs-Dehnungs-Untersuchung weiter auszuwerten. Zum anderen kann das Sicherheitskonzept noch weiter ausgearbeitet werden. Hierbei ist insbesondere die Tragstabhöhe von großer Bedeutung, da bereits die Abminderung durch die effektive Tragstabhöhe einen starken Einfluss auf die Tragfähigkeit der Gitterroste besitzt. Diese Werte sind allerdings auf die tatsächlich vorhandenen Stababmessungen und nicht auf die nominell angegebenen Abmessungen bezogen. Somit besteht durch die Toleranzausnutzung eine Unsicherheit in der Bemessung, durch die die wirklich vorhandene Traglast überschätzt wird.

Zuletzt ist auch das Tragverhalten von nicht verzinkten Pressrosten aus Baustahl, Edelstahl und Aluminium noch weiter zu untersuchen, da die Abweichungen zu den verzinkten Gitterrosten im Zusammenhang mit der niedrigen Versuchszahl zu groß sind, um eine sichere Aussage für die Tragfähigkeitsberechnung treffen zu können. Vor allem die Schlitzungen mit den verschiedenen Techniken zur Verpressung und dem Grad der Kontaktstellen sollten näher untersucht werden. Mit weiteren experimentellen Untersuchungen dazu könnten Gitterroste aus diesen Werkstoffen ebenfalls in das vorgeschlagene Bemessungsschema gebracht werden.

Literaturverzeichnis

- [1] 2008-09. RAL-GZ 638 Gitterroste
- [2] Lichtgitter GmbH: Pressroste. <https://www.lichtgitter.com/produkte/gitterroste/pressrost/pressroste>, abgerufen am: 22.11.2021
- [3] Lichtgitter GmbH: Schwerlastroste. <https://www.lichtgitter.com/produkte/gitterroste/pressrost/schwerlastroste>, abgerufen am: 22.11.2021
- [4] Lichtgitter GmbH: Schweißpressroste. <https://www.lichtgitter.com/produkte/gitterroste/schweisspressrost/schweisspressroste>, abgerufen am: 22.11.2021
- [5] Helling & Neuhaus GmbH & Co. KG: Stahltreppen. <https://www.gitterroste.de/de/einsatzbereiche/stahltreppen.php>, abgerufen am: 22.11.2021
- [6] Helling & Neuhaus GmbH & Co. KG: Gitterroste verzinkt. <https://www.gitterroste.de/de/einsatzbereiche/gitterroste-verzinkt.php>, abgerufen am: 22.11.2021
- [7] 2010-12. Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung
- [8] Über die Untersuchung von Gitterrosten zur Ermittlung von Bemessungsgrundlagen in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgemeinschaft Gitterroste im Fachbereich Stahlblechverarbeitung e.V. Hagen. Forschungsbericht-Nr. 547 70, Staatliches Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfalen, 1989
- [9] 2010-12. Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
- [10] Numerische Untersuchungen zur Ermittlung von mittragenden Tragstäben bei Variation der Querstabdimension von verzinkten Gitterrosten. Bericht Nr.: 18-13 Im Auftrag von Industrieverband Gitterroste e.V. (IGI), Hoffmeister, B. u. Nonn, J., 2019
- [11] Prüfbericht-Nr. A1742011-R1 - Gitterroste in feuerverzinkter Ausführung, Kiwa GmbH, 2017
- [12] Timošenko, S. P. u. Woinowsky-Krieger, S.: Theory of plates and shells. McGraw-Hill classic textbook reissue series. New York: McGraw-Hill 1987
- [13] Naumes, J. C.: Biegeknicken und Biegedrillknicken von Stäben und Stabsystemen auf einheitlicher Grundlage. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2009. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Stahlbau und Leichtmetallbau der RWTH Aachen, Bd. 70. Aachen: Shaker 2010
- [14] Petersen, C.: Statik und Stabilität der Baukonstruktionen. Elasto- und plasto-statische Berechnungsverfahren druckbeanspruchter Tragwerke, Nachweisformen gegen Knicken, Kippen, Beulen. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg 1980
- [15] 2017-07. Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile
- [16] Bürgel, R., Richard, H. A. u. Riemer, A.: Werkstoffmechanik. Bauteile sicher beurteilen und Werkstoffe richtig einsetzen. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014
- [17] 2016-12. DIN 50125: Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben

- [18] 2020-06. DIN EN ISO 6892-1: Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur
- [19] Albert, A. (Hrsg.): Bautabellen für Ingenieure. Mit Berechnungshinweisen und Beispielen. Köln: Bundesanzeiger Verlag 2016
- [20] Öchsner, A. (Hrsg.): Theorie der Balkenbiegung. essentials. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2016
- [21] Simulia Dassault Systèmes: Abaqus, Version 2021HF8
- [22] Industriebericht: Erarbeitung einer neuen Bemessungsgrundlage für Gitterroste aus Baustahl, Edelstahl und Aluminium, Bien, Nonn, et al, unveröffentlicht
- [23] Ansys Inc.: Ansys, Version 2021 R1
- [24] Don Ho: Notepad++, Version 8.1.9.2
- [25] Rusch, A. u. Lindner, J.: Tragfähigkeit von beulgefährdeten Querschnittselementen unter Berücksichtigung von Imperfektionen. Stahlbau 70 (2001) 10, S. 765–774
- [26] Dlubal Software: RFEM, Version 5.27
- [27] W. Wlassow: Dünnwandige elastische Stäbe. Berlin: VEB- Verlag für Bauwesen 1965

Nomenklatur

Im Rahmen dieser Arbeit werden die folgenden Formelzeichen verwendet:

Lateinische Buchstaben

a	Länge des Beulfeldes beim Plattenbeulen
b	Höhe des Beulfeldes beim Plattenbeulen
B	Breite einer Gitterrostplatte
b_{LW}	Breite der Lasteinleitungsfläche in Tragstabrichtung
b_{QS}	Allgemeine Bezeichnung für die Breite des Querstabes
$b_{QS,nom}$	Nominelle Abmessung der Querstabbreite
$b_{QS,vorh}$	Vorhandene Abmessung der Querstabbreite
b_{RS}	Allgemeine Bezeichnung für die Breite des Randstabes
b_{TS}	Allgemeine Bezeichnung für die Breite des Tragstabes
$b_{TS,nom}$	Nominelle Abmessung der Tragstabbreite
$b_{TS,vorh}$	Vorhandene Abmessung der Tragstabbreite
E	Elastizitätsmodul
EI_{Platte}	Biegesteifigkeit einer Gitterrostplatte
$EI_{Streifen}$	Biegesteifigkeit eines Gitterroststreifens
$F_{el,ges}$	Elastische Tragfähigkeit einer Gitterrostplatte
$F_{pl,ges}$	Plastische Tragfähigkeit einer Gitterrostplatte
f_u	Zugfestigkeit
f_y	Streckgrenze
G	Schubmodul
h_{QS}	Allgemeine Bezeichnung für die Höhe des Querstabes
$h_{QS,nom}$	Nominelle Abmessung der Querstabhöhe
$h_{QS,vorh}$	Vorhandene Abmessung der Querstabhöhe
h_{RS}	Allgemeine Bezeichnung für die Höhe des Randstabes

h_{TS}	Allgemeine Bezeichnung für die Höhe des Tragstabes
$h_{TS,nom}$	Nominelle Abmessung der Tragstabhöhe
$h_{TS,vorh}$	Vorhandene Abmessung der Tragstabhöhe
$h_{TS,eff}$	Effektiv wirksame Tragstabhöhe
I_{QS}	Allgemeine Bezeichnung für das Flächenträgheitsmoment des Querstabes
$I_{QS,nom}$	Nominelles Flächenträgheitsmoment des Querstabes
$I_{QS,vorh}$	Vorhandenes Flächenträgheitsmoment des Querstabes
I_T	Torsionsträgheitsmoment
I_{TS}	Allgemeine Bezeichnung für das Flächenträgheitsmoment des Tragstabes
$I_{TS,nom}$	Nominelles Flächenträgheitsmoment des Tragstabes
$I_{TS,vorh}$	Vorhandenes Flächenträgheitsmoment des Tragstabes
$I_{TS,eff}$	Effektiv wirksames Flächenträgheitsmoment des Tragstabes
I_ω	Wölbträgheitsmoment
L	Stützweite einer Gitterrostplatte oder eines Gitterroststreifens
M_{cr}	Ideale kritische Verzweigungslast für das Biegedrillknicken
M_d	Bemessungsmoment der Einwirkung
$M_{el,ges}$	Elastischer Momentenwiderstand einer Gitterrostplatte
$M_{el,TS}$	Elastischer Momentenwiderstand eines Tragstabes
M_k	Charakteristisches Moment der Einwirkung
$M_{pl,ges}$	Plastischer Momentenwiderstand einer Gitterrostplatte
$M_{pl,TS}$	Plastischer Momentenwiderstand eines Tragstabes
MW_{QS}	Maschenweite zwischen den Querstäben
MW_{TS}	Maschenweite zwischen den Tragstäben
R_{el}, R_p	Streckgrenze
R_m	Zugfestigkeit
$W_{el,ges}$	Äquivalentes elastisches Widerstandsmoment einer Gitterrostplatte

$W_{pl,ges}$	Äquivalentes plastisches Widerstandsmoment einer Gitterrostplatte
$W_{TS,el}$	Elastisches Widerstandsmoment eines Tragstabes
$W_{TS,pl}$	Plastisches Widerstandsmoment eines Tragstabes

Griechische Buchstaben

β	Beiwert zur Berechnung der effektiven Tragstabhöhe
γ_M	Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstands von metallischen Werkstoffen
γ_Q	Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Einwirkungen
ε	Technische Dehnung
ε_w	Wahre Dehnung
λ	Verhältnis aus Biegesteifigkeiten und Maschenweiten
$\bar{\lambda}_{el}, \bar{\lambda}_{pl}$	Elastische und plastische Schlankheit zur Beschreibung der Stabilitätsgefahr
$\bar{\lambda}_{LT}$	Bezogene Schlankheit für das Biegedrillknicken
$\bar{\lambda}_p$	Bezogene Schlankheit für das Plattenbeulen
μ	Verhältnis aus Torsionssteifigkeiten und Biegesteifigkeiten
ν	Abminderungsfaktor für die Gitterrosttypen nach RAL-GZ
ν	Poissonzahl/Querkontraktionszahl
ρ	Abminderungsfaktor für das Plattenbeulen
σ	Technische Spannung
σ_{cr}	Ideale kritische Beulspannung
σ_w	Wahre Spannung
χ	Verhältnis der erreichten Traglast zur Tragfähigkeit eines Gitterrostes
χ_{LT}	Abminderungsfaktor für das Biegedrillknicken
ψ	Verhältnis der Randspannungen

Abkürzungen

DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
FE	Finite Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
RAL-GZ	Gütezeichen des Deutschen Instituts für Gütesicherung u. Kennzeichnung E.V.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Einsatz von Gitterrosten als Bodenfläche in einem Kraftwerk [4]	2
Abbildung 2-2: Treppenstufen aus schmalen Gitterrostplatten [5].....	3
Abbildung 2-3: Abmessungen eines typischen Gitterrostes	4
Abbildung 2-4: Schweißpressrost mit angeschweißten, verdrehten Verteilerstäben [4].....	4
Abbildung 2-5: Pressrost und Vollrost mit eingepressten Querstäben und Randeinfassung [2]	5
Abbildung 2-6: Maßgebende Laststellung infolge Einzellast auf eine zweiseitig gelagerte Platte [1]	7
Abbildung 2-7: Lastwürfelposition bei den ersten zehn Versuchskörpern [8]	9
Abbildung 2-8: Diagramme zur Ermittlung der Werte für die mittragenden Stäbe m [8]	10
Abbildung 2-9: Statisches Ersatzsystem für zweiseitig gelagerte Gitterrostplatte [10]	12
Abbildung 2-10: Finite-Elemente-Modellierung der Lasteinleitung [10].....	13
Abbildung 2-11: Gesetzmäßigkeit zur Beschreibung der Anzahl von mittragenden Tragstäben [10].....	15
Abbildung 2-12: Biegedrillknickproblem eines Trägers unter Momentenbeanspruchung [13]	18
Abbildung 2-13: Zweiseitig gelagertes Plattenbauteil mit linear elastischem Spannungsverlauf	19
Abbildung 3-1: Zugprobengeometrie E gemäß DIN 50125 [17].....	24
Abbildung 3-2: Versuchsaufbau für die Zugproben (links) und Seitenansicht einer Zugprobe (rechts).....	25
Abbildung 3-3: Ansicht des Versuchsaufbaus für die Gitterroststreifen	28
Abbildung 3-4: Zeichnungen des Versuchsaufbaus für die Streifenversuche mit 30mm Tragstabhöhe	28
Abbildung 3-5: Systemlängen für (1) 30mm, (2) 40mm, (3) 60mm und (4) 70mm Tragstabhöhe	29
Abbildung 3-6: Isometrische Ansicht des geplanten Versuchsstandes	31
Abbildung 3-7: Ansicht des gesamten Versuchsstandes für die Gitterrostplatten.....	31
Abbildung 3-8: Abmessungen und Bestandteile des Versuchsstandes für die Gitterrostplatten	32
Abbildung 3-9: Seilzugkonstruktion (links) und magnetische Haken an Klammern (rechts)...	33
Abbildung 3-10: Lasteinleitungssystem des Versuchsstandes der Gitterrostplatten.....	33
Abbildung 3-11: Angebrachte Messmarken und magnetische Haken zur Wegmessung.....	34
Abbildung 4-1: Spannungs-Dehnungs-Kurve von unverzinkten und verzinkten Proben aus Serie 1	37
Abbildung 4-2: Spannungs-Dehnungs-Kurve von Materialproben aus Edelstahl.....	38
Abbildung 4-3: Gegenüberstellung der ermittelten Fließspannungen aller relevanten Zugproben.....	38

Abbildung 4-4: Gegenüberstellung der verschiedenen Spannungs-Dehnungs-Kurven	40
Abbildung 4-5: Statisches System der Gitterroststreifen mit Abmessungen und Belastung ..	42
Abbildung 4-6: Traglastkurve eines Gitterroststreifens mit Steigung m im elastischen Bereich	42
Abbildung 4-7: Verhältnis von effektiver zu vorhandener Biegesteifigkeit	44
Abbildung 4-8: Schlitzungen der Gitterroste aus unverzinktem Baustahl, Edelstahl und Aluminium.....	45
Abbildung 4-9: Spannungstrajektorien für einen geschlitzten Tragstab aus Aluminium	46
Abbildung 4-10: Vergleich der Versuchs- und FE-Berechnungen für Aluminiumtragstäbe	46
Abbildung 4-11: Visualisierung der unterschiedlichen Querschnittshöhen	47
Abbildung 4-12: Effektive Tragstabhöhen der Aluminium-Probekörper und graphischer Vergleich	48
Abbildung 4-13: Kraft-Weg-Diagramm für Probekörper 1 der Gitterrostplatten.....	49
Abbildung 4-14: Verformung des Probekörpers 25 während der Versuchsdurchführung	50
Abbildung 4-15: Entstehung einer Beule im äußersten Tragstab von dem Probekörper 38 ..	51
Abbildung 4-16: Kraft-Weg-Diagramm für Gitterrostplatten-Probekörper 38.....	51
Abbildung 4-17: Statisches System der Gitterrostplatten mit Abmessungen und Belastung .	53
Abbildung 4-18: Verformungsbild einer Gitterrostplatte mit vollständig mittragenden Tragstäben	53
Abbildung 4-19: Kraft-Verformungs-Diagramm des Probekörpers 1 mit elastischer Steigung	54
Abbildung 4-20: Mittragende Stäbe der verschiedenen Probekörper und der Bemessungsnorm	56
Abbildung 4-21: Mittragende Stäbe dargestellt nach den Lastwürfelabmessungen	57
Abbildung 4-22: Mittragende Stäbe dargestellt für die effektive Tragstabhöhe	58
Abbildung 5-1: Benutzeroberfläche von Ansys	59
Abbildung 5-2: Darstellung der Geometrie des ersten Probekörpers in Ansys [23].....	62
Abbildung 5-3: Darstellung der numerischen Durchbiegung des ersten Probekörpers in Ansys [23].....	64
Abbildung 5-4: Gegenüberstellung der numerischen und experimentellen Ergebnisse (Mitte)	65
Abbildung 5-5: Vergleich von der Lasteinleitung über die Randknoten und die volle Fläche .	66
Abbildung 5-6: Gegenüberstellung der numerischen und experimentellen Ergebnisse (Rand)	67
Abbildung 5-7: Vergleich der mittragenden Stäbe n infolge Biegesteifigkeits- und Spannungsansatz	68
Abbildung 5-8: Vergleich der numerischen und experimentellen Ergebnisse von Probekörper 2	70
Abbildung 5-9: Vergleich des numerischen Ergebnisses mit und ohne Ansatz von Imperfektionen	70

Abbildung 5-10: Vergleich numerisch und experimentell erreichter Lasten bei Stabilitätsversagen.....	71
Abbildung 5-11: Last-Verformungs-Diagramm zur ersten Parameterstudie.....	74
Abbildung 5-12: Last-Verformungs-Diagramm des Probekörpers 15 mit verschiedenen Materialien.....	75
Abbildung 5-13: Last-Verformungs-Diagramm zur zweiten Parameterstudie	76
Abbildung 5-14: Last-Verformungs-Diagramme zur fünften Parameterstudie	77
Abbildung 5-15: Last-Verformungs-Diagramme zur siebten Parameterstudie	78
Abbildung 5-16: Mittragende Stäbe der Versuche, Parameterstudie 1 und Bemessungsnorm	80
Abbildung 5-17: Mittragende Stäbe der Versuche, Parameterstudien und Bemessungsnorm	81
Abbildung 5-18: Abhängigkeit der mittragenden Stäbe m von der Gitterrostplattenbreite... 81	81
Abbildung 6-1: Spannungsverlauf in einem Tragstab infolge der Störung durch die Schlitzung	84
Abbildung 6-2: Bereiche der gestörten und der ungestörten Spannungsverläufe.....	84
Abbildung 6-3: Graphische Darstellung der β -Faktoren aus der Zielwertanalyse für Pressroste	85
Abbildung 6-4: Graphische Darstellung der β -Faktoren und der Regressionsgeraden	86
Abbildung 6-5: Vergleich der experimentell und nach Formel ermittelten Biegesteifigkeiten	87
Abbildung 6-6: Verhältnisse der vorhandenen und effektiven Tragstabhöhen für Schweißpressroste.....	87
Abbildung 6-7: Elastische und plastische Tragfähigkeit des ersten Probekörpers	89
Abbildung 6-8: Elastische und plastische Tragfähigkeit des 40. Probekörpers	90
Abbildung 6-9: Erste Eigenform aus der Eigenwertanalyse zu Probekörper 6	91
Abbildung 6-10: Ansicht der Unterseite auf die ausknickenden Tragstäbe mit eingezeichneter Flucht	91
Abbildung 6-11: Ersatzstab mit Abmessungen und Randbedingungen.....	92
Abbildung 6-12: Gegenüberstellung der Verzweigungslasten in Abhängigkeit der Maschenweite	93
Abbildung 6-13: Verformungsfigur zur kritischen Verzweigungslast am Ersatzstab	94
Abbildung 6-14: Numerische Untersuchung zur kritischen Verzweigungslast in RFEM [26] ..	95
Abbildung 6-15: Gegenüberstellung der Verzweigungslasten in Abhängigkeit der Maschenweite	95
Abbildung 6-16: Statisches System zur Ermittlung der Verzweigungslast [14]	96
Abbildung 6-17: Vergleich der analytisch und numerisch ermittelten Verzweigungslasten... 98	98
Abbildung 6-18: Zweiter Vergleich der analytisch und numerisch ermittelten Verzweigungslasten	100

Abbildung 6-19: Verhältnis der erreichten Last zur elastischen Tragfähigkeit über der Schlankheit.....	101
Abbildung 6-20: Verhältnis der erreichten Last zur plastischen Tragfähigkeit über der Schlankheit.....	102
Abbildung 6-21: Grenzschlankheit für die elastische Bemessung	103
Abbildung 6-22: Grenzschlankheit für die plastische Bemessung	104

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Mindestmaße der Querstäbe von Schweißpressrosten [1]	6
Tabelle 2-2: Mindestmaße der Querstabhöhen von Pressrosten [1]	6
Tabelle 2-3: Mindestmaße der Querstabdicken von Pressrosten [1]	6
Tabelle 2-4: Anzahl der mittragenden Tragstäbe [1]	8
Tabelle 3-1: Übersicht der getesteten Probekörper in Versuchsserie 1	22
Tabelle 3-2: Übersicht der getesteten Probekörper in Versuchsserie 2	23
Tabelle 3-3: Übersicht der getesteten Probekörper in Versuchsserie 2 (Fortsetzung)	24
Tabelle 4-1: Vergleich der nominellen, vorhandenen und effektiven Flächenträgheitsmomente	43
Tabelle 5-1: Übersicht zu den durchgeführten Parameterstudien in Ansys	72

A Anhang

A.1 Übersicht über alle ermittelten Werte der Gitterroststreifenversuche

Tabelle A-1: Übersicht der gemessenen und effektiven Querschnittsgrößen der Gitterroststreifen

Nr.	Anzahl Tragstäbe	Stützweite	$h_{TS,vorh}$	$b_{TS,vorh}$	$h_{QS,vorh}$	$b_{QS,vorh}$	$h_{TS,eff}$	$EI_{TS,eff}$
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	kNcm ²
1	5	680	29,86	1,97	9,21	1,67	29,03	7.795,27
2	5	680	29,87	1,95	9,26	1,69	28,82	7.749,65
5	5	680	29,77	1,94	9,07	1,64	28,41	7.384,53
6	5	680	29,62	1,93	9,17	1,64	28,99	7.762,51
25	5	680	29,51	1,95	15,01	2,00	28,40	7.292,72
28	5	680	29,46	1,95	15,08	1,98	28,56	7.417,44
33	5	1320	69,63	5,01	14,31	3,03	63,56	218.872,96
34	5	1320	69,39	4,95	14,18	3,03	67,35	260.333,16
37	5	680	29,50	1,98	9,23	1,75	28,44	7.566,99
38	5	680	29,45	1,98	9,40	1,74	28,81	7.867,48
39	5	840	40,34	1,93	9,46	2,06	39,92	19.378,34
40	5	840	40,07	1,92	9,43	2,04	40,09	19.626,03
41	5	840	40,26	1,86	9,56	2,00	39,99	19.472,43
42	5	840	40,15	1,91	9,42	2,00	40,54	20.291,13
43	5	840	40,05	1,77	9,09	1,84	37,42	15.956,75
44	5	840	39,93	1,79	9,32	1,78	38,31	17.127,20
45	5	840	40,25	1,69	9,18	1,71	36,87	15.256,12
46	5	840	40,03	1,75	9,27	1,81	38,51	17.388,73
49	5	680	30,07	1,98	9,03	1,96	22,52	3.750,36
50	5	680	29,90	2,00	8,95	1,99	27,01	6.467,00
51	5	680	28,80	1,88	10,11	1,91	22,54	1.242,13
52	5	680	28,93	1,88	10,02	1,92	24,66	1.627,04
53	5	680	28,79	1,88	10,07	1,91	20,35	914,01
54	5	680	28,95	1,92	10,09	1,92	26,28	1.968,78
55	5	680	29,55	2,08	29,46	2,08	28,02	7.466,85
56	5	680	29,49	2,08	29,68	2,08	28,45	7.816,16
57	5	680	29,57	2,07	29,64	2,08	28,67	8.002,33
64	6	680	29,42	1,99	4,18	4,18	28,98	7.753,92
68	6	1160	59,22	5,02	4,83	4,83	57,04	158.153,50
69	6	1160	59,32	4,99	4,83	4,83	57,03	158.115,17
73	5	840	39,39	1,85	4,16	4,16	38,83	18.917,88
76	5	840	39,64	1,75	4,03	4,03	38,80	17.867,25

A.2 Übersicht über alle ermittelten Werte der Gitterrostplattenversuche

Tabelle A-2: Übersicht der gemessenen und effektiven Querschnittsgrößen der Gitterrostplatten
(Teil 1)

Nr.	$h_{TS,vorh}$	$b_{TS,vorh}$	$h_{QS,vorh}$	$b_{QS,vorh}$	$h_{TS,unverz}$	$b_{TS,unverz}$	$h_{TS,eff}$	$EI_{Platte,eff}$
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	kNcm ²
1	29,44	2,01	9,33	1,76	29,30	1,83	28,260	54.637,48
2	29,68	1,98	9,37	1,72	29,30	1,83	28,327	51.657,71
3	29,27	1,97	9,32	1,74	29,30	1,83	28,327	31.325,57
4	29,59	1,97	9,46	1,72	29,30	1,83	28,260	32.301,14
5	29,51	2,00	9,36	1,73	29,30	1,83	27,913	56.483,39
6	29,69	1,98	9,29	1,74	29,30	1,83	28,440	53.726,82
7	29,37	1,98	9,62	1,72	29,30	1,83	28,260	51.408,28
8	29,76	1,97	9,58	1,76	29,30	1,83	28,327	51.663,36
9	29,91	2,00	9,39	1,76	29,30	1,83	28,327	28.733,63
10	29,54	1,97	9,52	1,77	29,30	1,83	28,260	28.322,42
11	30,05	1,97	9,43	1,74	29,30	1,83	27,913	50.095,21
12	29,51	1,98	9,28	1,75	29,30	1,83	28,440	52.317,15
13	29,88	1,98	9,38	1,74	29,30	1,83	28,260	53.042,31
14	29,77	1,97	9,30	1,73	29,30	1,83	28,327	53.874,98
15	29,95	1,98	9,30	1,76	29,30	1,83	28,327	31.919,63
16	29,80	1,97	9,41	1,76	29,30	1,83	28,260	31.405,88
17	29,65	1,98	9,26	1,76	29,30	1,83	27,913	52.371,25
18	29,97	1,99	9,40	1,75	29,30	1,83	28,440	55.644,13
19	29,57	1,96	9,50	1,73	29,30	1,83	28,260	35.037,56
20	29,54	1,96	9,13	1,75	29,30	1,83	27,913	39.506,02
21	29,34	1,97	9,42	1,71	29,30	1,83	28,260	33.261,17
22	29,98	2,00	9,43	1,76	29,30	1,83	27,913	34.630,77
23	29,98	1,99	9,37	1,77	29,30	1,83	28,260	27.971,76
24	29,30	1,99	9,44	1,74	29,30	1,83	27,913	30.876,73
25	29,37	1,94	15,06	1,95	29,27	1,82	27,750	56.779,08
26	29,50	1,96	15,18	2,01	29,27	1,82	27,881	55.330,98
28	29,71	1,94	15,06	1,99	29,27	1,82	27,925	53.722,17
29	29,42	1,98	15,31	1,99	29,27	1,82	27,750	46.506,51
30	29,37	1,98	15,18	2,01	29,27	1,82	27,750	42.103,36
31	69,39	4,95	13,93	3,06	69,02	4,87	65,975	1.676.654,21
32	69,13	4,92	14,13	3,09	69,02	4,87	66,721	1.750.327,96
33	69,55	4,93	13,95	3,03	69,02	4,87	62,990	1.497.378,83
34	69,45	4,97	14,06	3,02	69,02	4,87	66,970	1.791.155,57
35	30,16	1,85	9,26	1,80	29,25	1,88	28,824	54.139,60
36	30,03	1,90	9,46	1,77	29,25	1,88	28,897	52.993,99
37	29,95	1,82	9,56	1,82	29,25	1,88	28,533	56.463,52
38	29,97	1,88	9,27	1,71	29,25	1,88	28,921	52.819,70
39	41,00	1,97	9,71	2,06	40,02	1,74	39,291	129.986,85
40	40,69	1,80	9,65	2,05	40,02	1,74	39,456	129.545,74

**Tabelle A-3: Übersicht der gemessenen und effektiven Querschnittsgrößen der Gitterrostplatten
(Teil 2)**

Nr.	$h_{TS,vorh}$	$b_{TS,vorh}$	$h_{QS,vorh}$	$b_{QS,vorh}$	$h_{TS,unverz}$	$b_{TS,unverz}$	$h_{TS,eff}$	$EI_{Platte,eff}$
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	$kNcm^2$
41	41,06	1,80	9,77	1,85	40,02	1,74	39,348	139.092,34
42	40,43	1,77	9,47	1,92	40,02	1,74	39,895	135.050,89
43	40,40	1,72	9,50	1,76	40,38	1,75	37,326	100.854,69
44	40,34	1,80	9,47	1,79	40,38	1,75	38,277	113.227,53
45	40,67	1,69	9,46	1,71	40,38	1,75	36,780	100.873,53
46	40,28	1,76	9,39	1,76	40,38	1,75	38,425	114.975,51
47	29,44	2,07	9,14	2,02	29,44	2,03	25,616	41.352,87
48	29,38	2,01	8,96	1,99	29,44	2,03	26,449	43.167,84
49	29,59	2,01	8,96	1,97	29,44	2,03	22,284	37.807,61
50	29,40	2,03	8,88	2,00	29,44	2,03	26,727	44.199,90
51	28,82	1,90	10,06	1,92	28,87	1,90	22,371	9.438,93
52	28,82	1,89	10,08	1,91	28,87	1,90	24,483	11.591,04
53	28,85	1,89	10,02	1,96	28,87	1,90	20,214	7.890,81
54	28,93	1,90	10,05	1,95	28,87	1,90	26,116	13.593,05
55	29,96	2,01	29,97	2,02	29,25	1,94	27,844	67.854,69
56	29,91	1,96	30,07	2,00	29,25	1,94	28,255	66.373,89
57	29,83	1,97	29,87	2,08	29,25	1,94	28,494	65.387,43
62	29,52	1,90	4,32	4,32	29,27	1,82	28,609	55.400,13
63	29,44	2,03	4,24	4,24	29,27	1,82	28,760	55.994,54
64	29,47	1,96	4,34	4,34	29,27	1,82	28,240	53.712,57
66	59,51	4,91	4,75	4,75	59,16	4,87	56,627	1.139.192,84
67	59,76	5,01	4,72	4,72	59,16	4,87	56,629	1.154.709,26
68	59,47	5,02	4,72	4,72	59,16	4,87	56,621	1.148.639,26
69	59,47	4,98	4,88	4,88	59,16	4,87	56,633	1.157.265,28
70	39,75	1,89	4,11	4,11	39,80	1,84	38,900	128.548,03
71	39,90	1,86	4,27	4,27	39,80	1,84	38,900	128.465,09
72	39,82	1,81	4,10	4,10	39,80	1,84	38,900	127.911,80
73	39,74	1,82	4,21	4,21	39,80	1,84	38,900	131.653,70
74	39,85	1,77	4,19	4,19	39,83	1,85	38,090	121.937,36
75	39,79	1,86	4,19	4,19	39,83	1,85	38,090	121.211,03
76	39,84	1,88	4,21	4,21	39,83	1,85	38,090	121.042,85
77	39,82	1,88	4,15	4,15	39,83	1,85	38,090	123.883,17

A.3 Spannungs-Dehnungs-Kurven der relevanten Tragstabmaterialproben

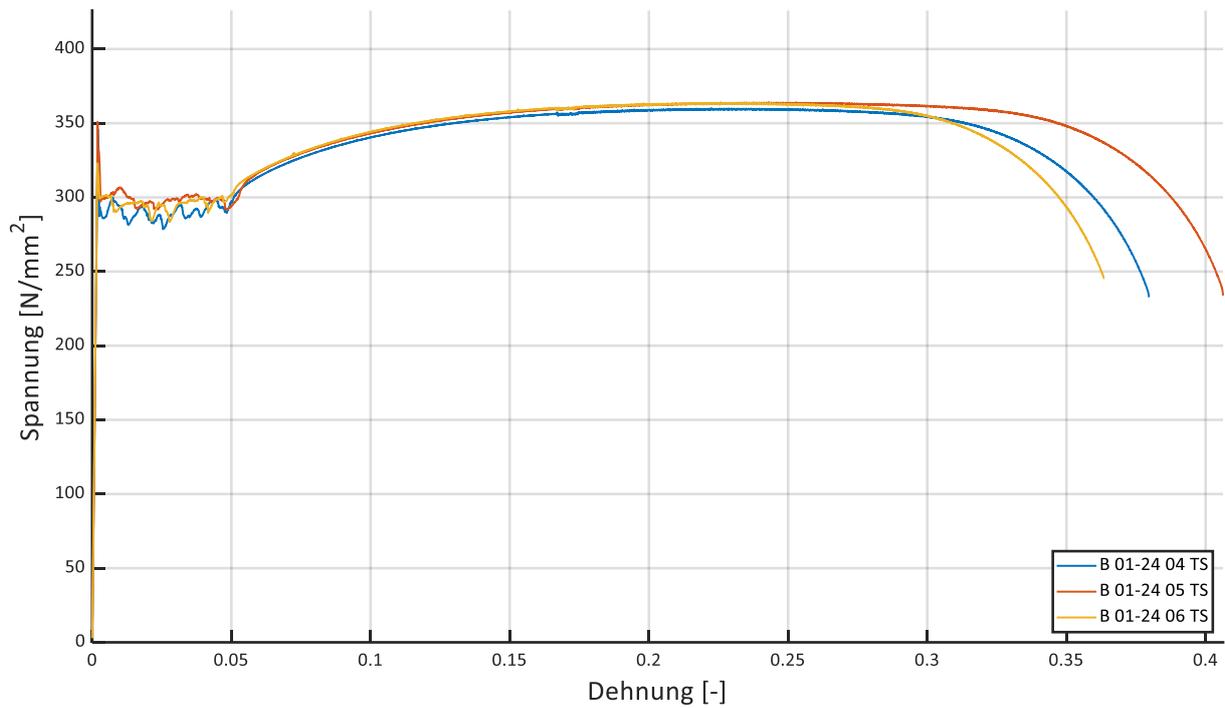


Abbildung A1: Materialproben der Tragstäbe aus Baustahl S235 (1-24)

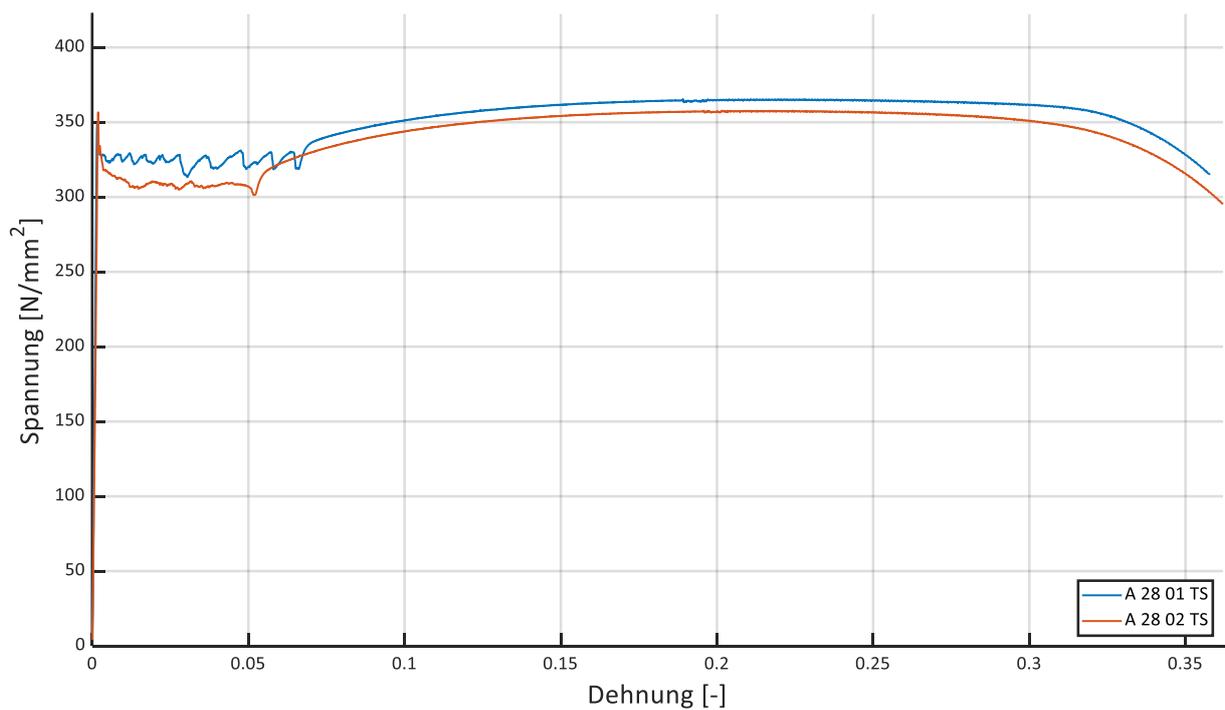


Abbildung A2: Materialproben der Tragstäbe aus Baustahl S235 (25-30)

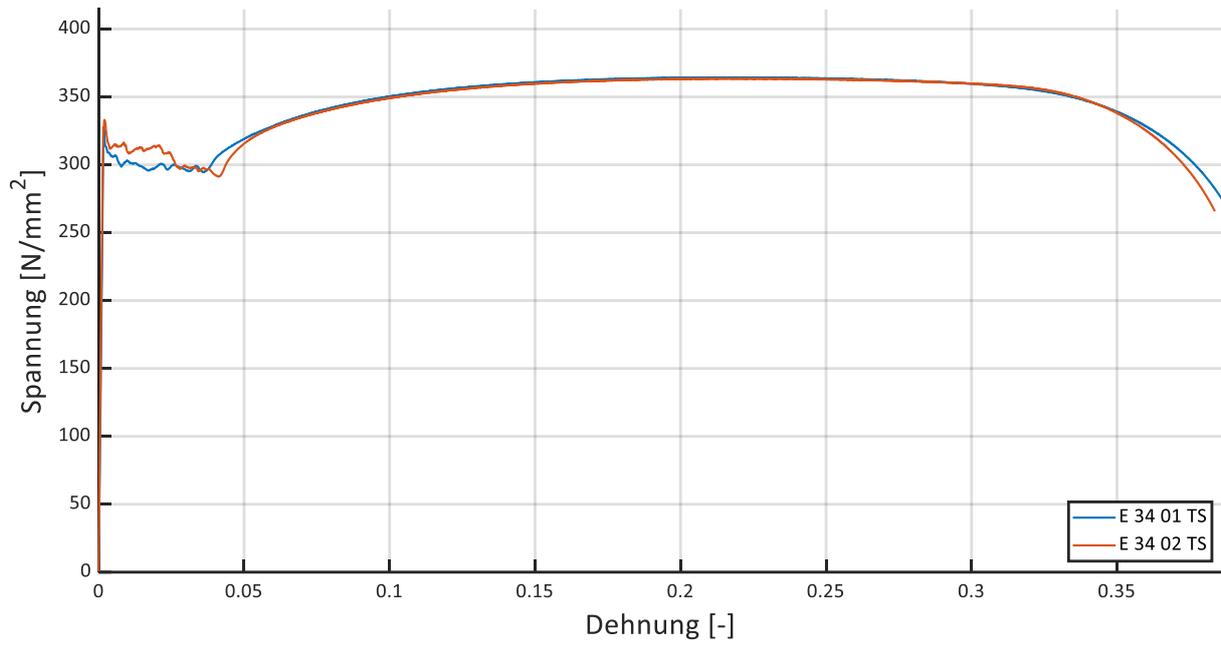


Abbildung A3: Materialproben der Tragstäbe aus Baustahl S235 (31-34)

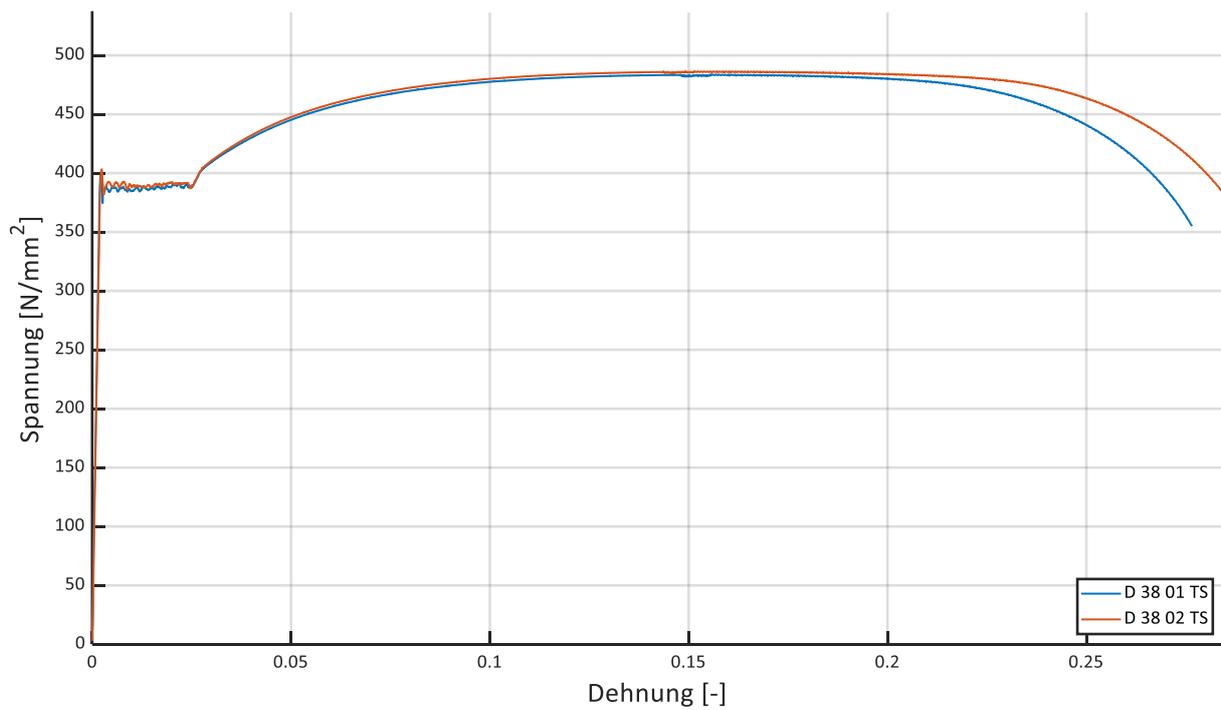


Abbildung A4: Materialproben der Tragstäbe aus Baustahl S355 (35-38)

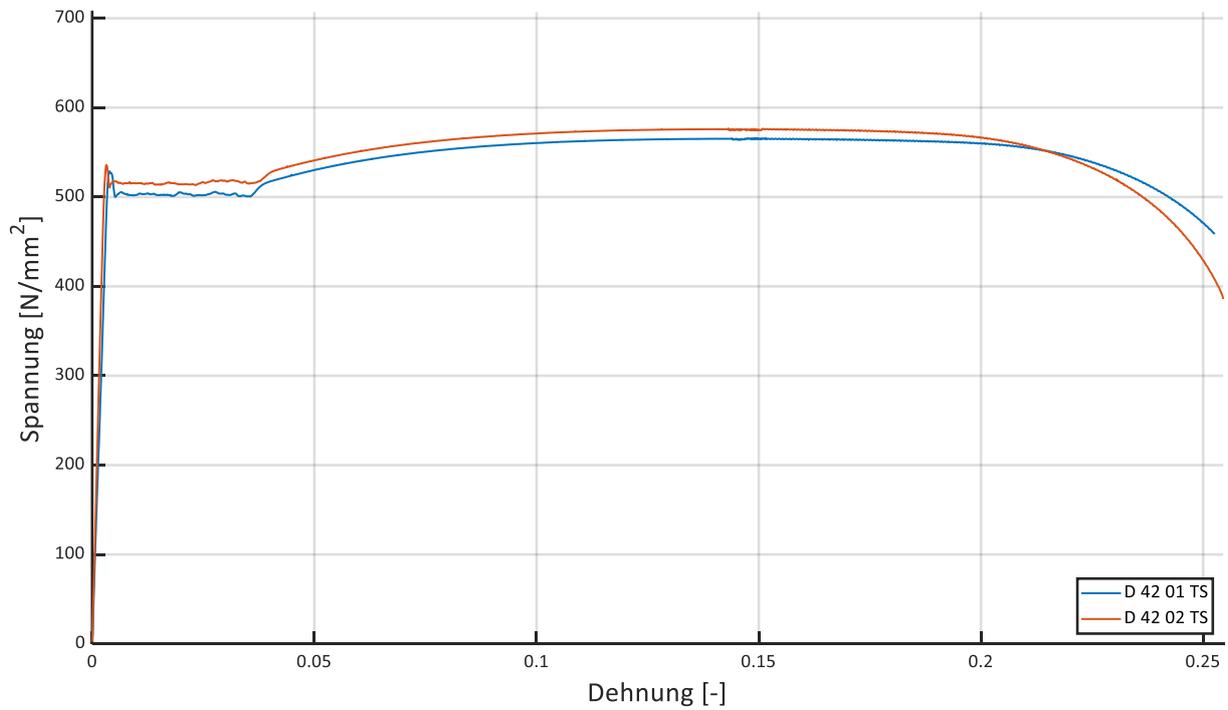


Abbildung A5: Materialproben der Tragstäbe aus Baustahl S460 (39-42)

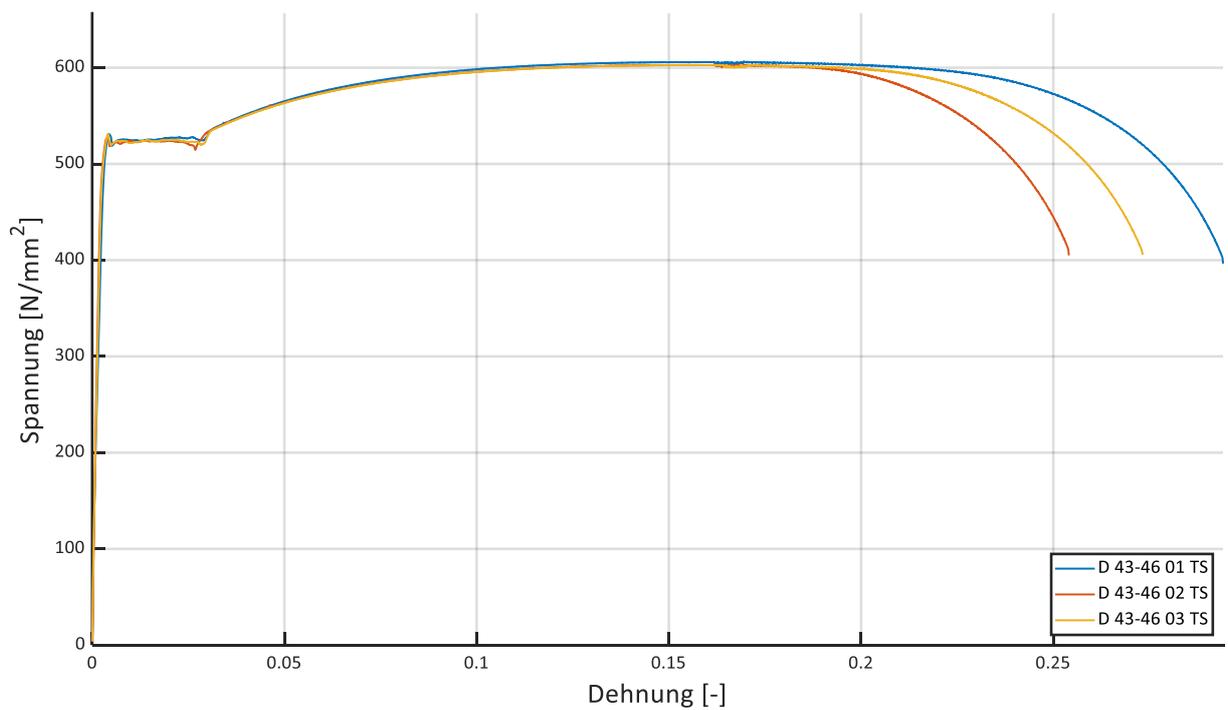


Abbildung A6: Materialproben der Tragstäbe aus Baustahl S460 (43-46)

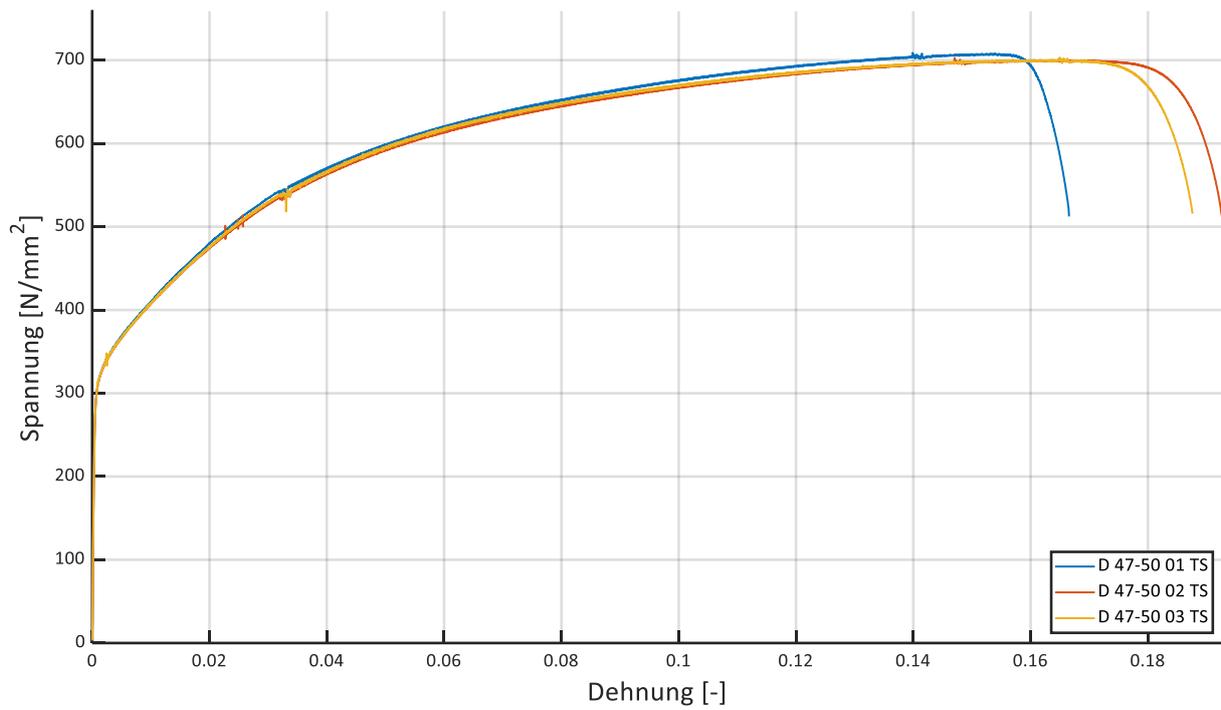


Abbildung A7: Materialproben der Tragstäbe aus Edelstahl (47-50)

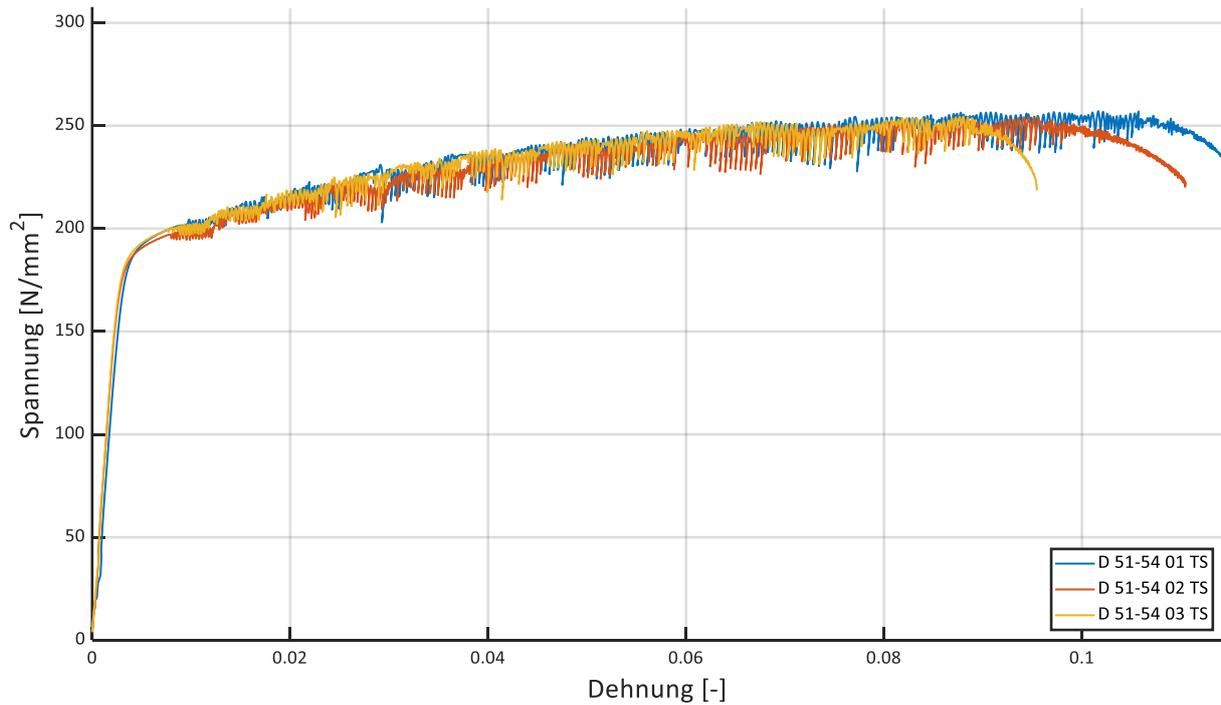


Abbildung A8: Materialproben der Tragstäbe aus Aluminium (51-54)

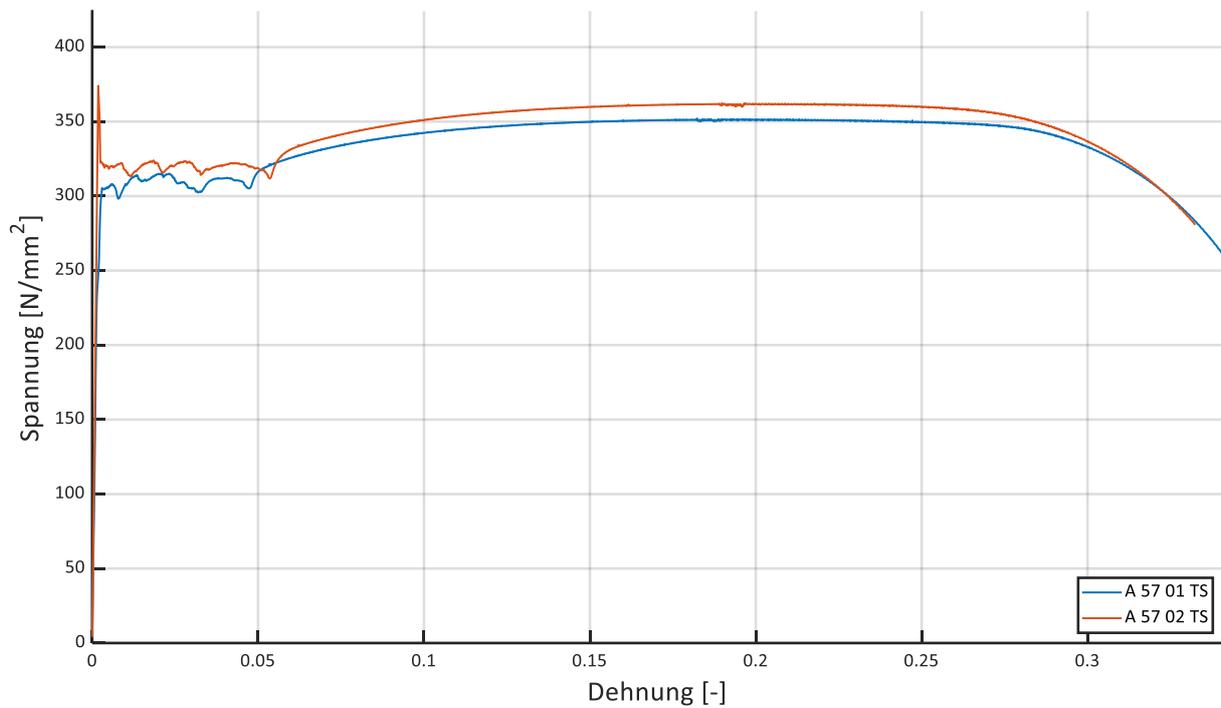


Abbildung A9: Materialproben der Tragstäbe aus Baustahl S235 (55-57)

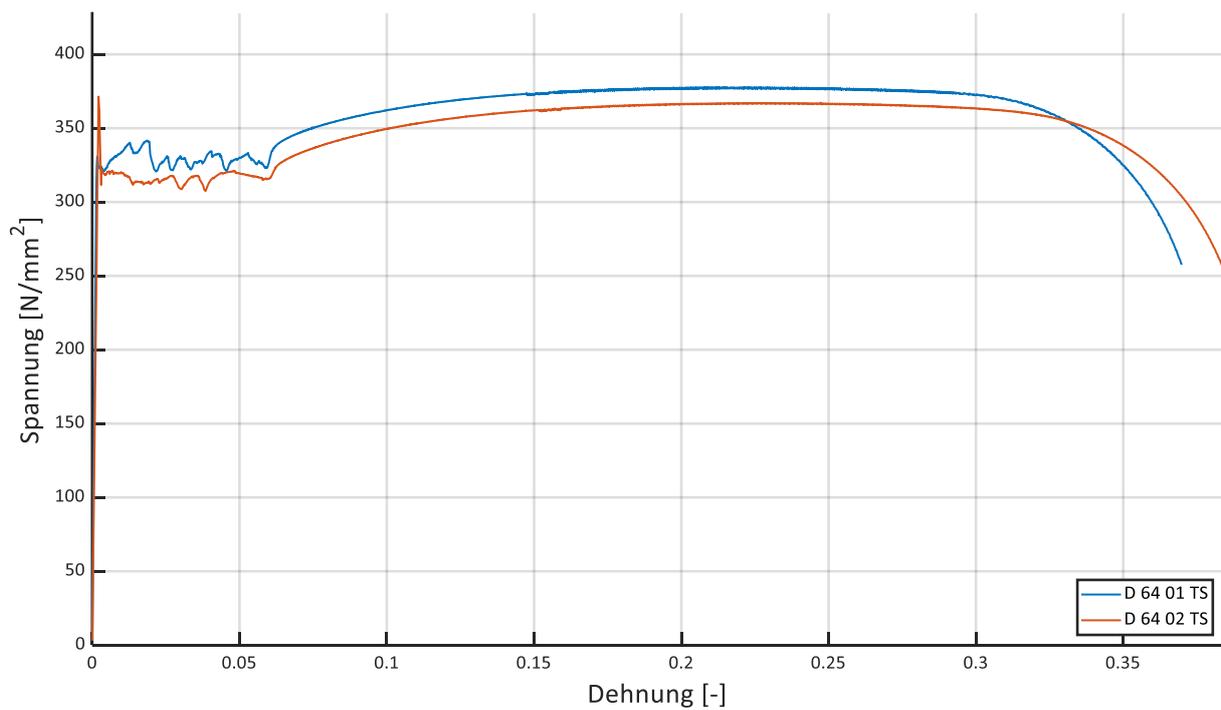


Abbildung A10: Materialproben der Tragstäbe aus Baustahl S235 (62-64)

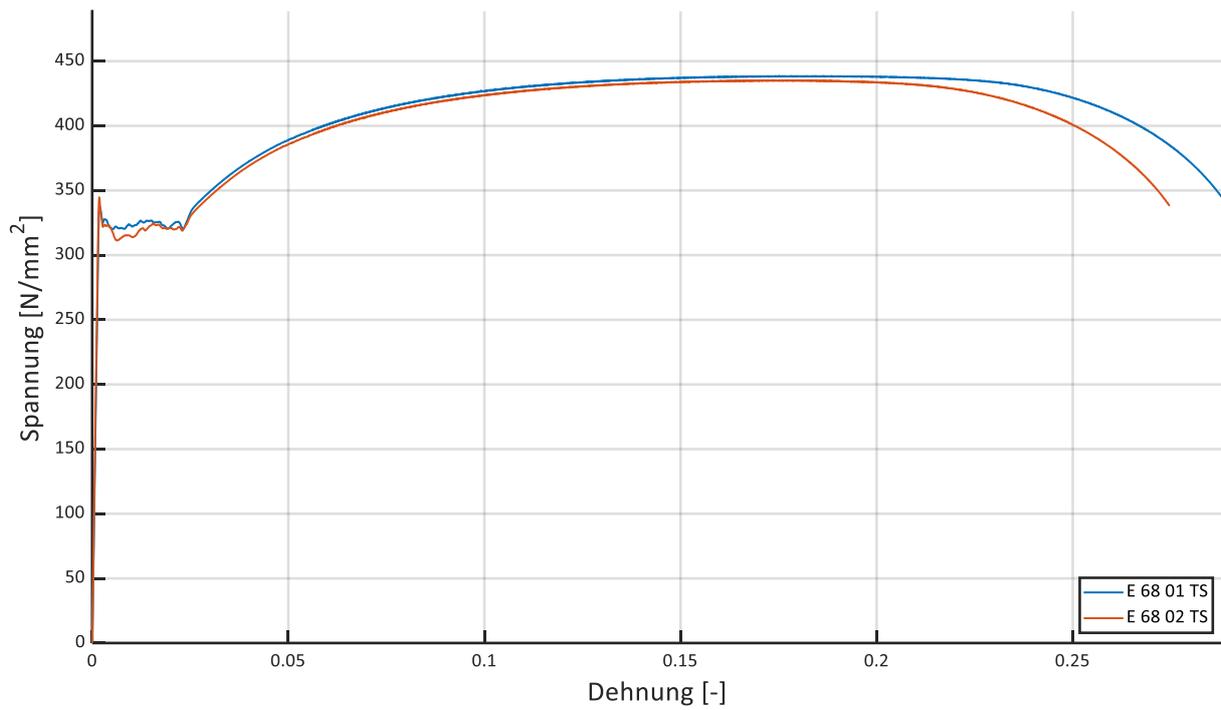


Abbildung A11: Materialproben der Tragstäbe aus Baustahl S235 (66-69)

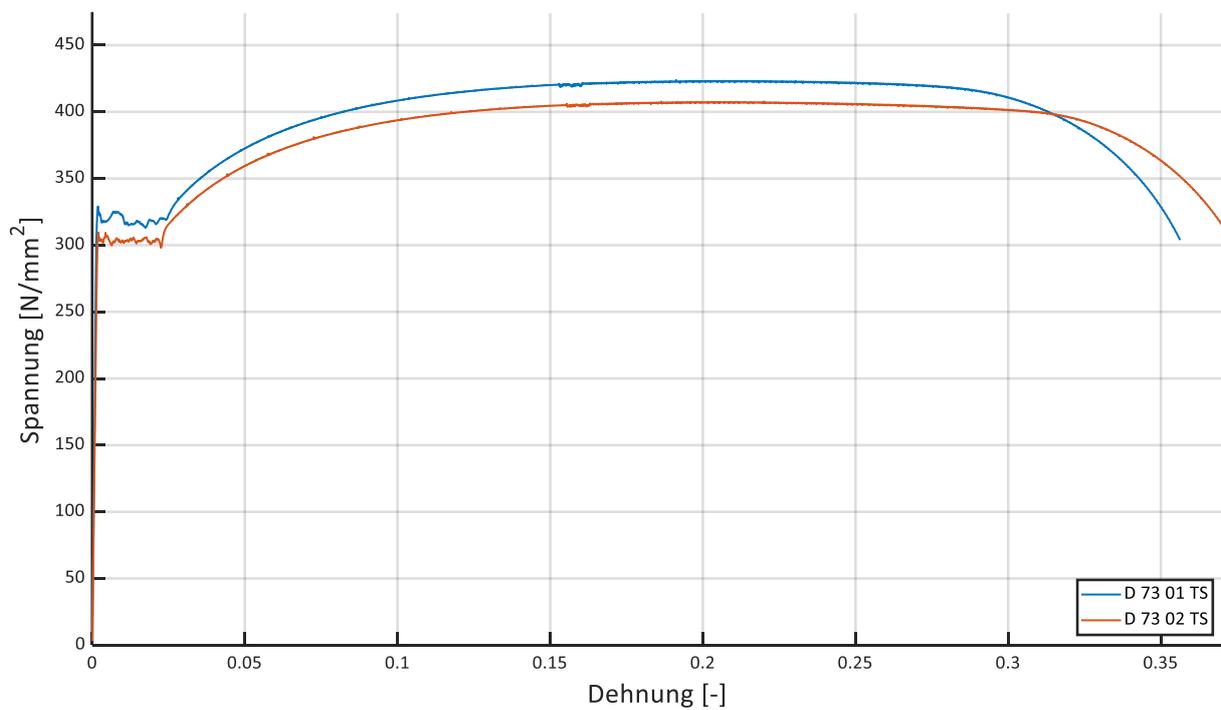


Abbildung A12: Materialproben der Tragstäbe aus Baustahl S235 (70-73)

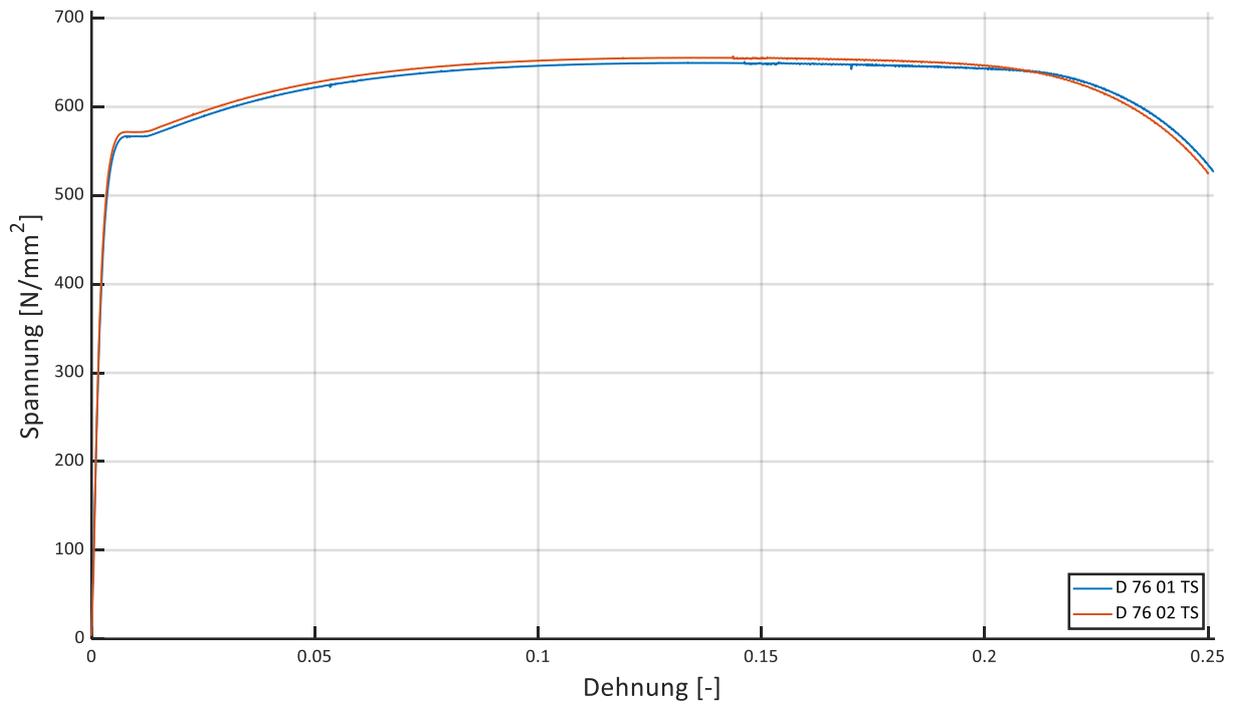


Abbildung A13: Materialproben der Tragstäbe aus Baustahl S460 (74-77)

A.4 Spannungs-Dehnungs-Kurven der relevanten Querstabmaterialproben

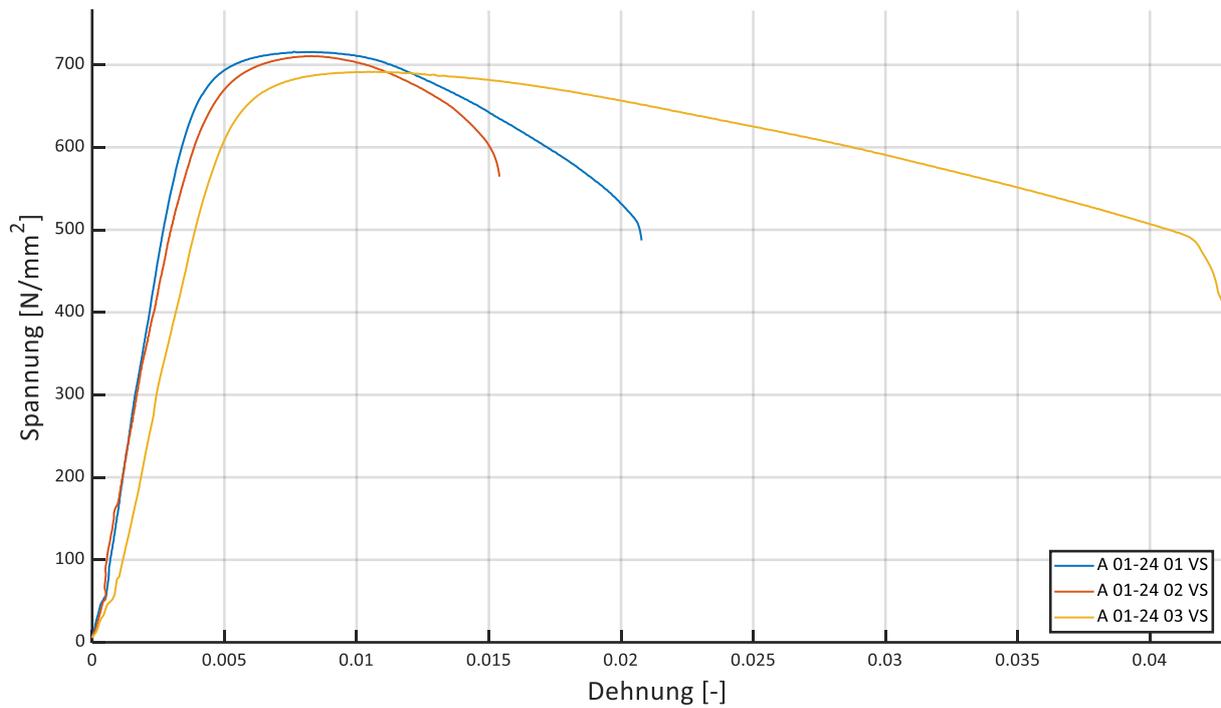


Abbildung A14: Materialproben der Querstäbe zugehörig zu dem Baustahl S235 (1-24)

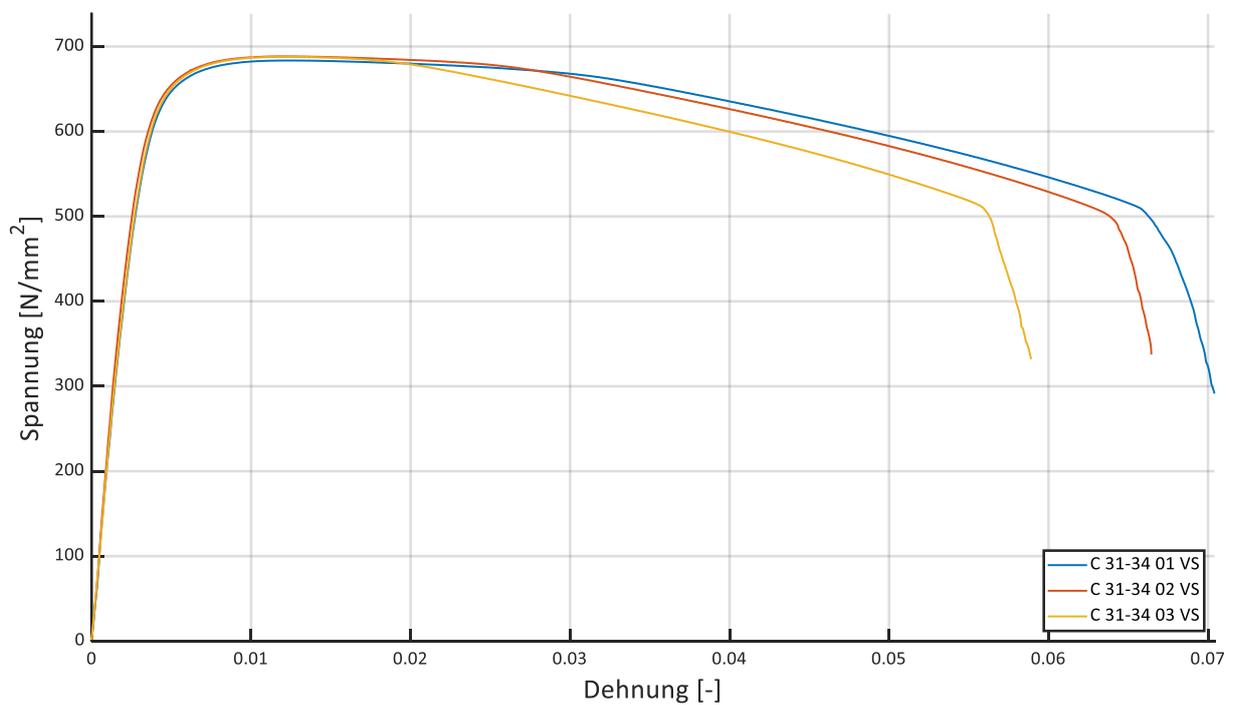


Abbildung A15: Materialproben der Querstäbe zugehörig zu dem Baustahl S235 (31-34)

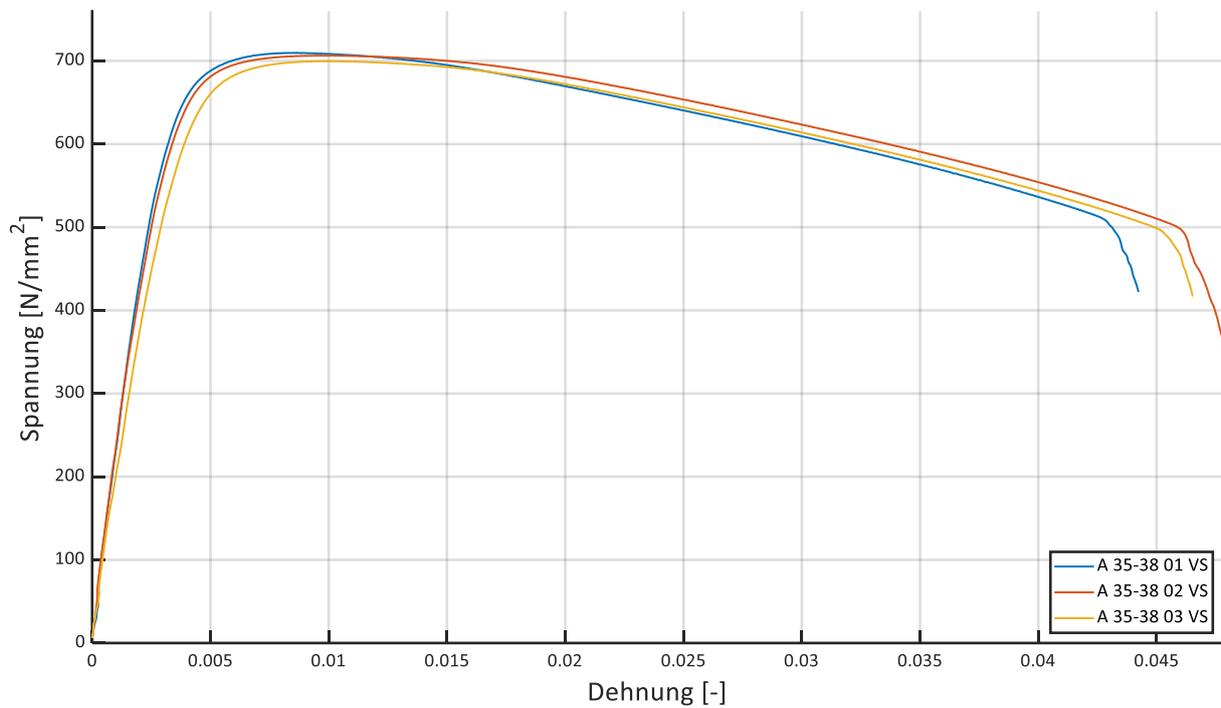


Abbildung A16: Materialproben der Querstäbe zugehörig zu dem Baustahl S355 (35-38)

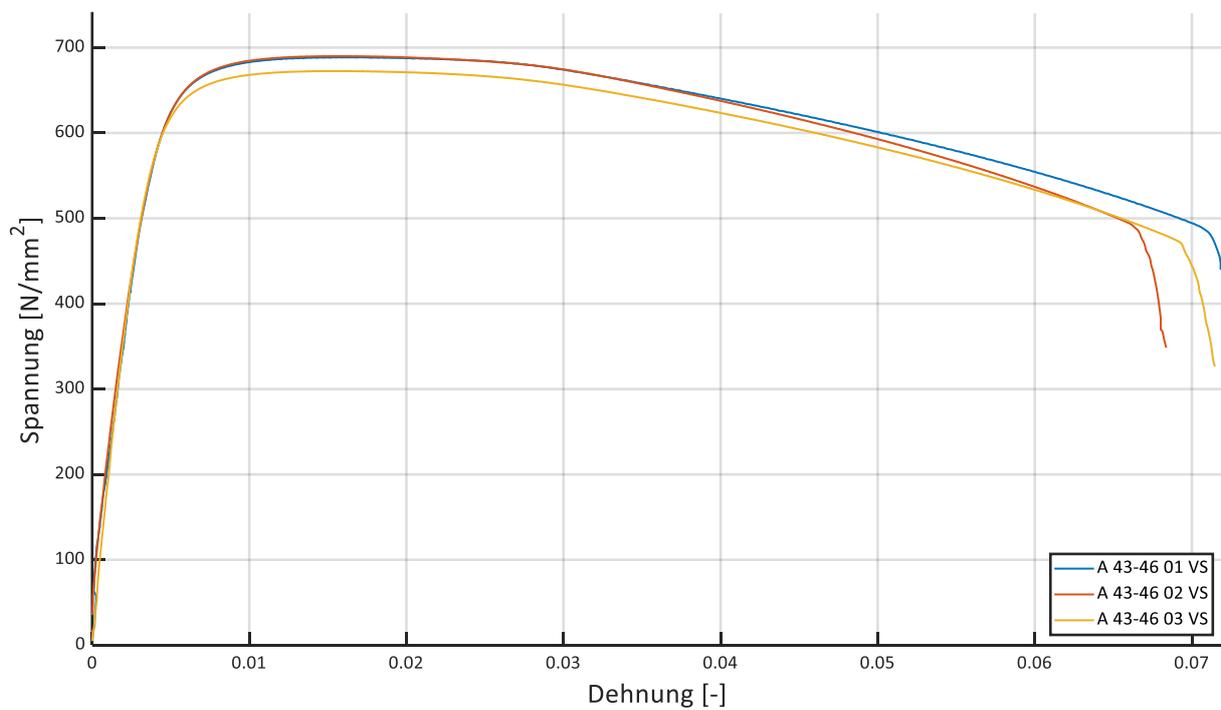


Abbildung A17: Materialproben der Querstäbe zugehörig zu dem Baustahl S460 (43-46)

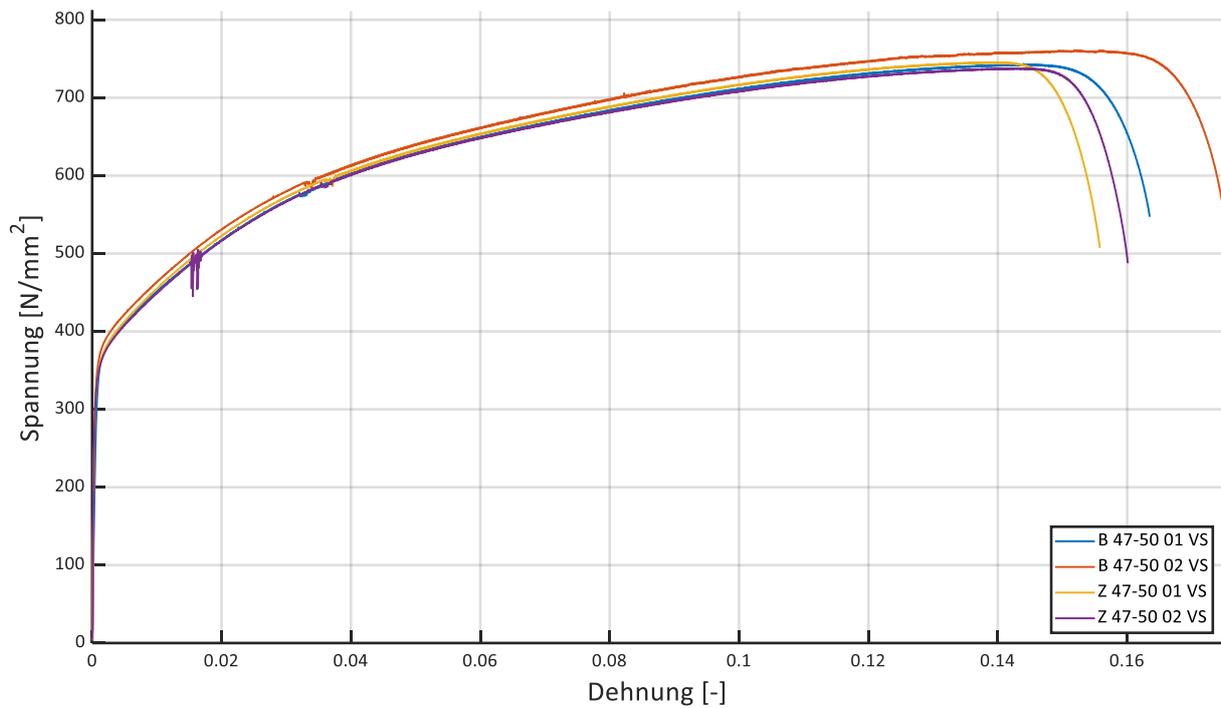


Abbildung A18: Materialproben der Querstäbe zugehörig zu dem Edelstahl (47-50)

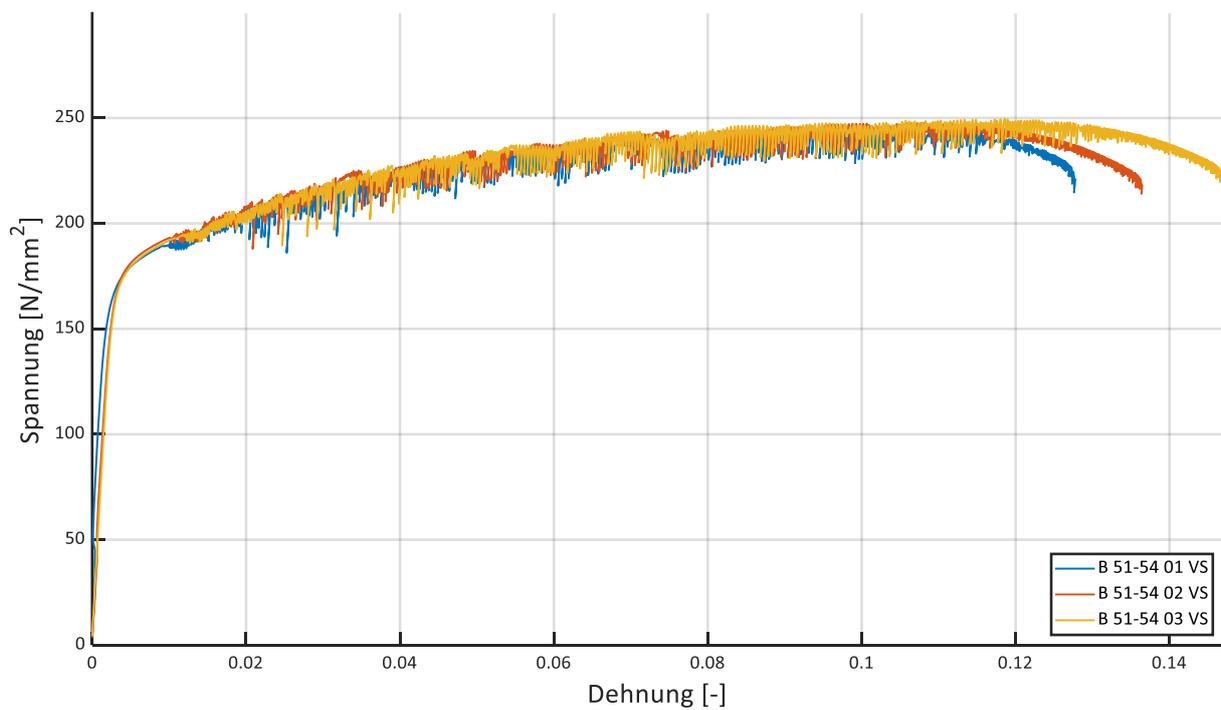


Abbildung A19: Materialproben der Querstäbe zugehörig zu dem Aluminium (51-54)

A.5 Vergleich der effektiven Tragstabhöhen aus den Streifenversuchen

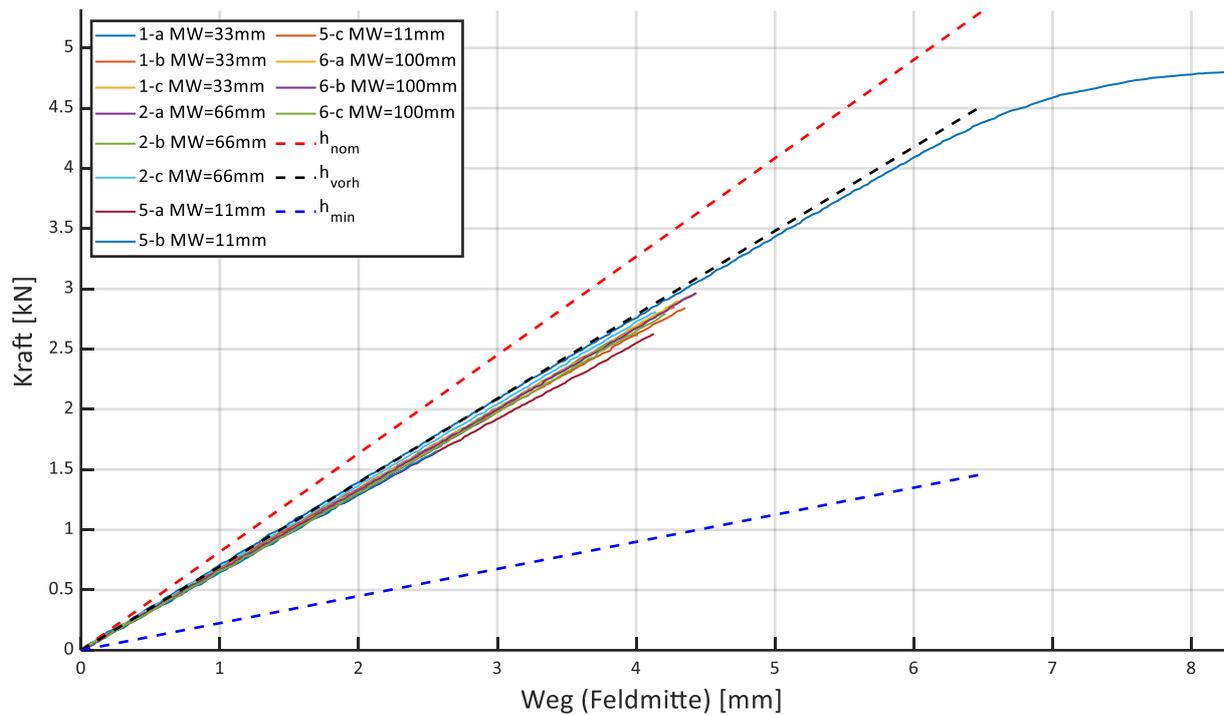


Abbildung A20: Vergleich der Tragstabhöhen von Gitterroststreifen aus Baustahl S235 (1-24)

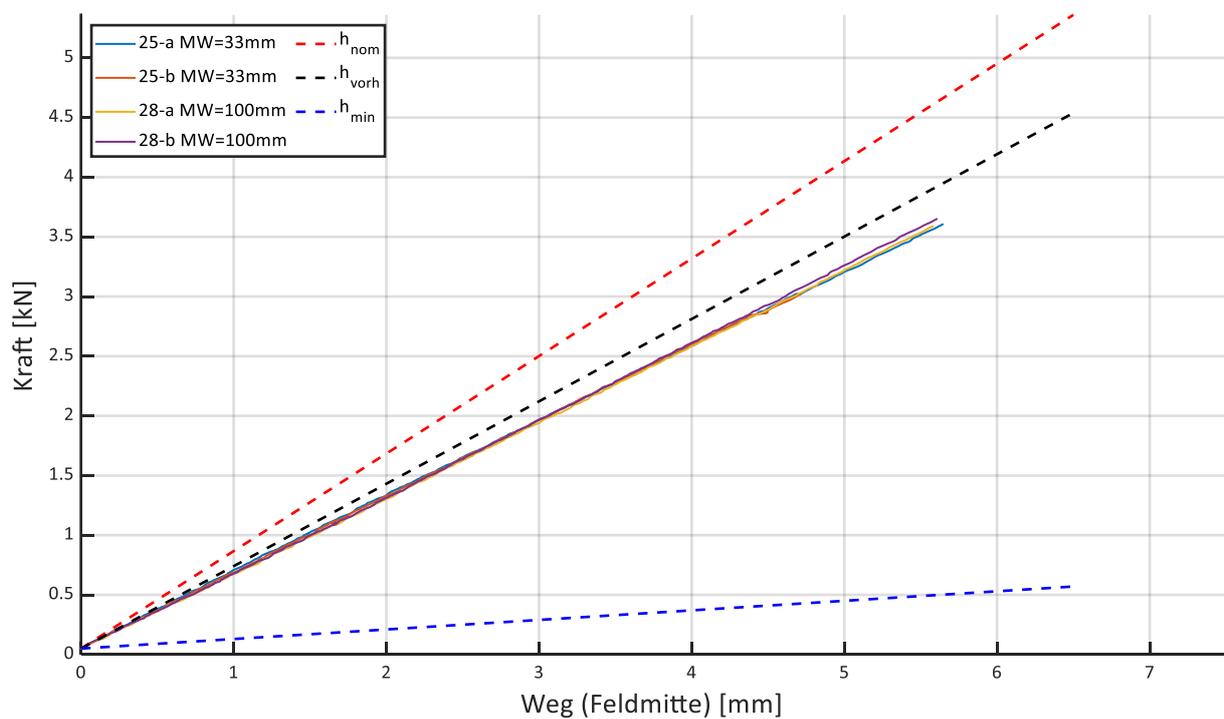


Abbildung A21: Vergleich der Tragstabhöhen von Gitterroststreifen aus Baustahl S235 (25-30)

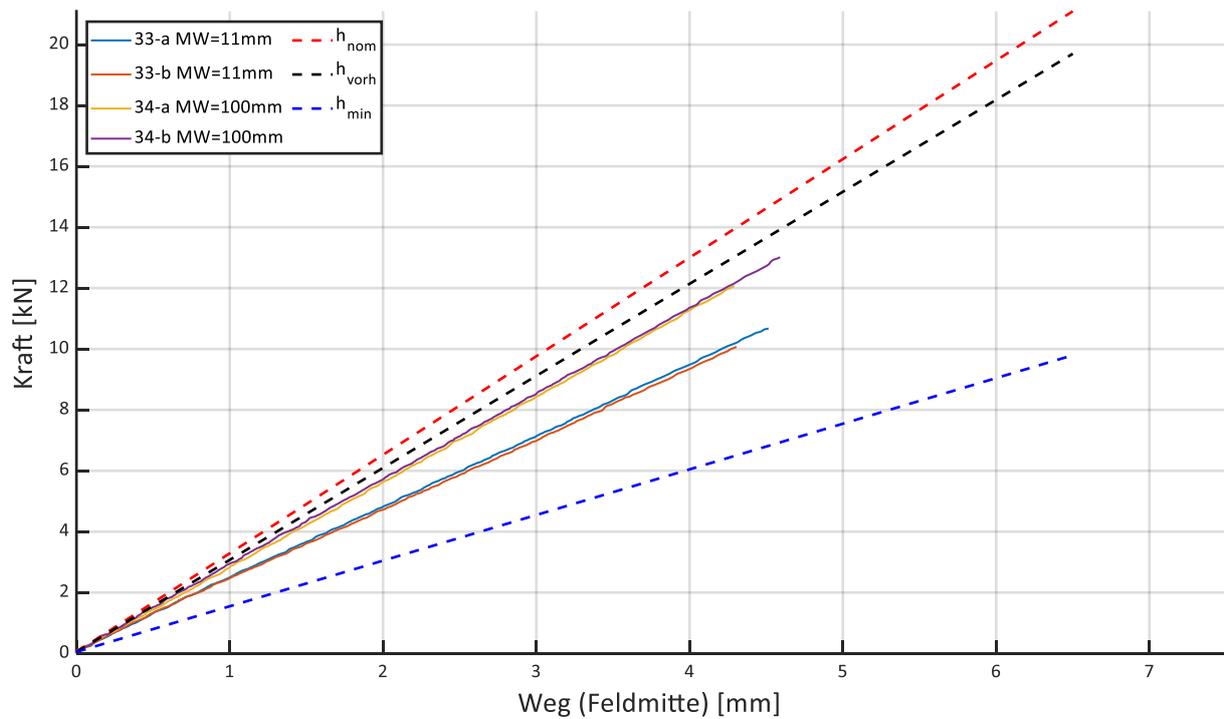


Abbildung A22: Vergleich der Tragstabhöhen von Gitterroststreifen aus Baustahl S235 (31-34)

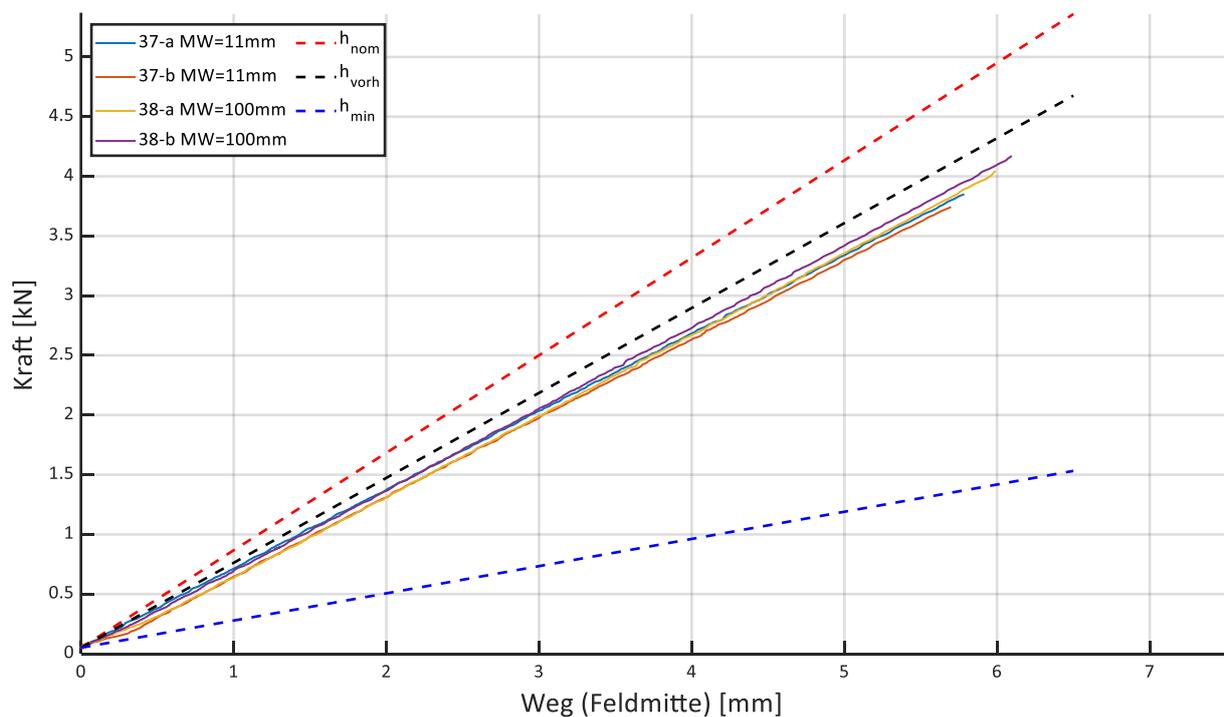


Abbildung A23: Vergleich der Tragstabhöhen von Gitterroststreifen aus Baustahl S355 (35-38)

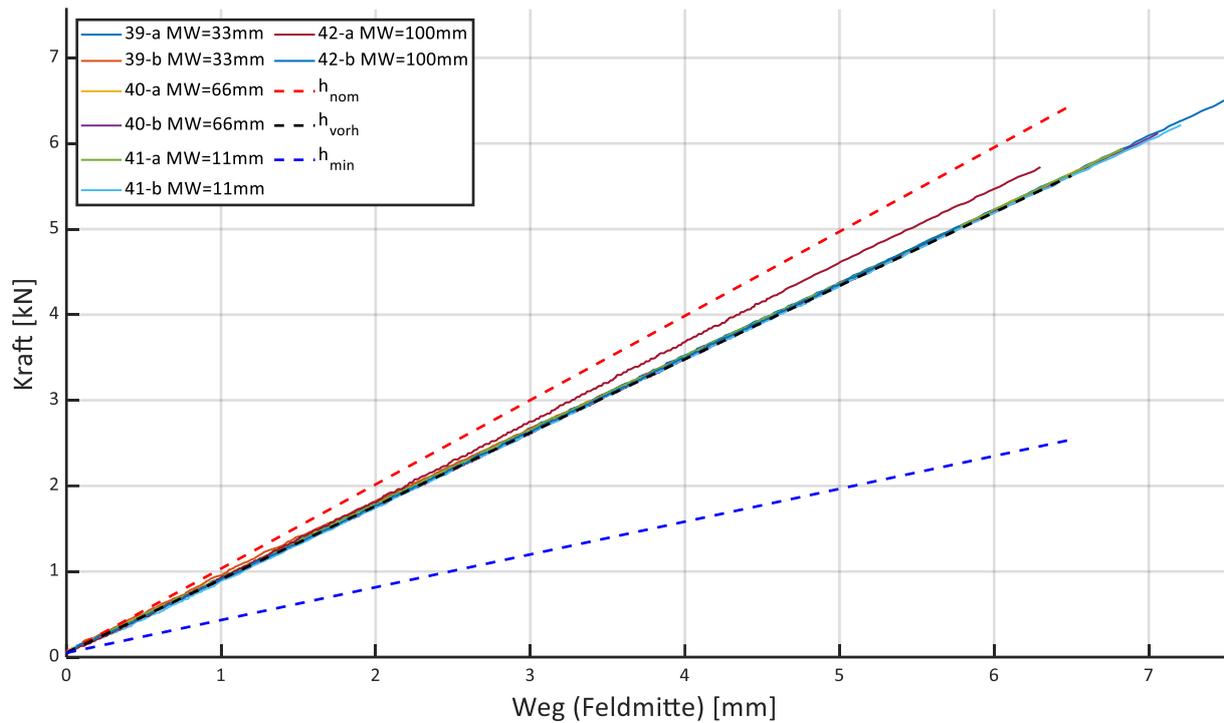


Abbildung A24: Vergleich der Tragstabhöhen von Gitterroststreifen aus Baustahl S460 (39-42)

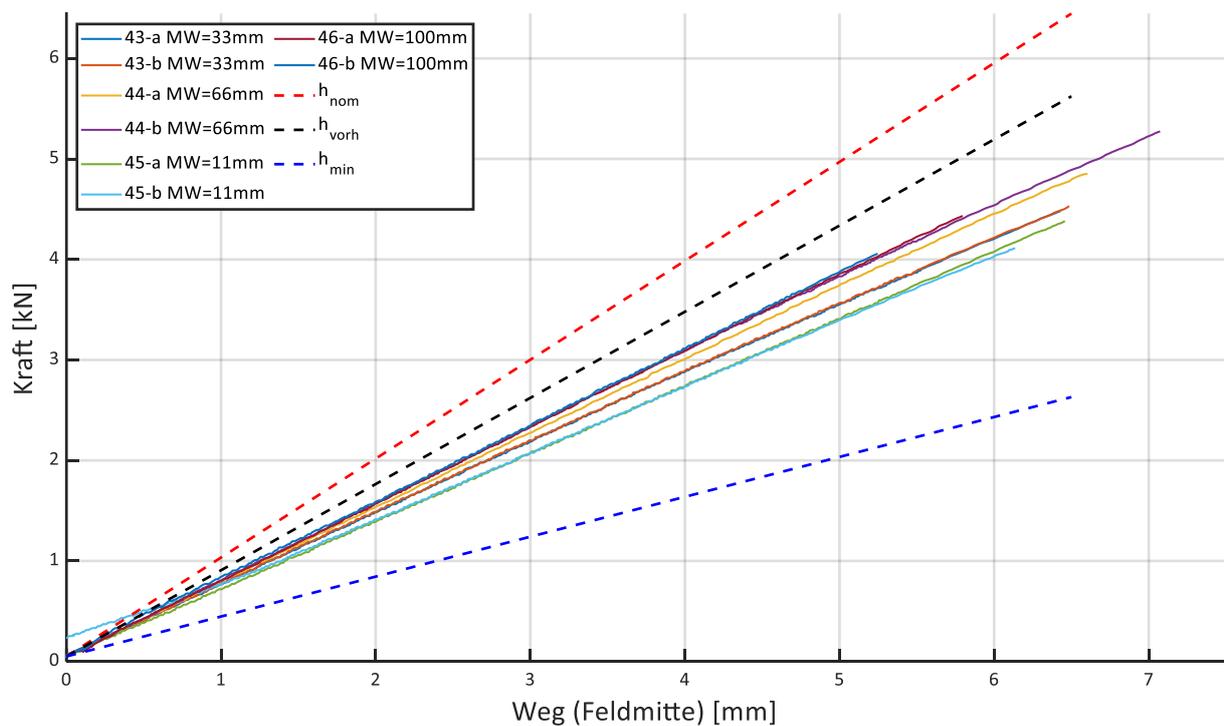


Abbildung A25: Vergleich der Tragstabhöhen von Gitterroststreifen aus Baustahl S460 (43-46)

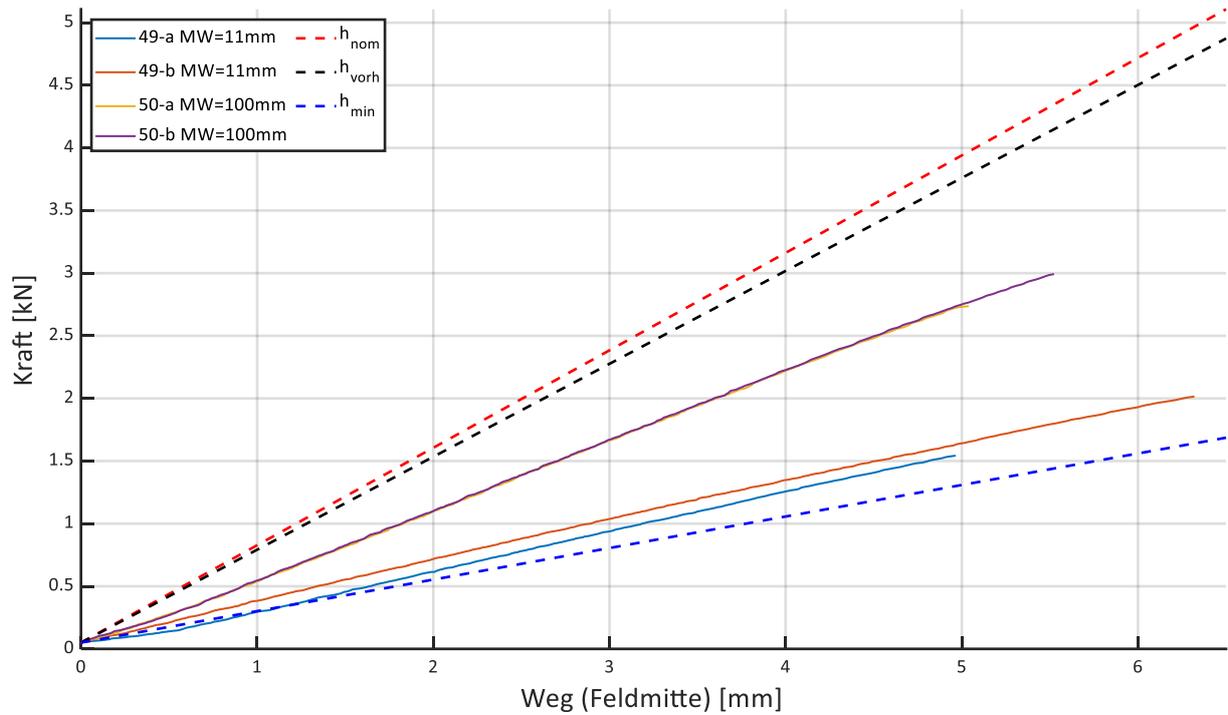


Abbildung A26: Vergleich der Tragstabhöhen von Gitterroststreifen aus Edelstahl (47-50)

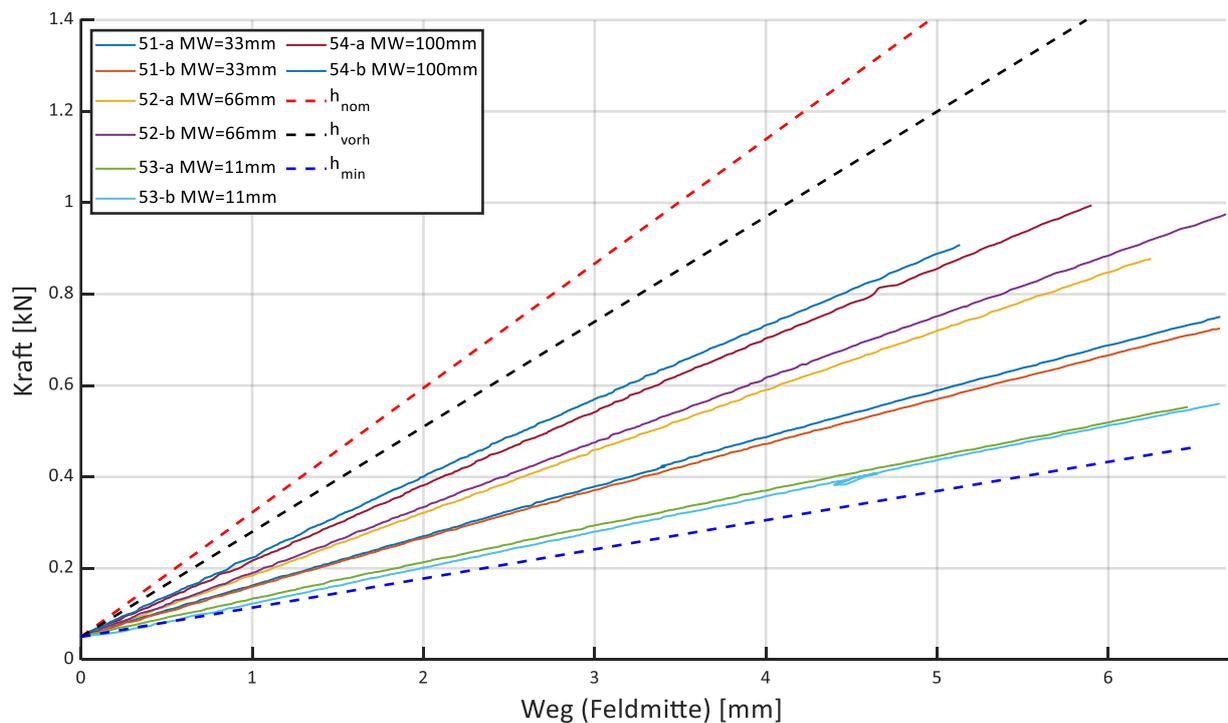


Abbildung A27: Vergleich der Tragstabhöhen von Gitterroststreifen aus Aluminium (51-54)

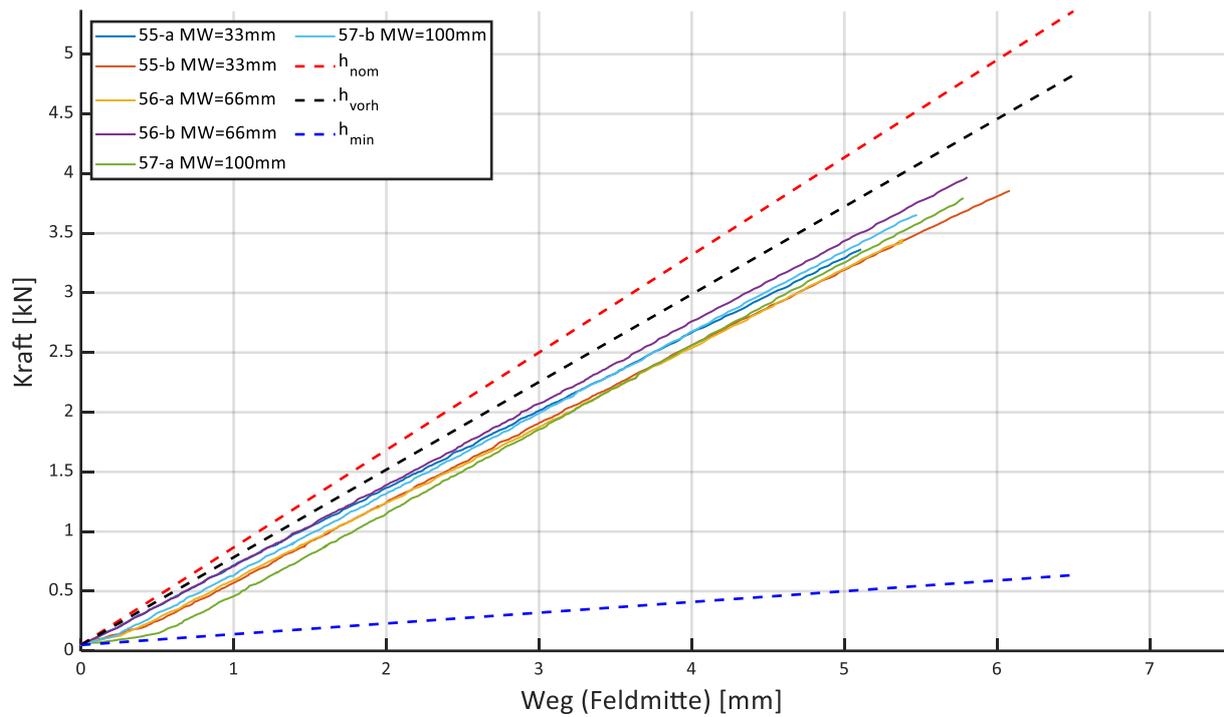


Abbildung A28: Vergleich der Tragstabhöhen von Gitterroststreifen aus Baustahl S235 (55-57)

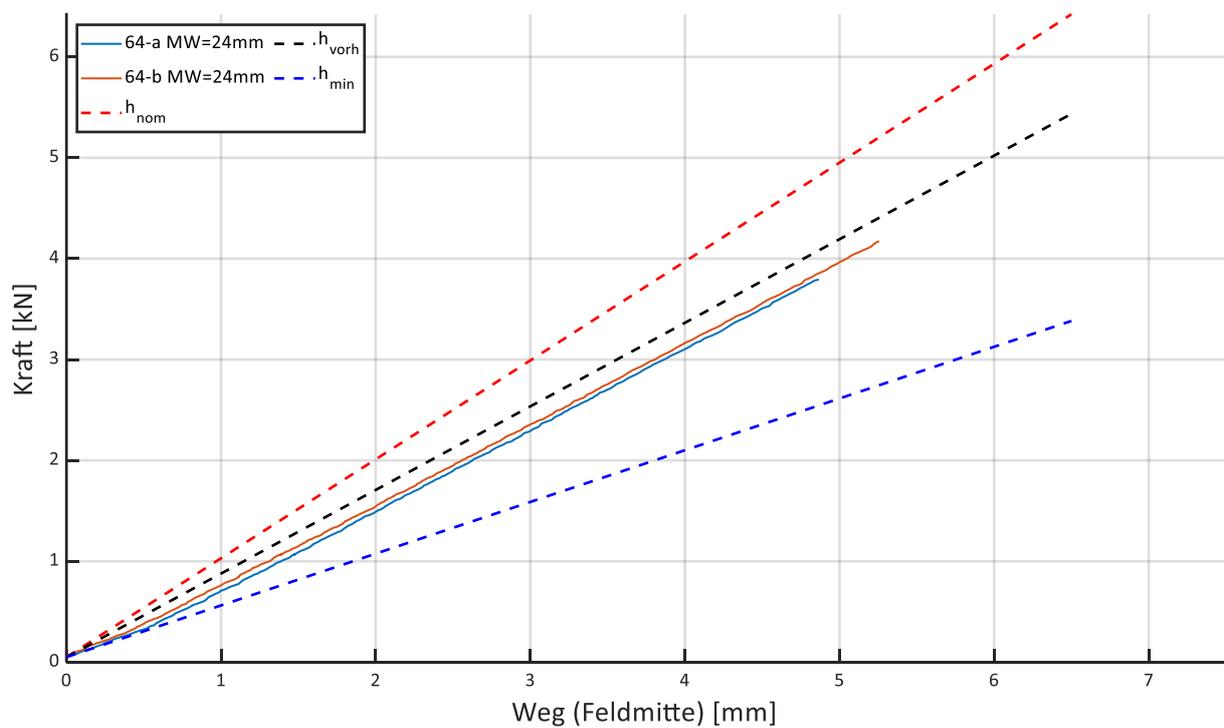


Abbildung A29: Vergleich der Tragstabhöhen von Gitterroststreifen aus Baustahl S235 (62-64)

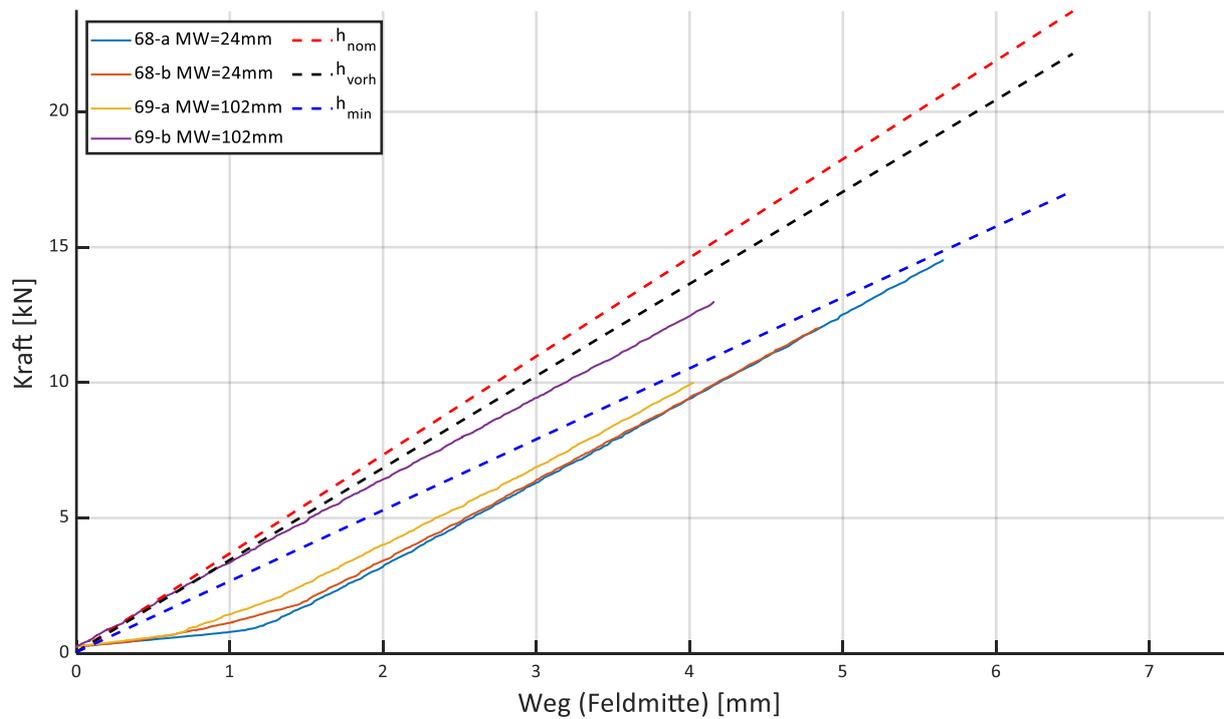


Abbildung A30: Vergleich der Tragstabhöhen von Gitterroststreifen aus Baustahl S235 (66-69)

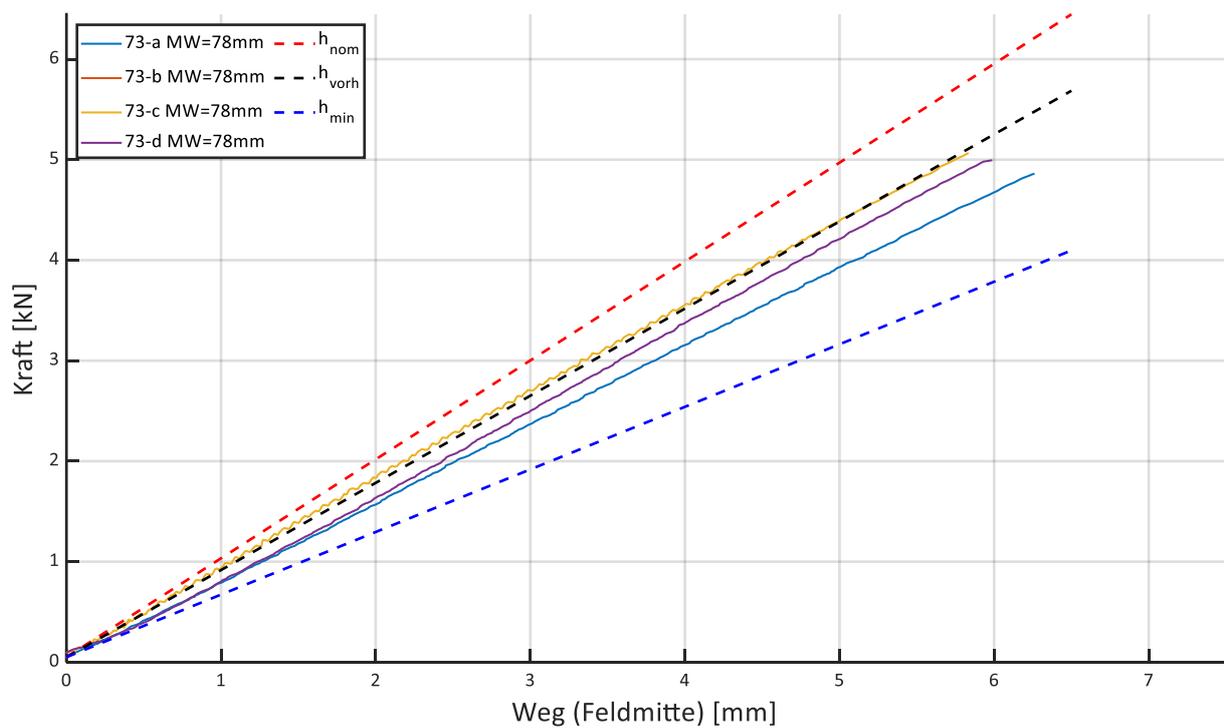


Abbildung A31: Vergleich der Tragstabhöhen von Gitterroststreifen aus Baustahl S235 (70-73)

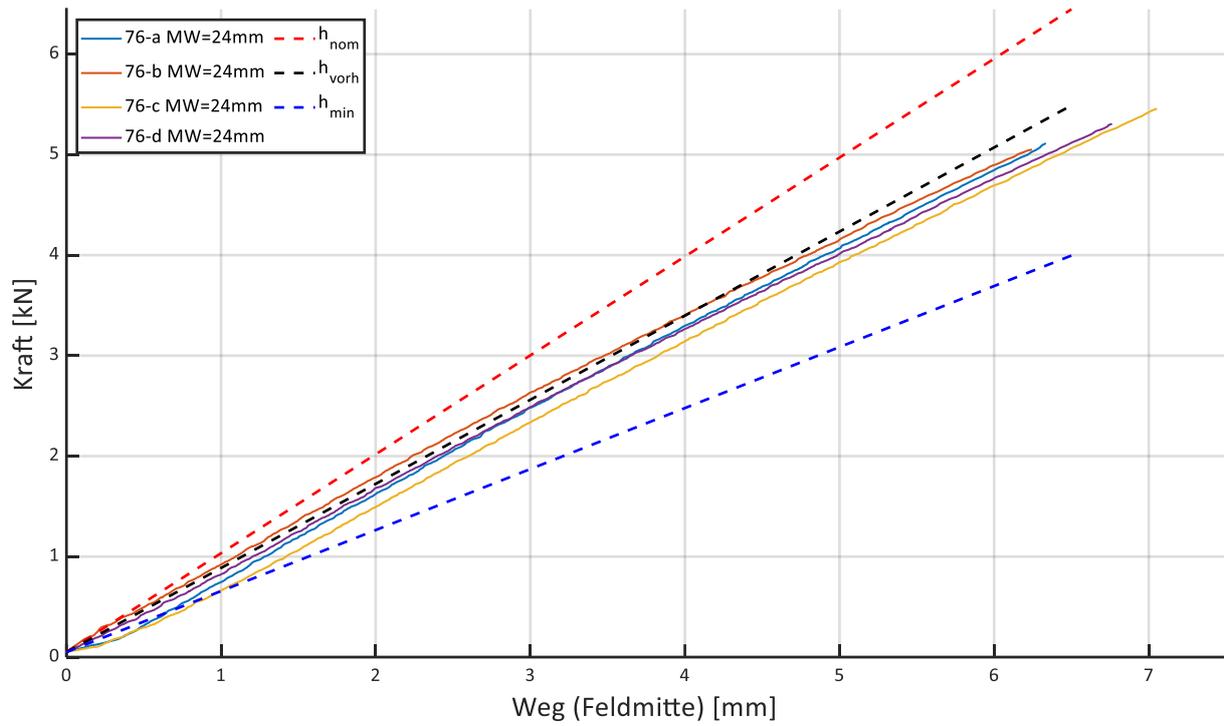


Abbildung A32: Vergleich der Tragstabhöhen von Gitterroststreifen aus Baustahl S460 (74-77)

A.6 Gitterrostplattenversuche mit FE-Berechnungen und Tragfähigkeiten

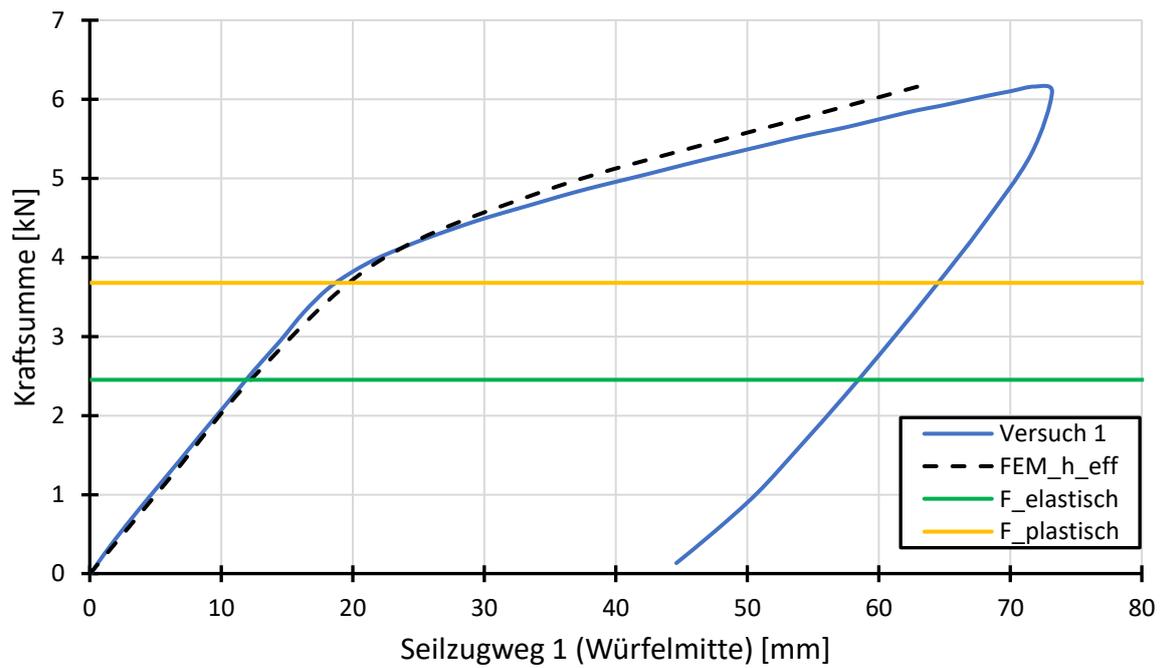


Abbildung A33: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 1

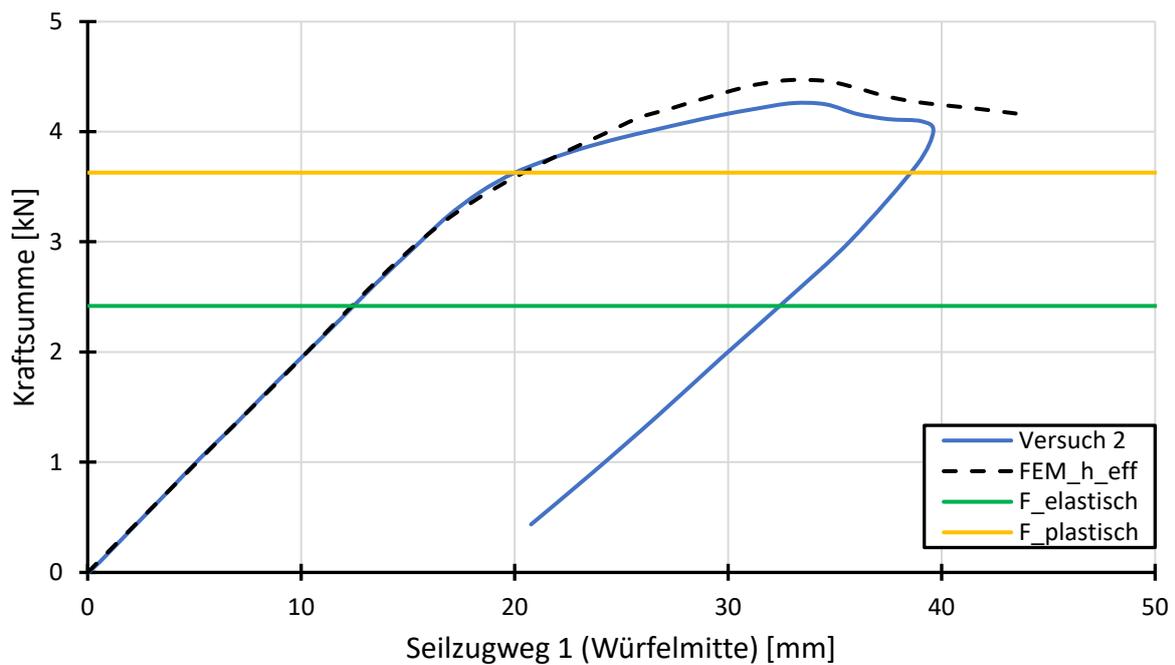


Abbildung A34: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 2

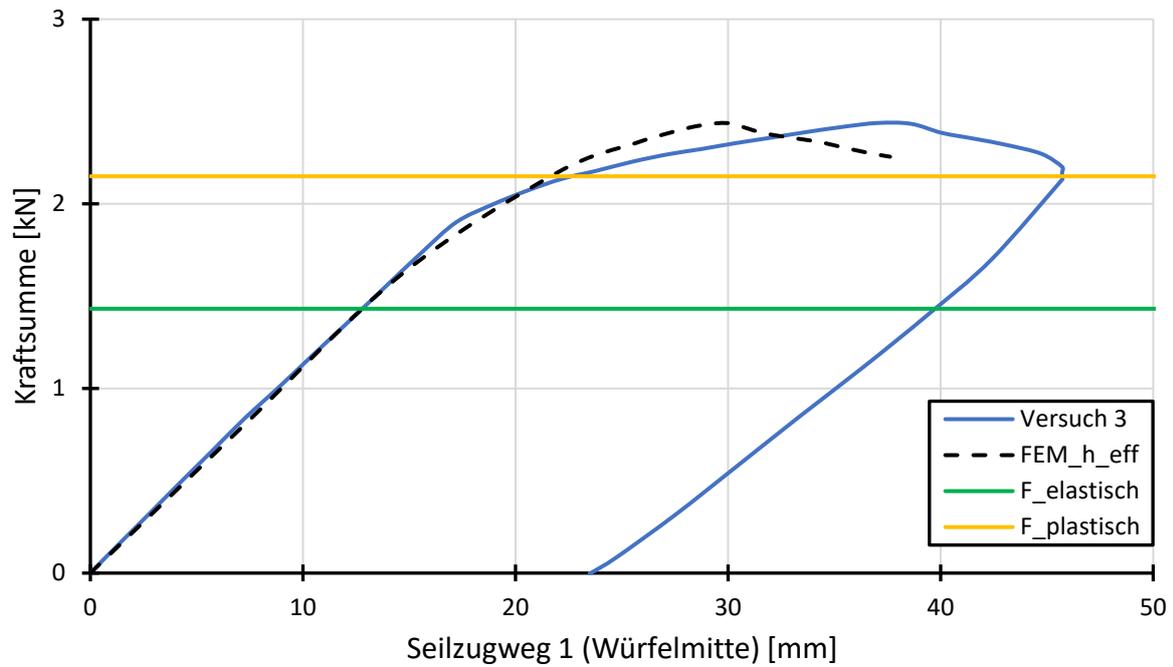


Abbildung A35: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 3

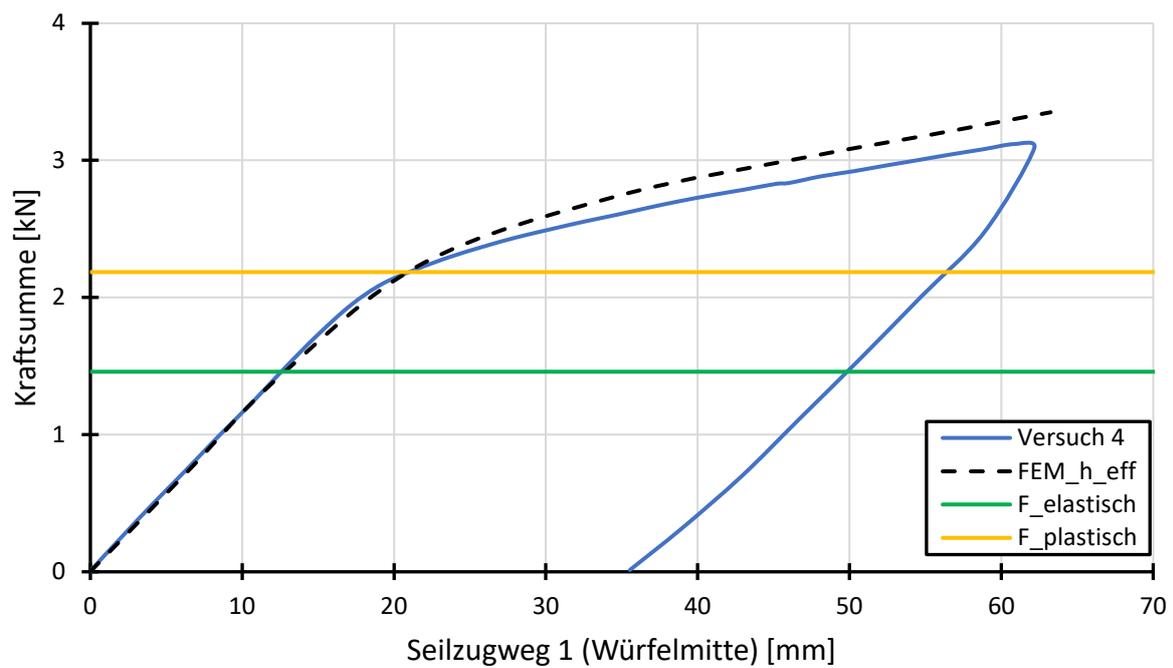


Abbildung A36: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 4

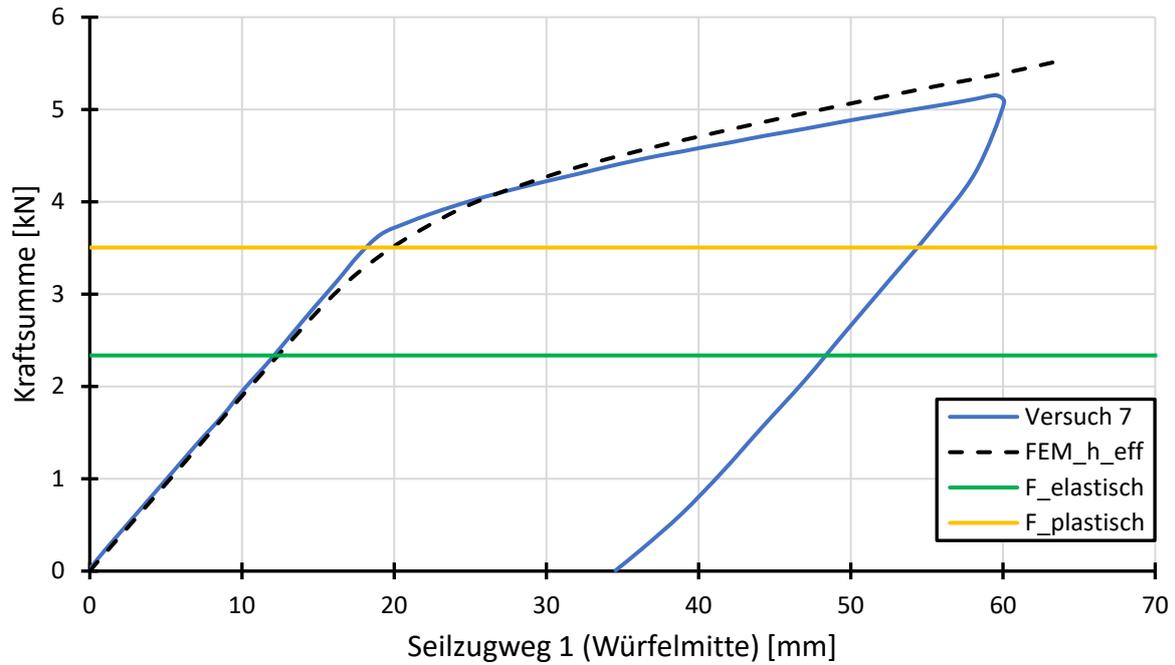


Abbildung A39: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 7

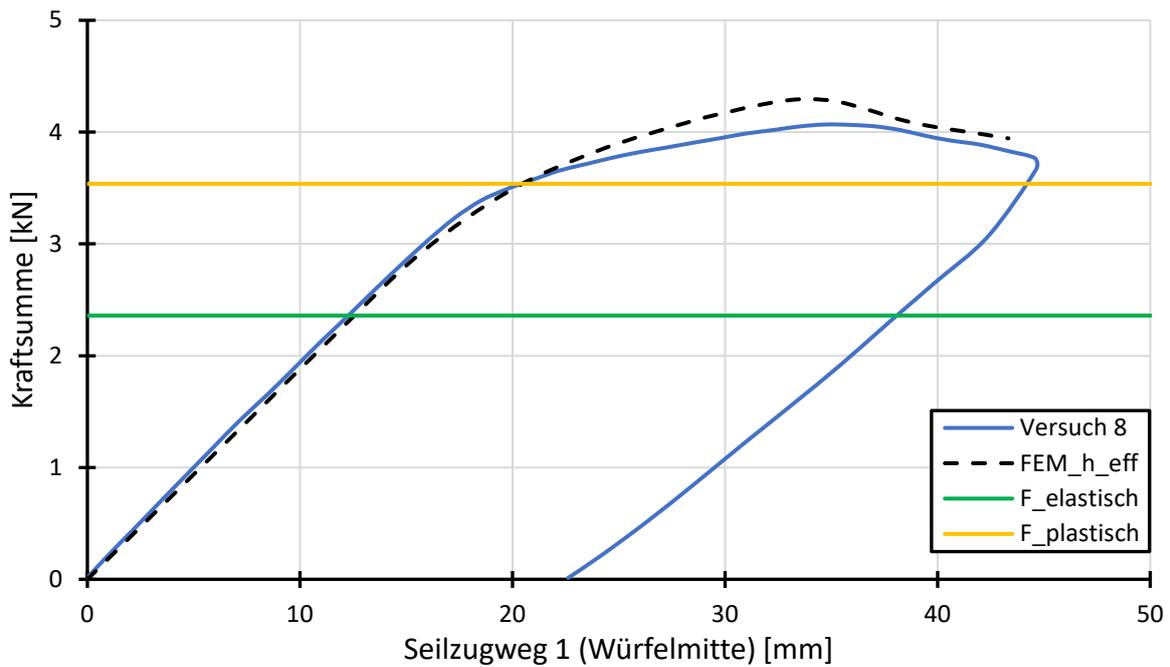


Abbildung A40: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 8

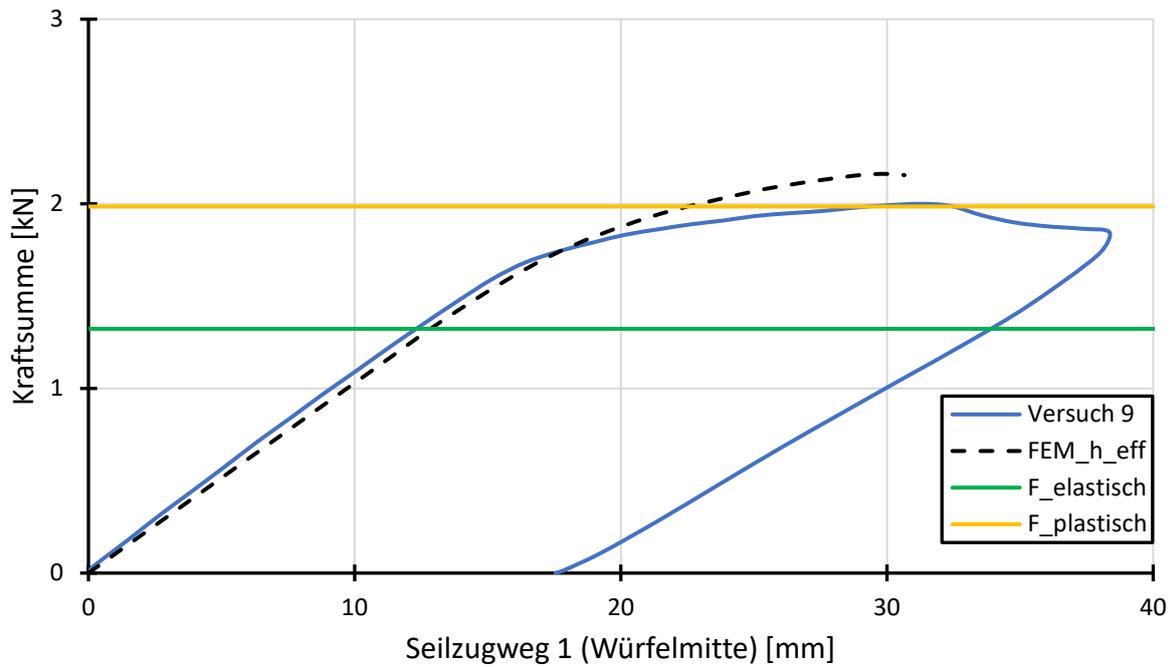


Abbildung A41: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 9

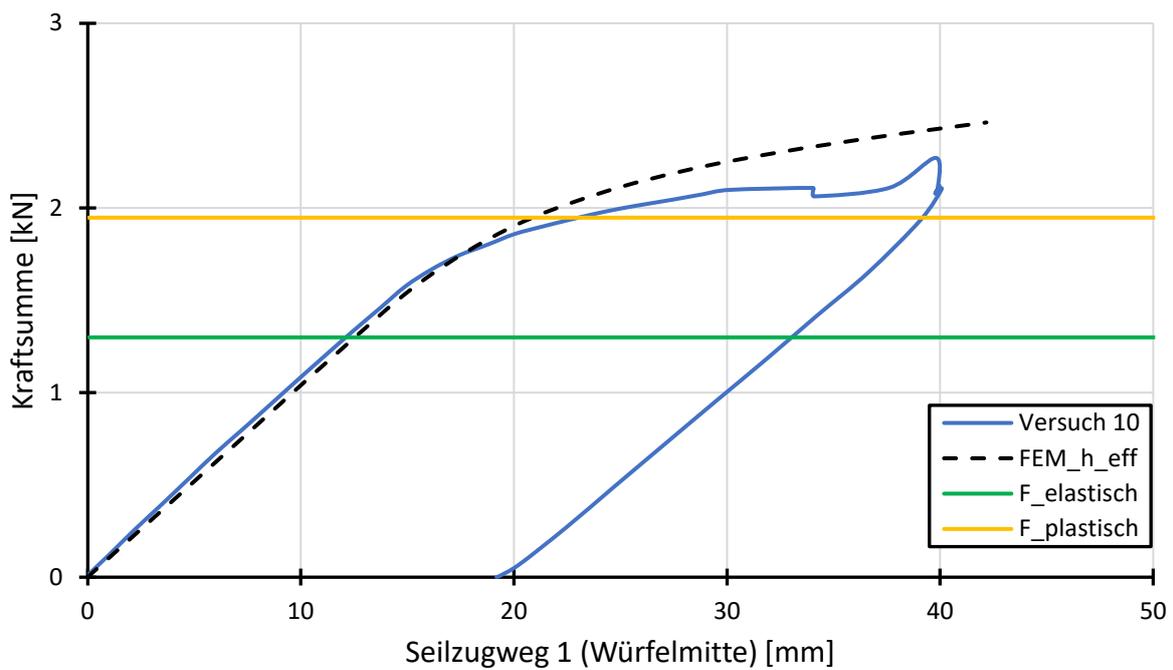


Abbildung A42: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 10

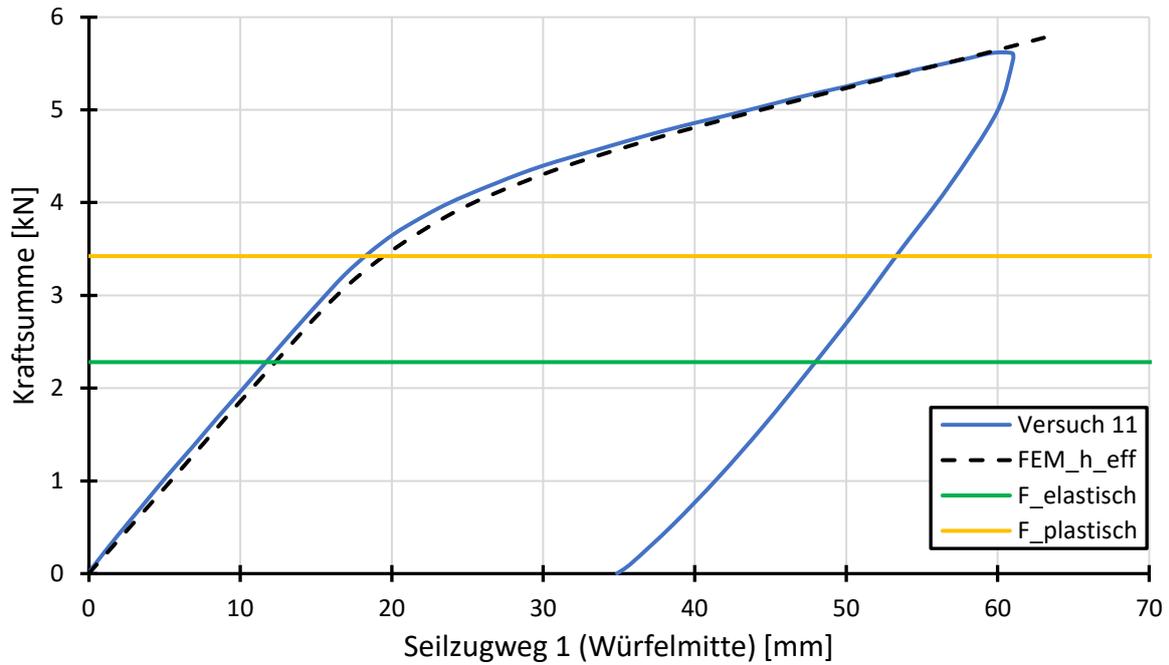


Abbildung A43: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 11

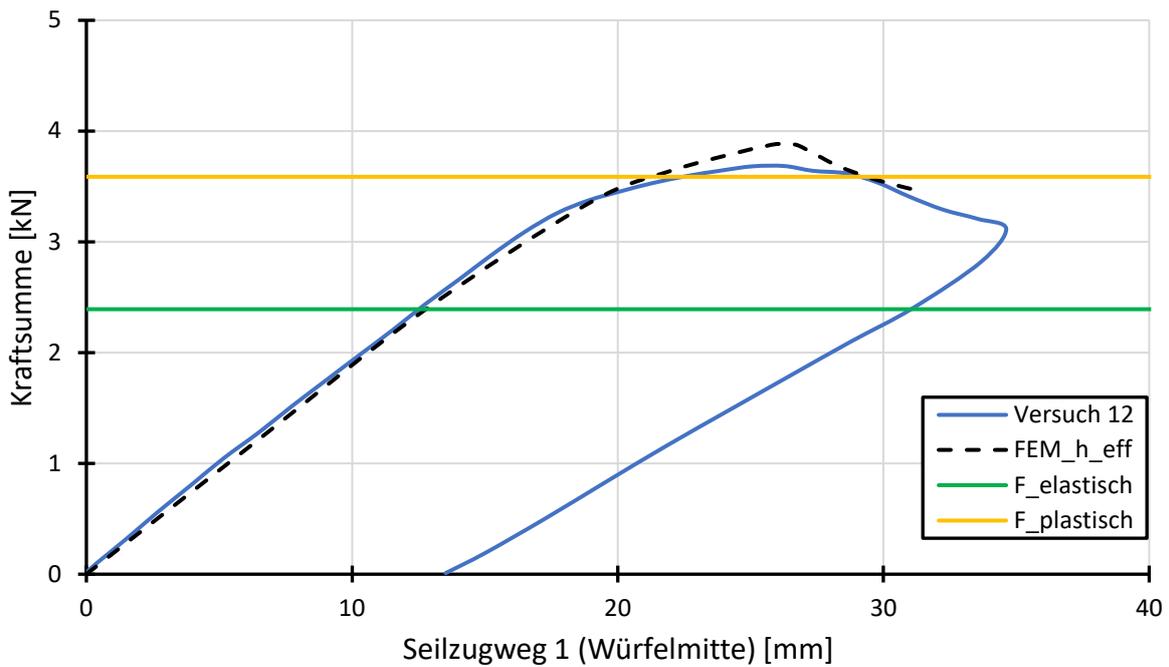


Abbildung A44: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 12

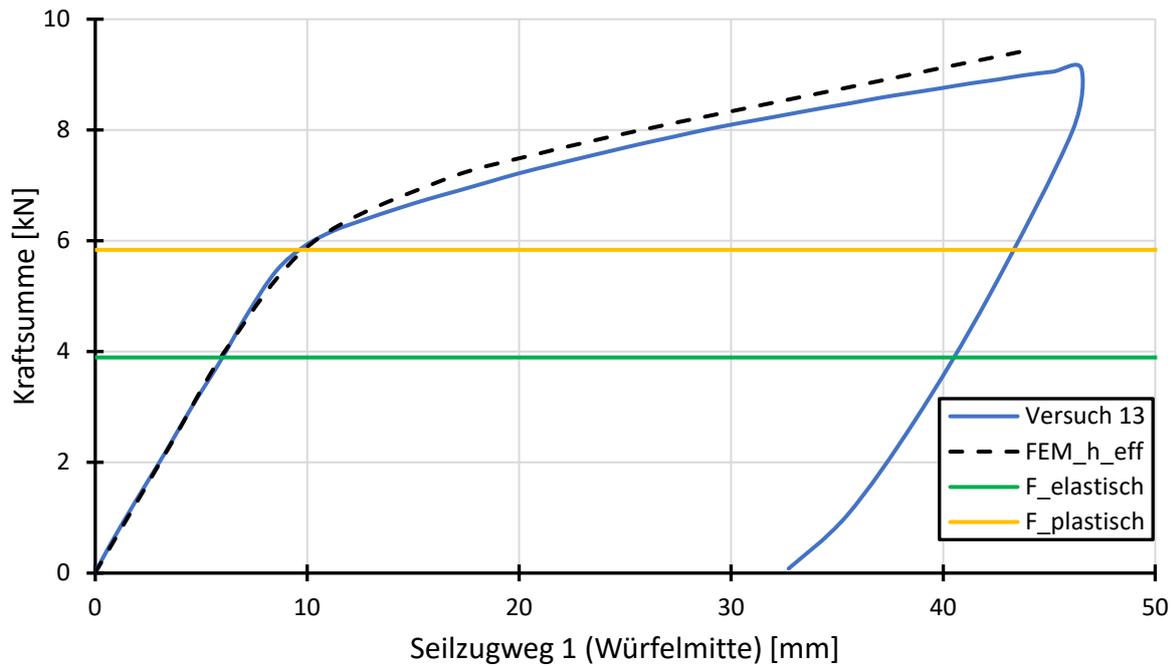


Abbildung A45: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 13

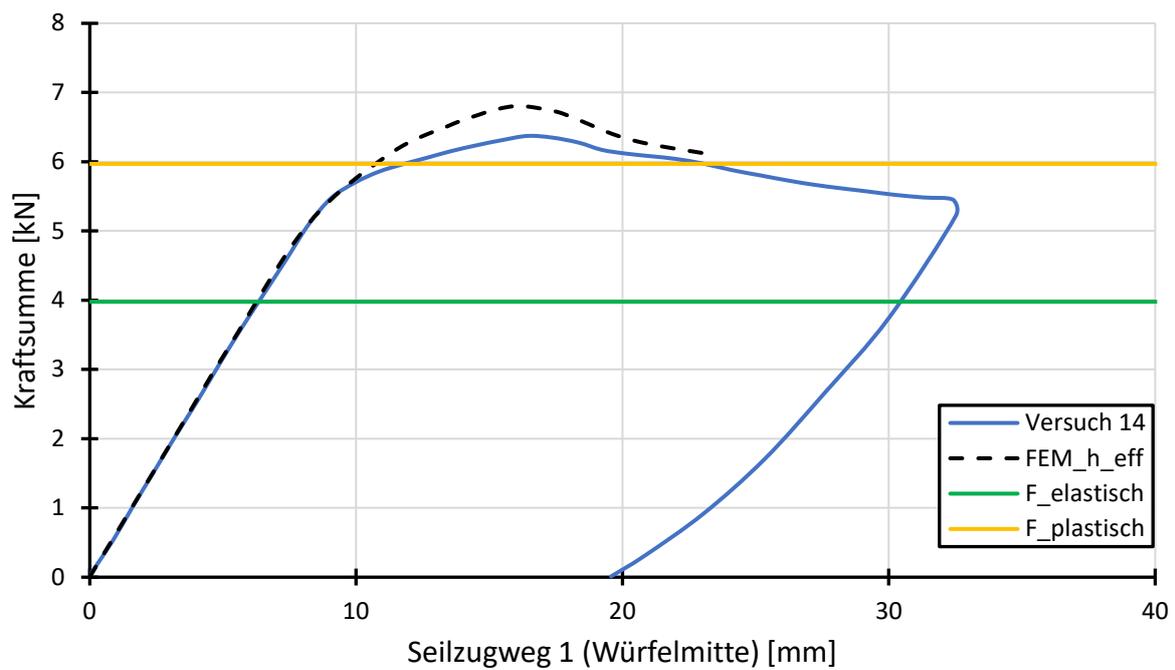


Abbildung A46: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 14

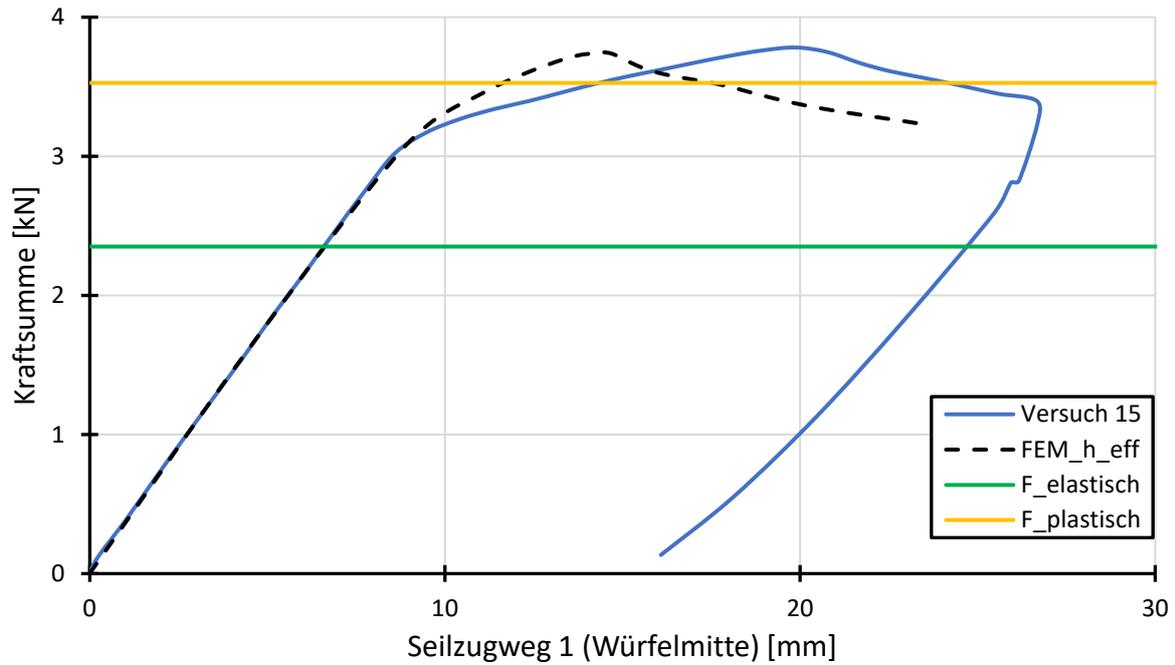


Abbildung A47: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 15

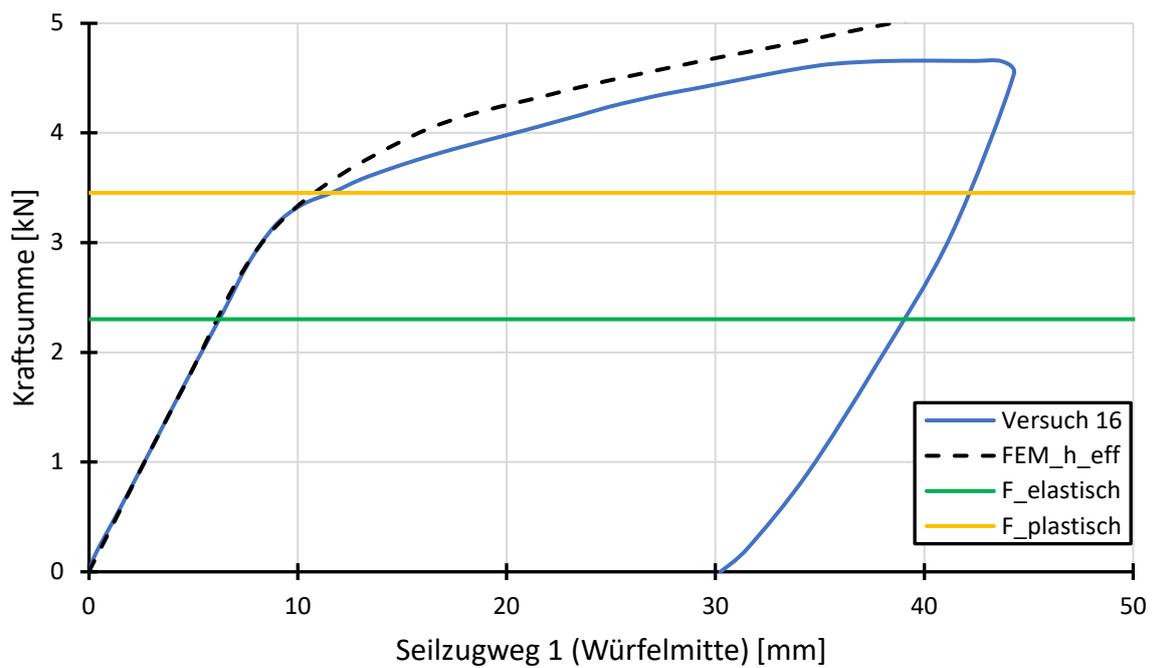


Abbildung A48: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 16

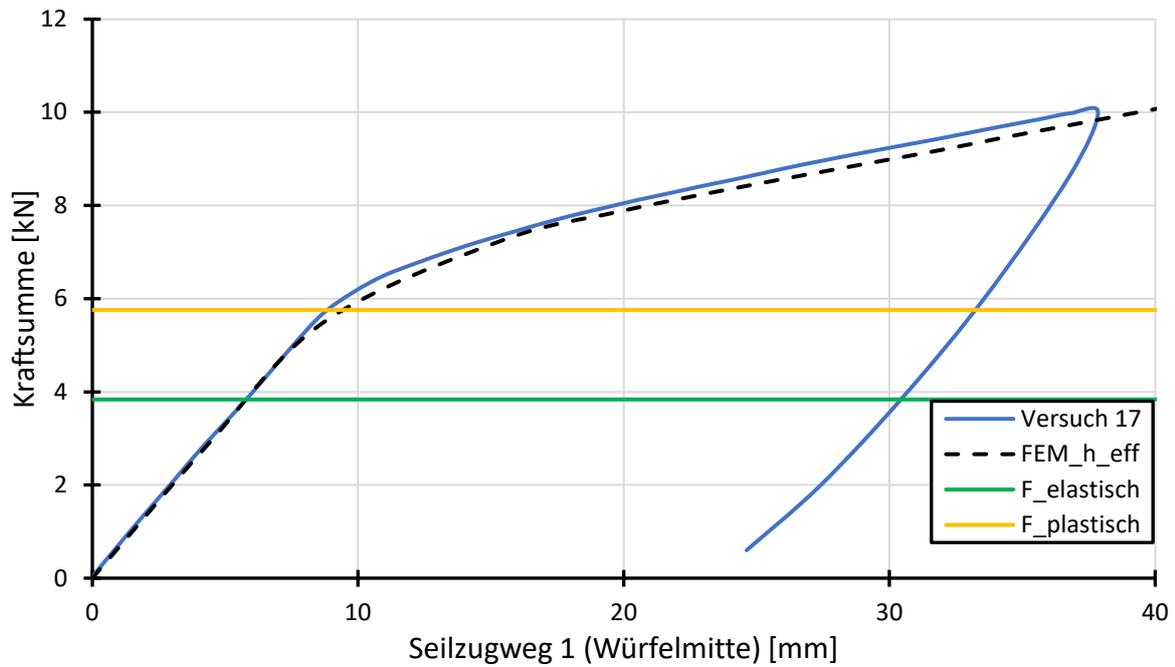


Abbildung A49: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 17

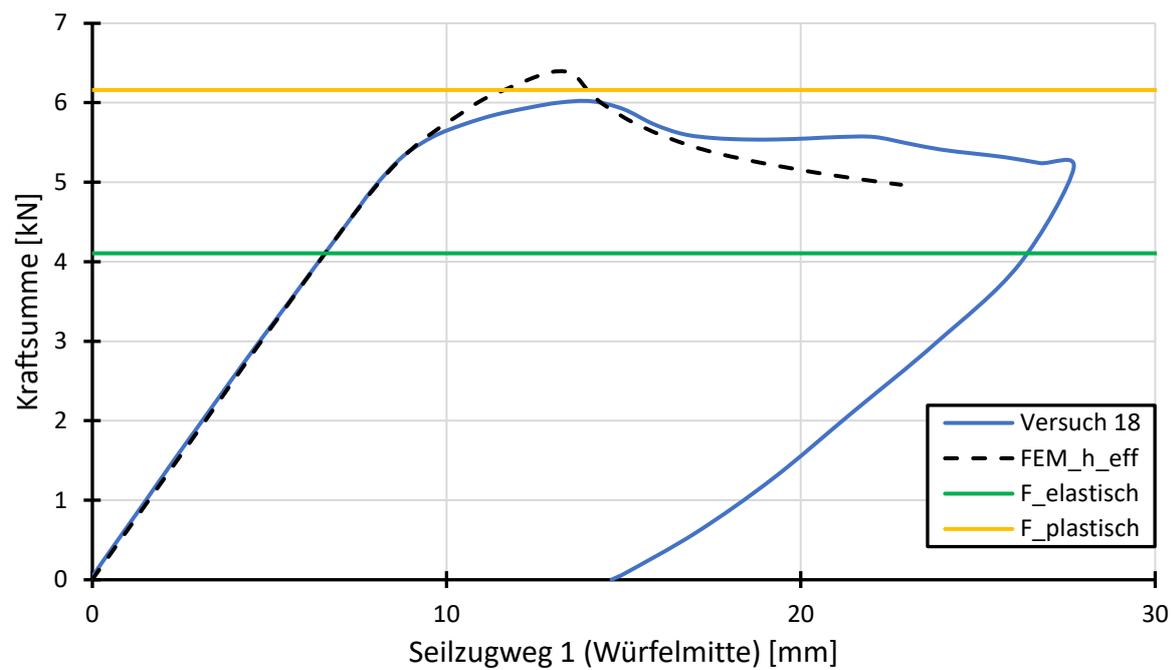


Abbildung A50: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 18

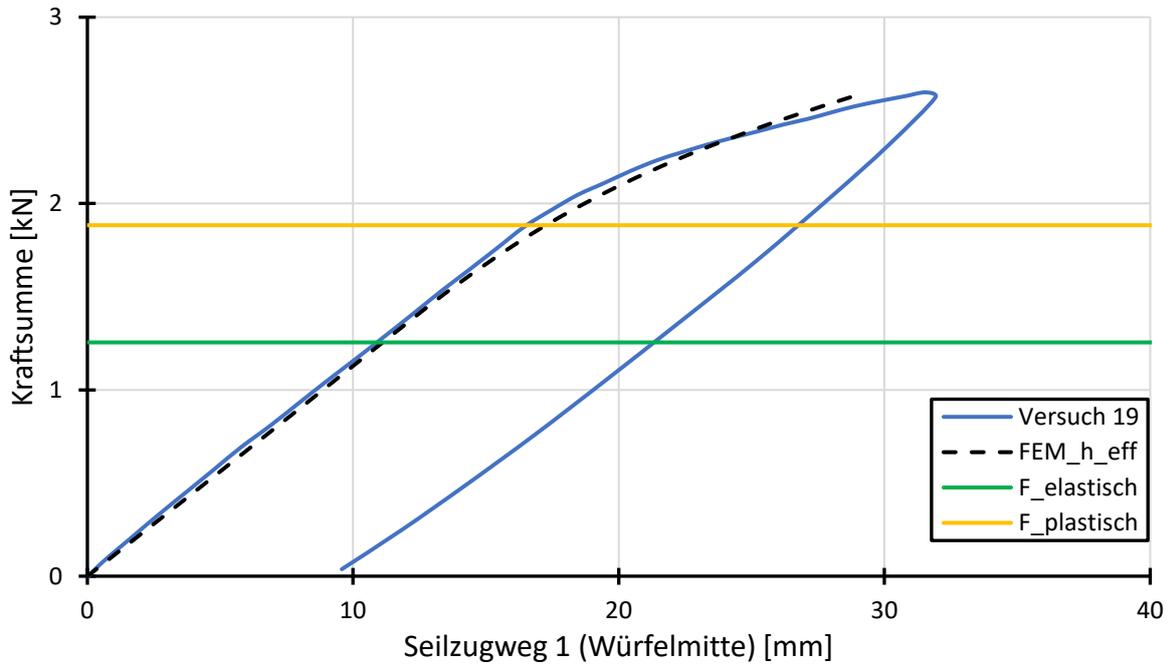


Abbildung A51: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 19

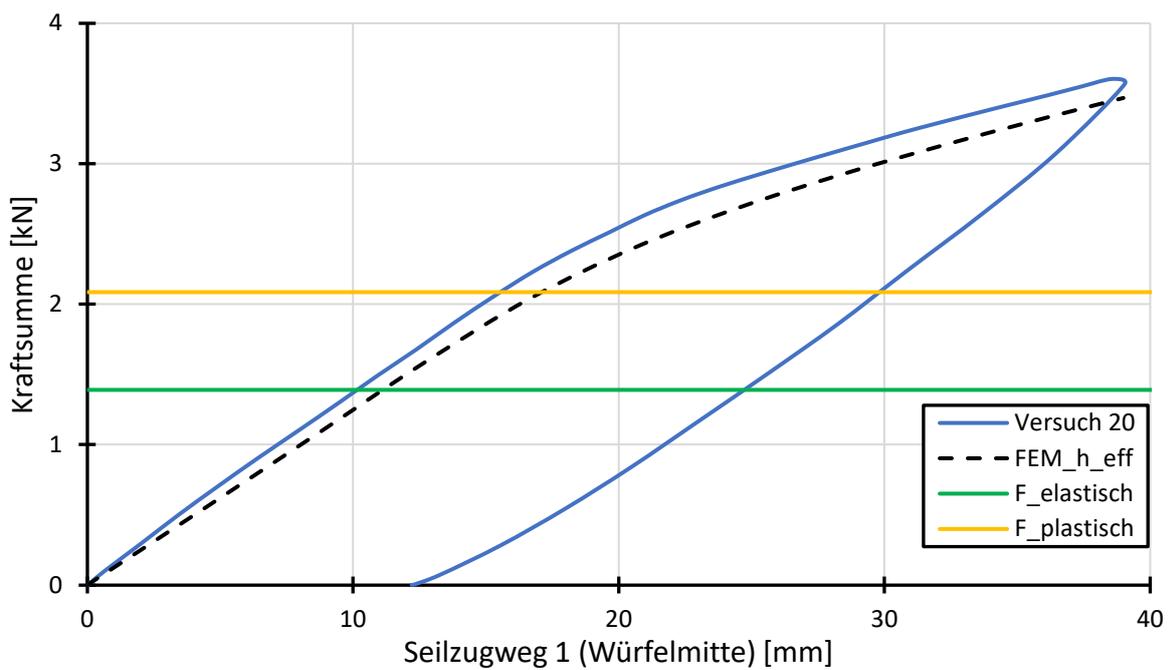


Abbildung A52: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 20

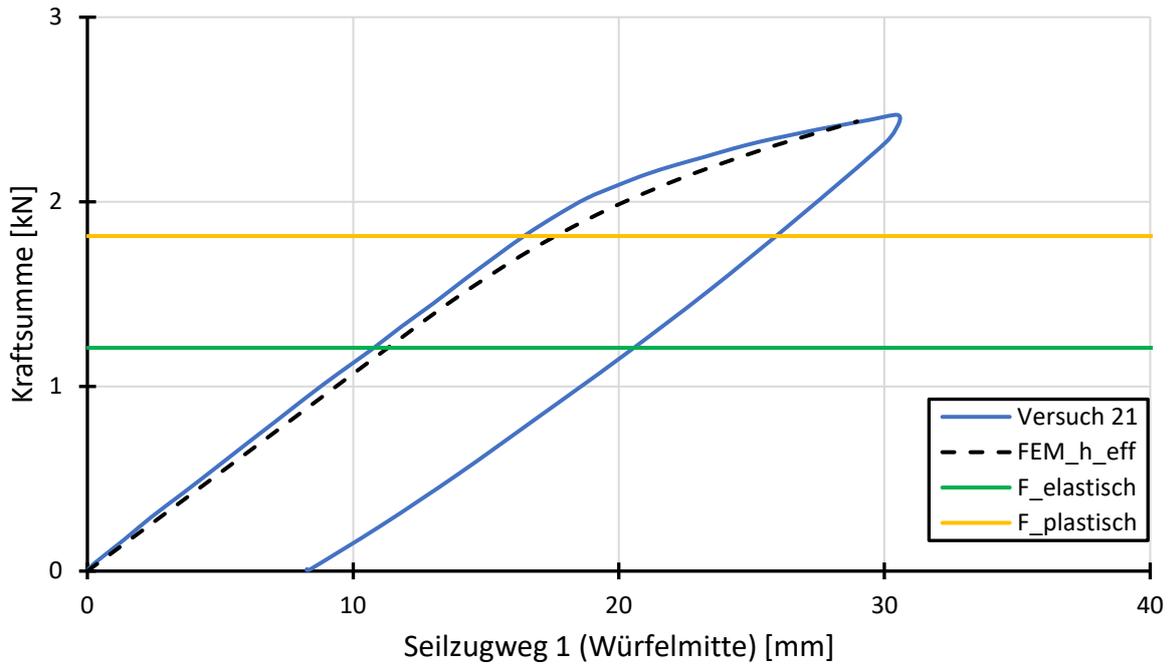


Abbildung A53: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 21

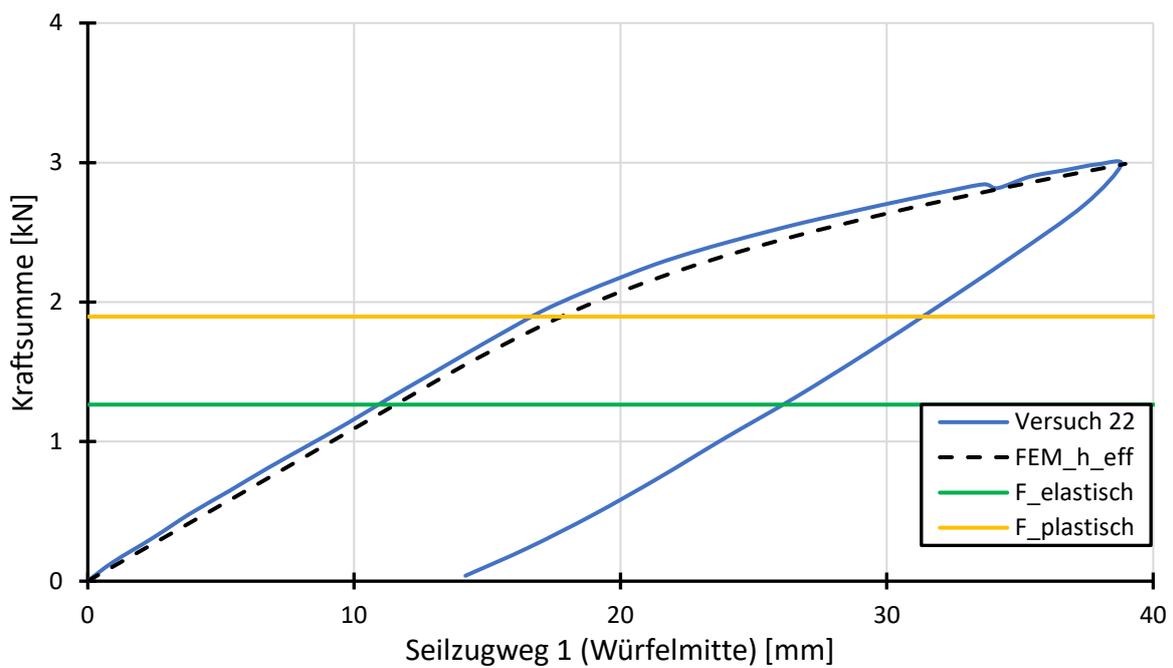


Abbildung A54: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 22

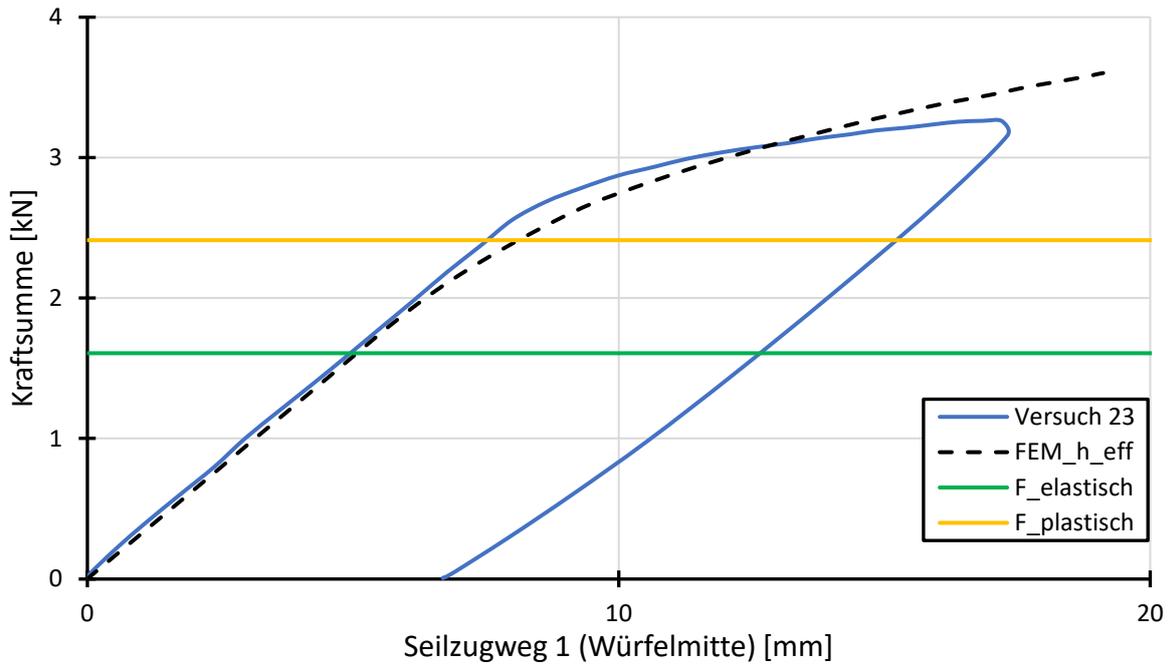


Abbildung A55: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 23

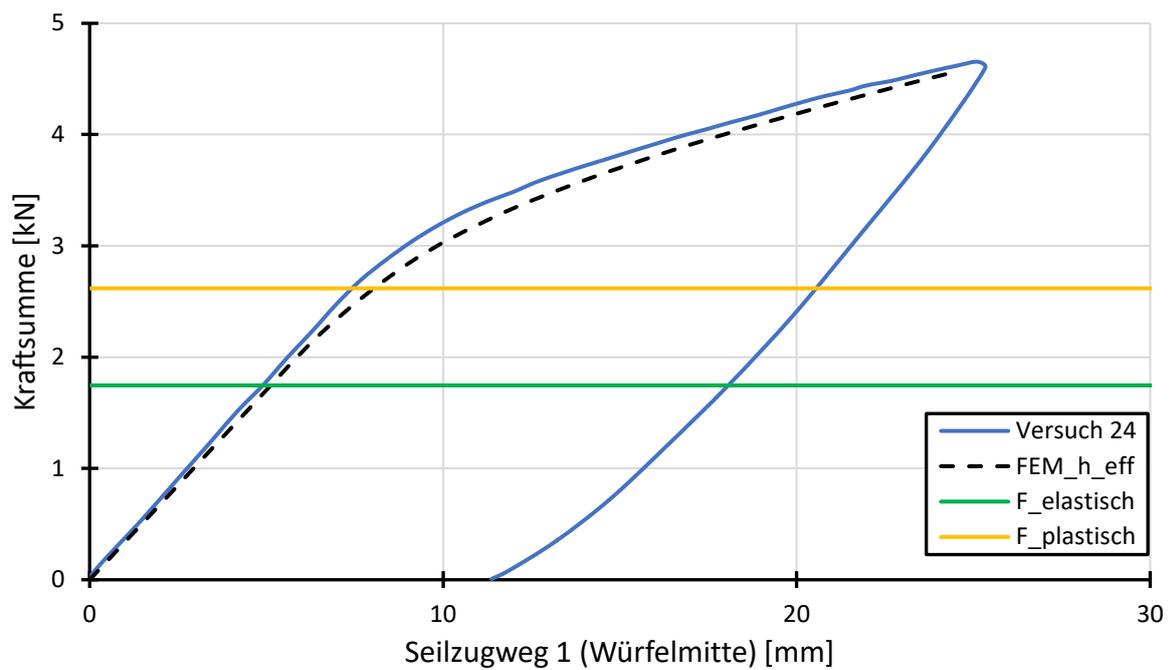


Abbildung A56: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 24

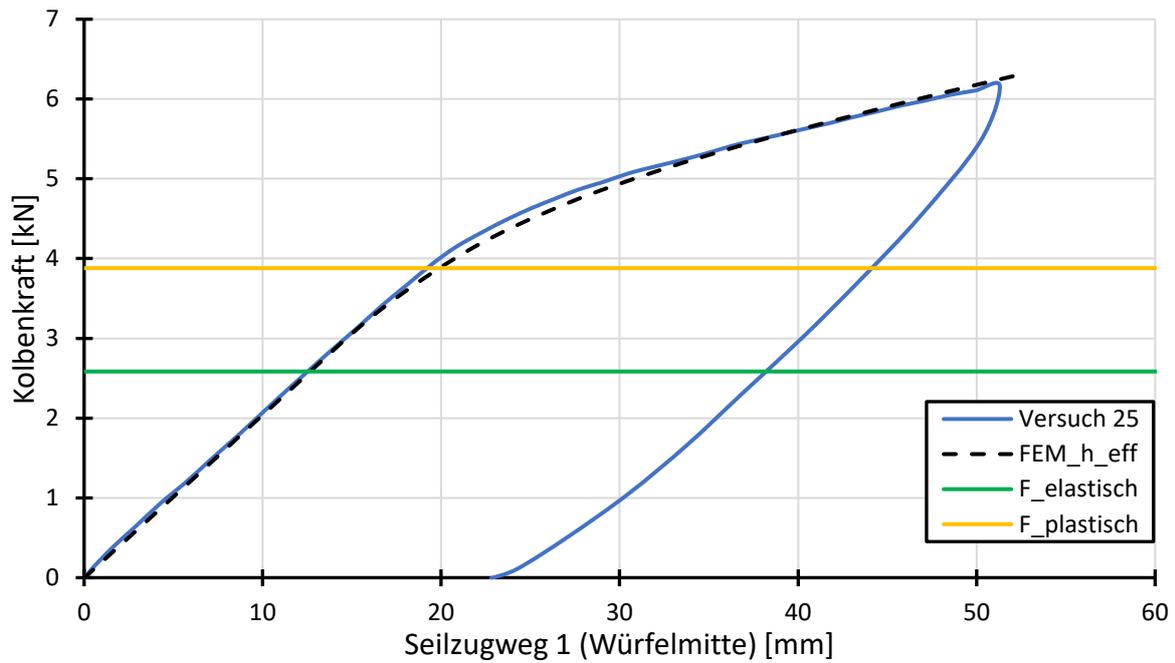


Abbildung A57: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 25

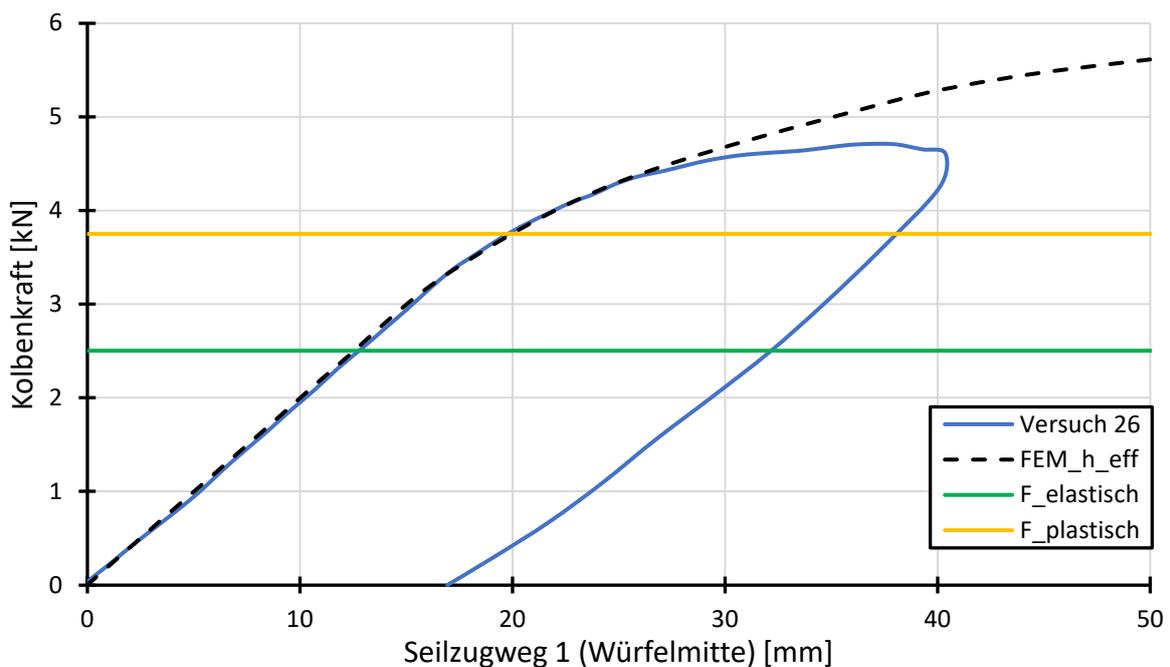


Abbildung A58: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 26

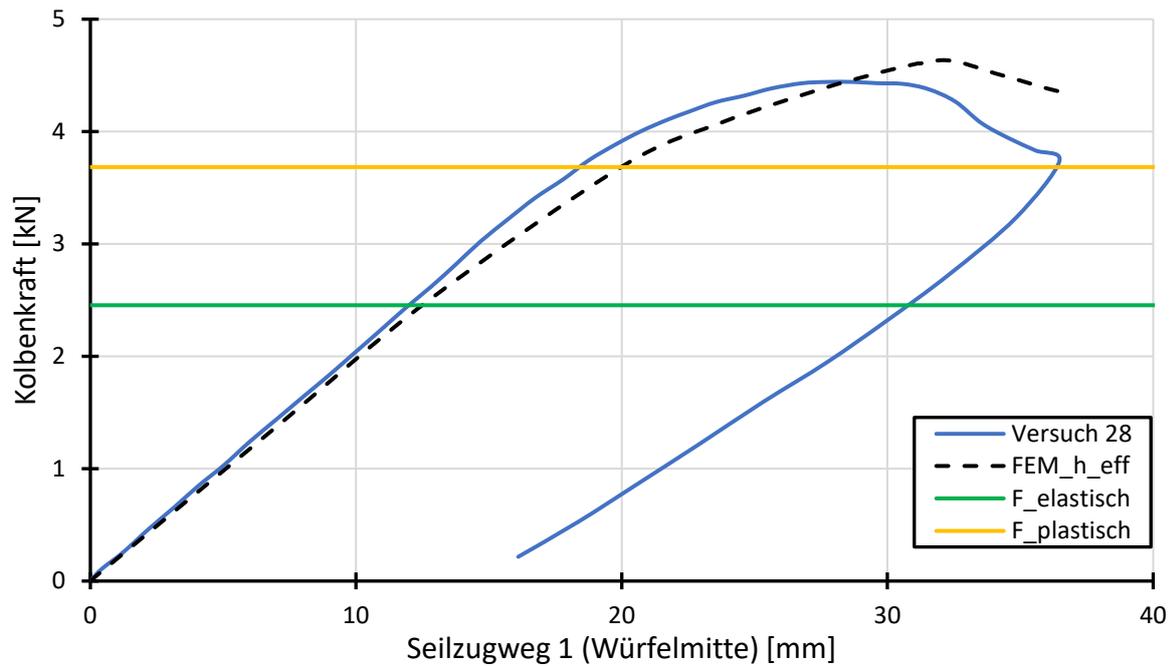


Abbildung A59: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 28

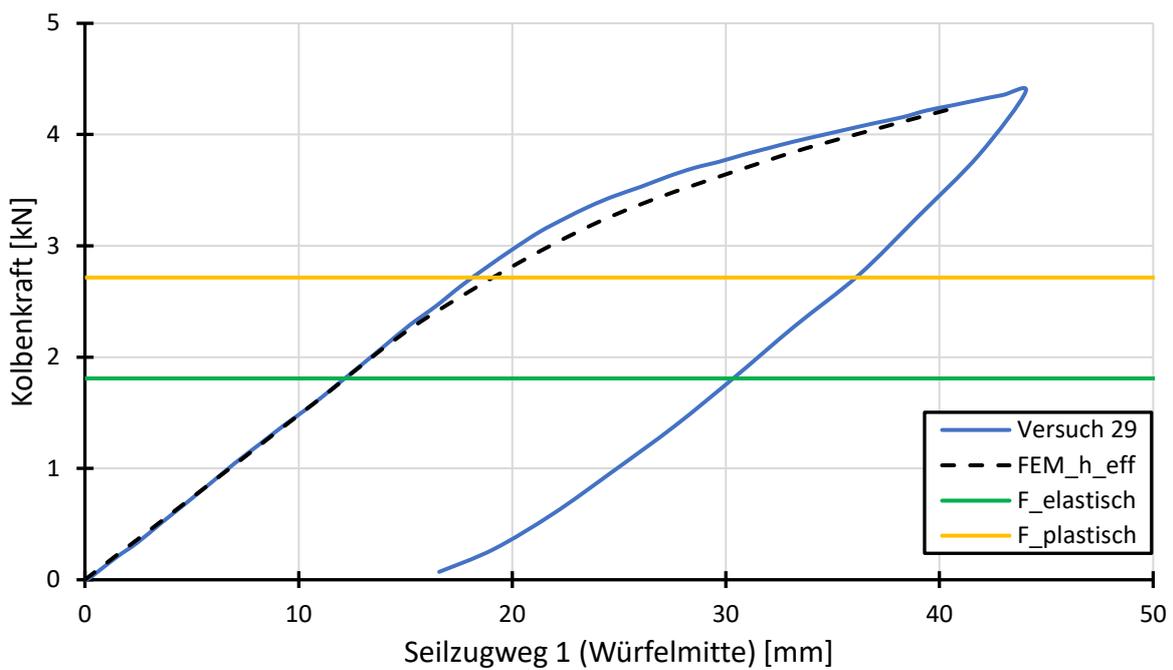


Abbildung A60: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 29

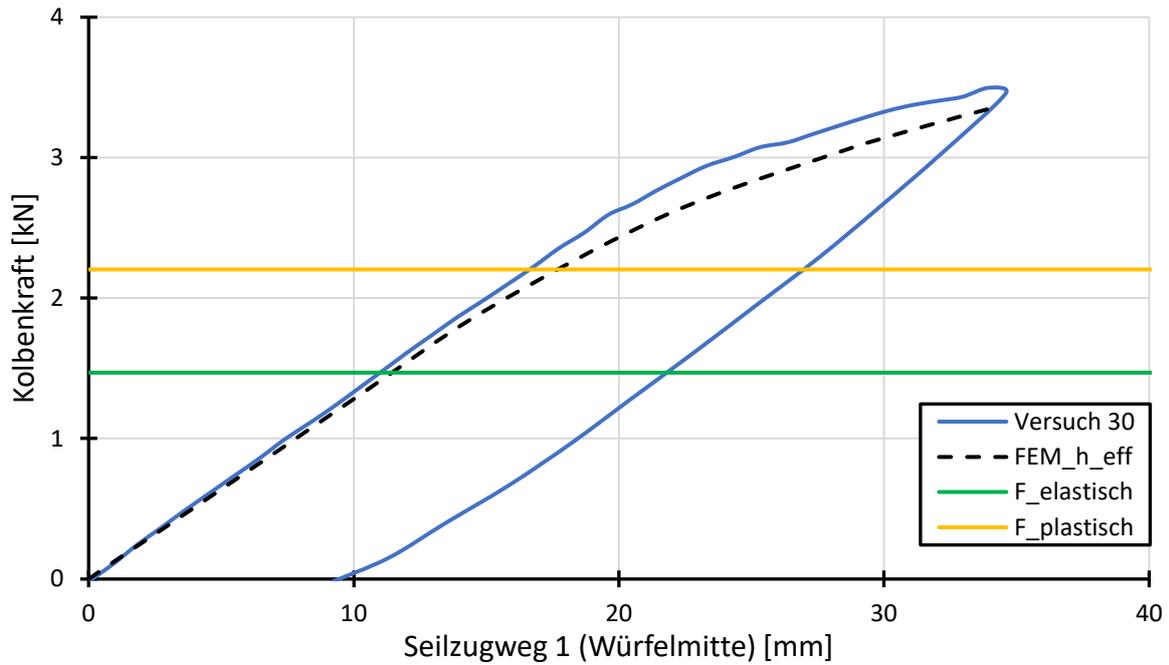


Abbildung A61: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 30

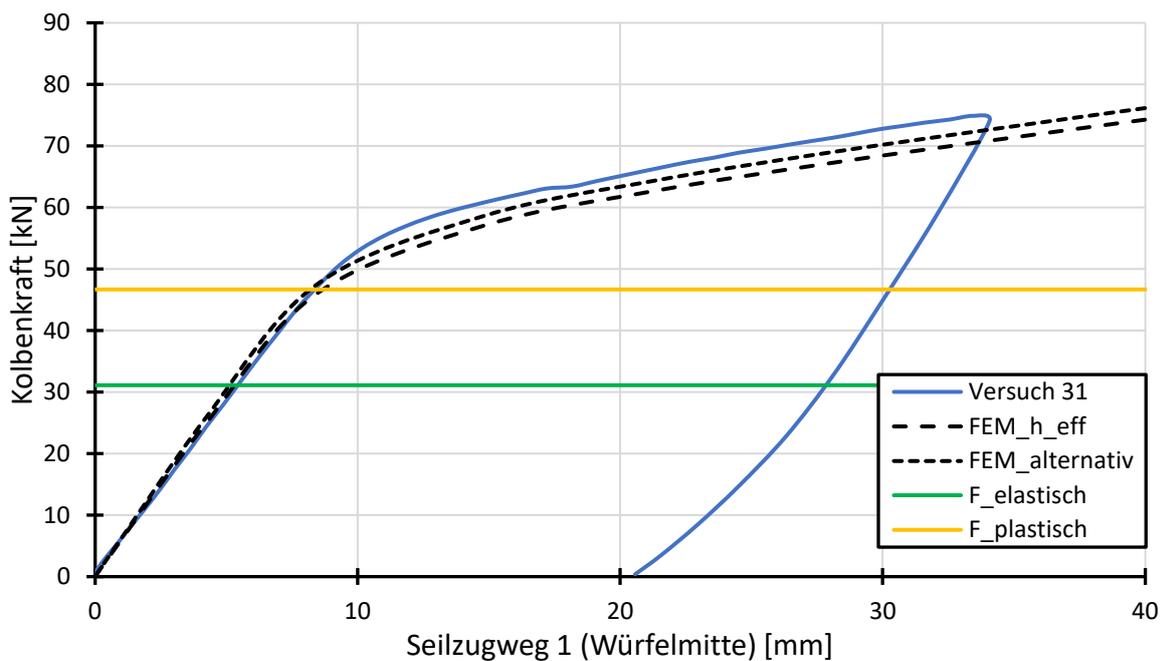


Abbildung A62: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 31

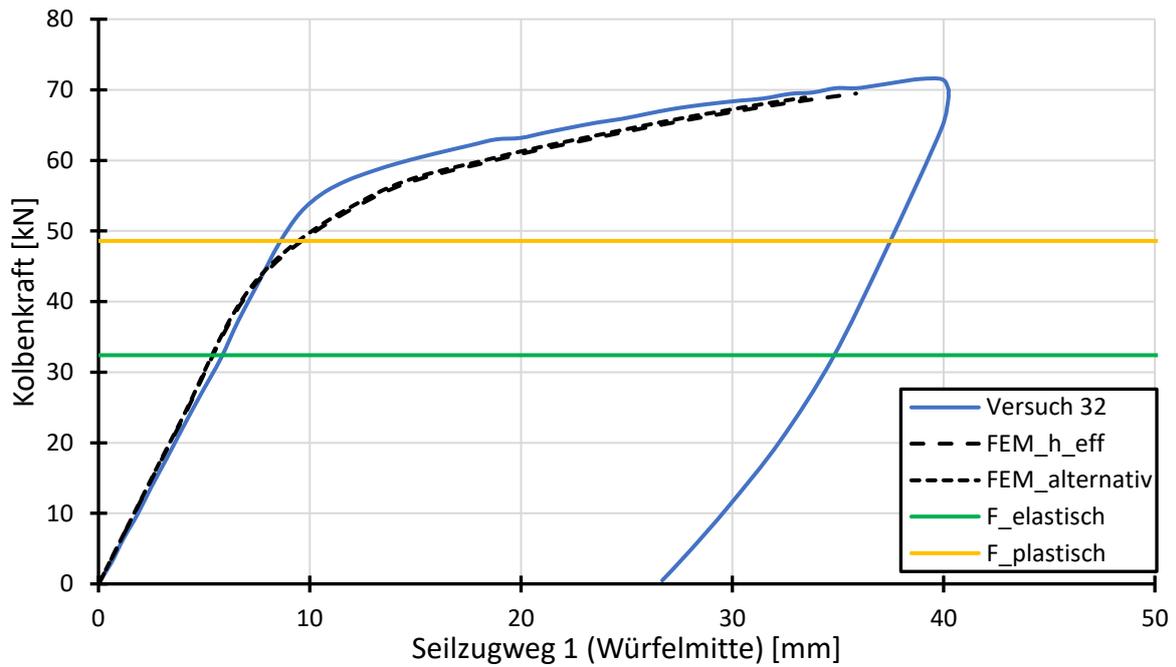


Abbildung A63: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 32

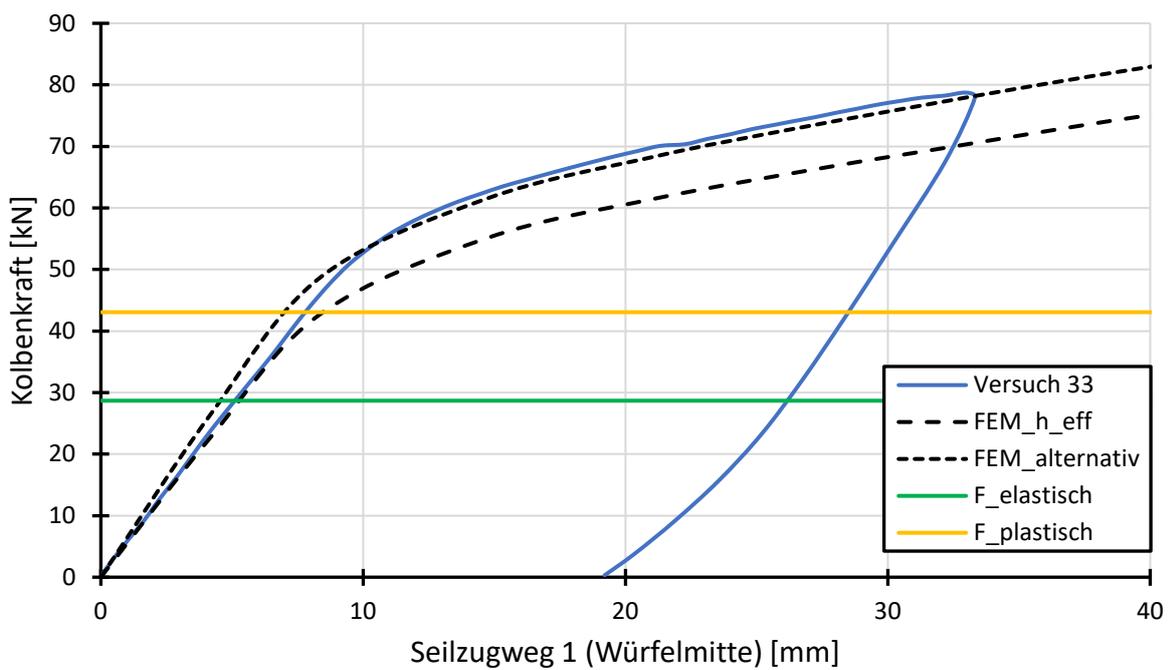


Abbildung A64: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 33

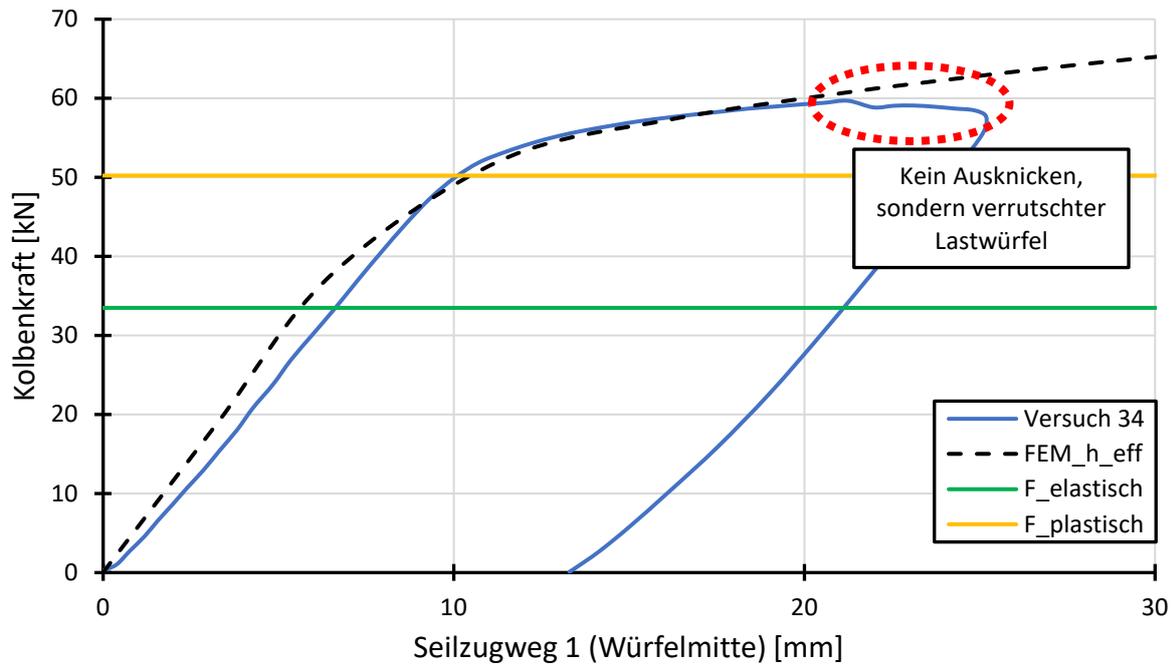


Abbildung A65: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 34

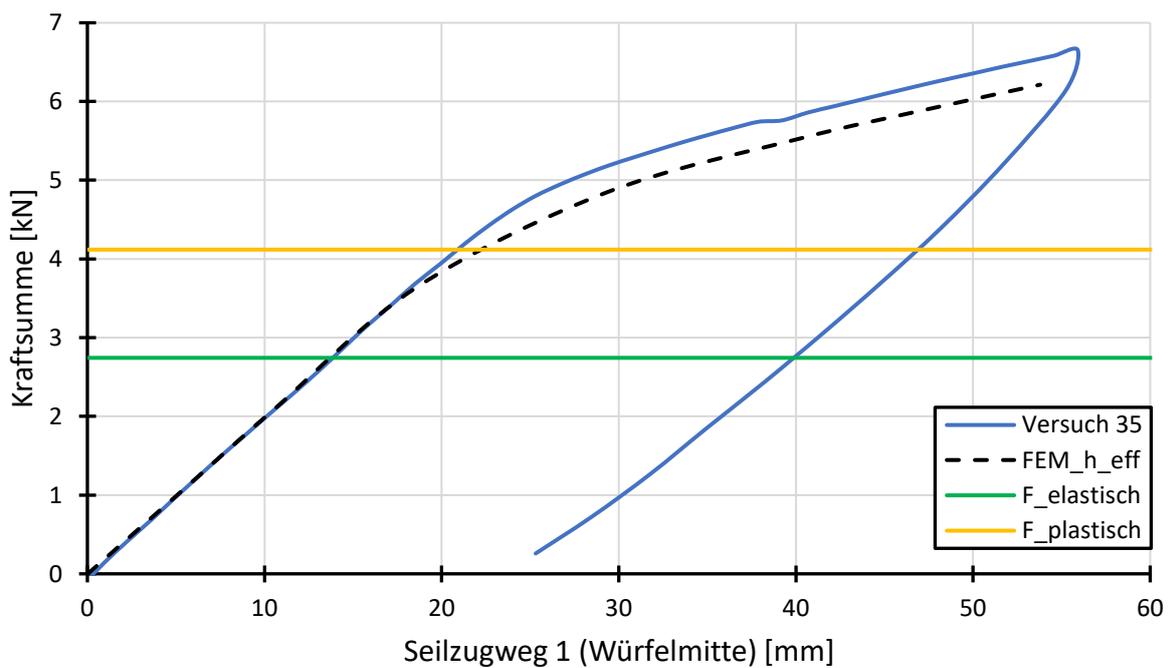


Abbildung A66: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 35

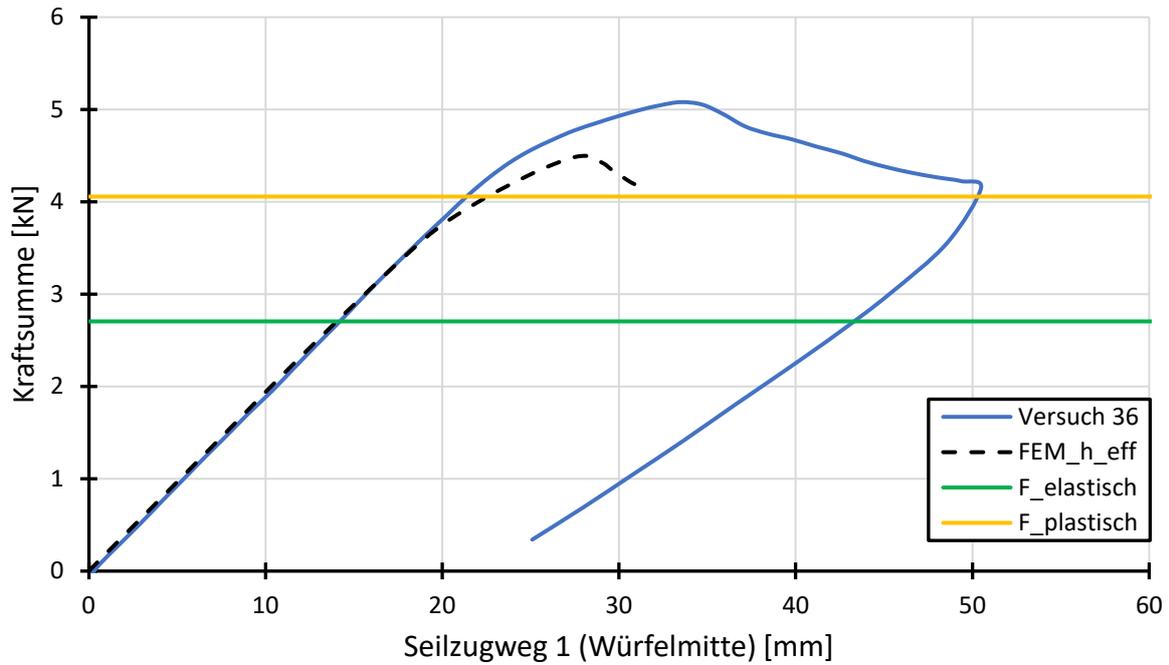


Abbildung A67: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 36

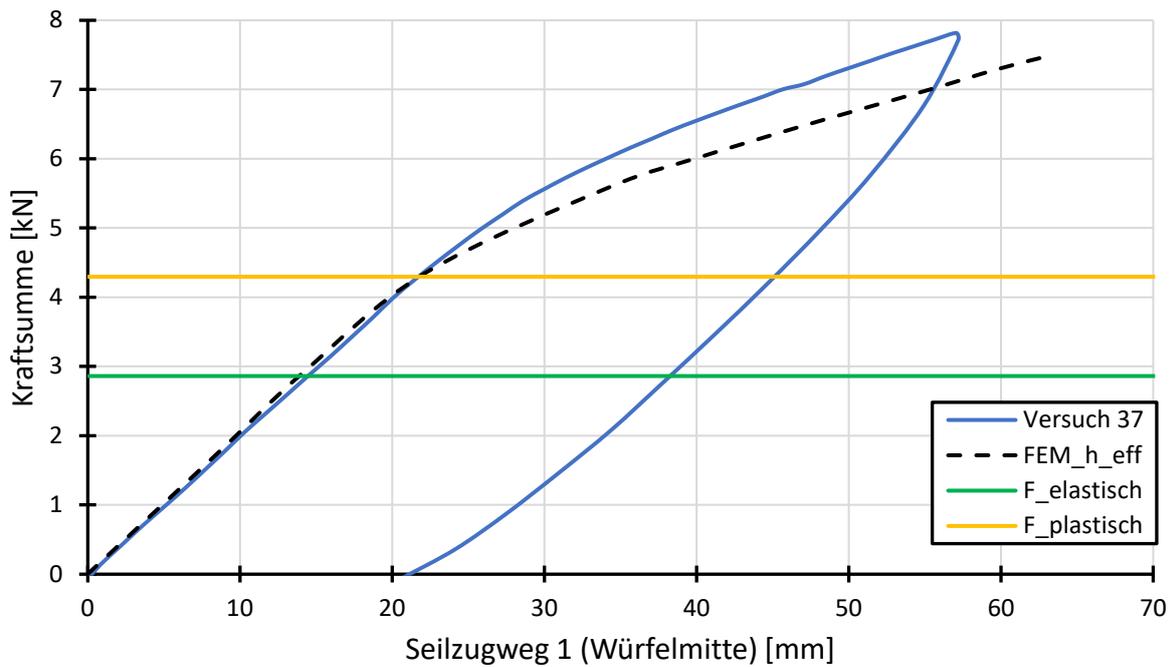


Abbildung A68: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 37

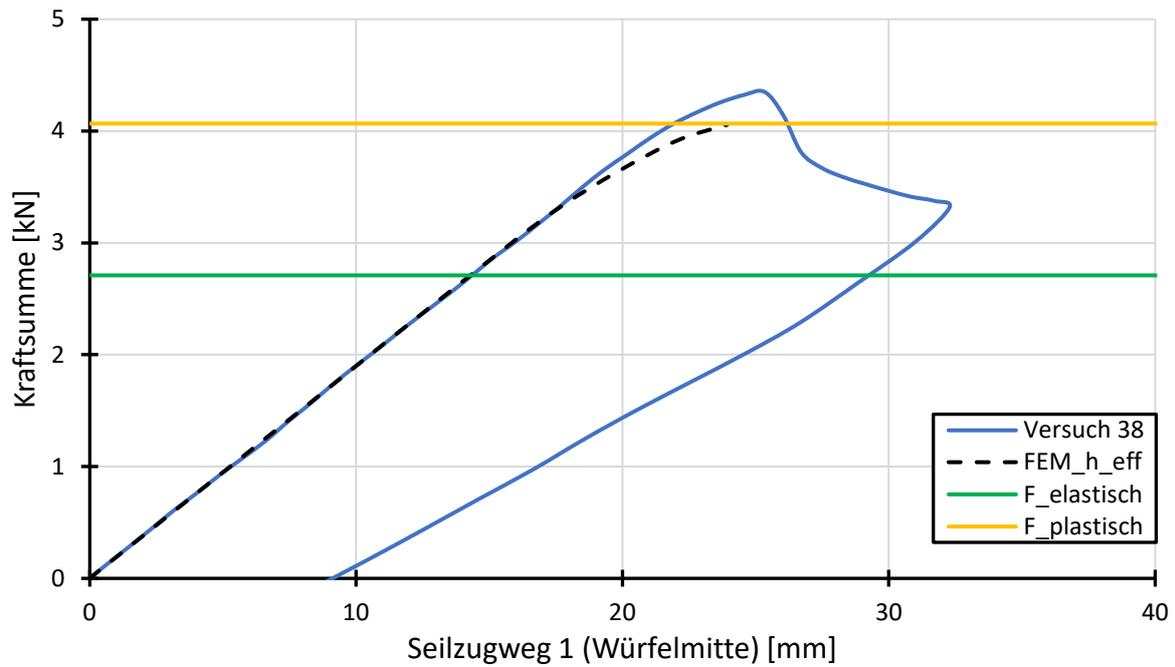


Abbildung A69: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 38

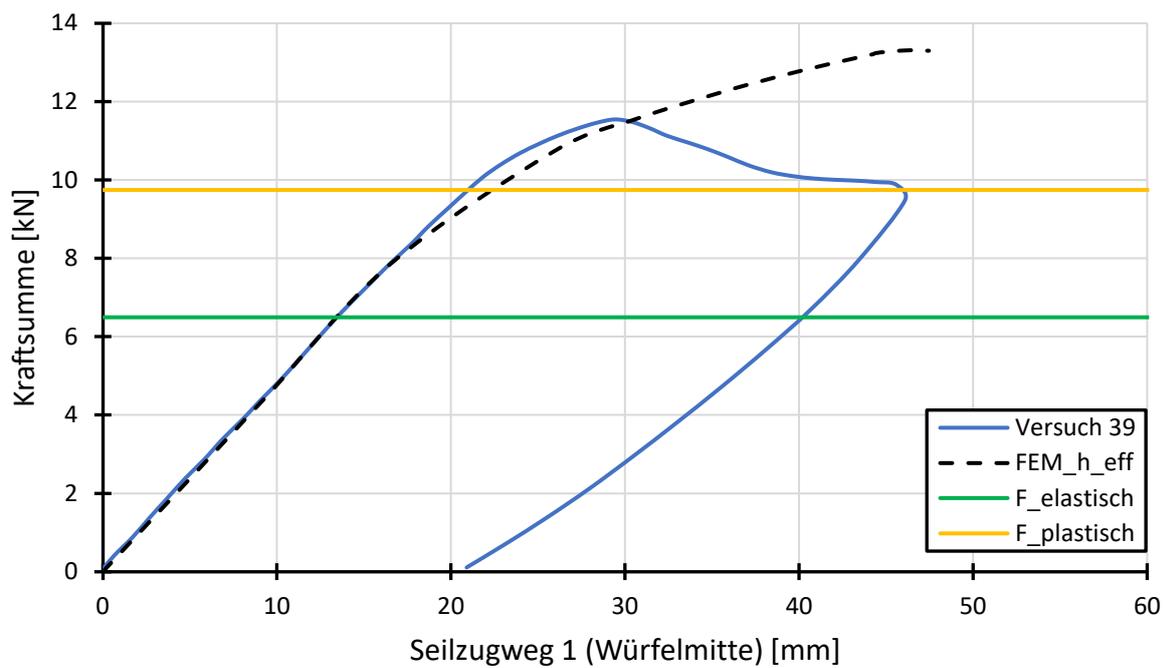


Abbildung A70: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 39

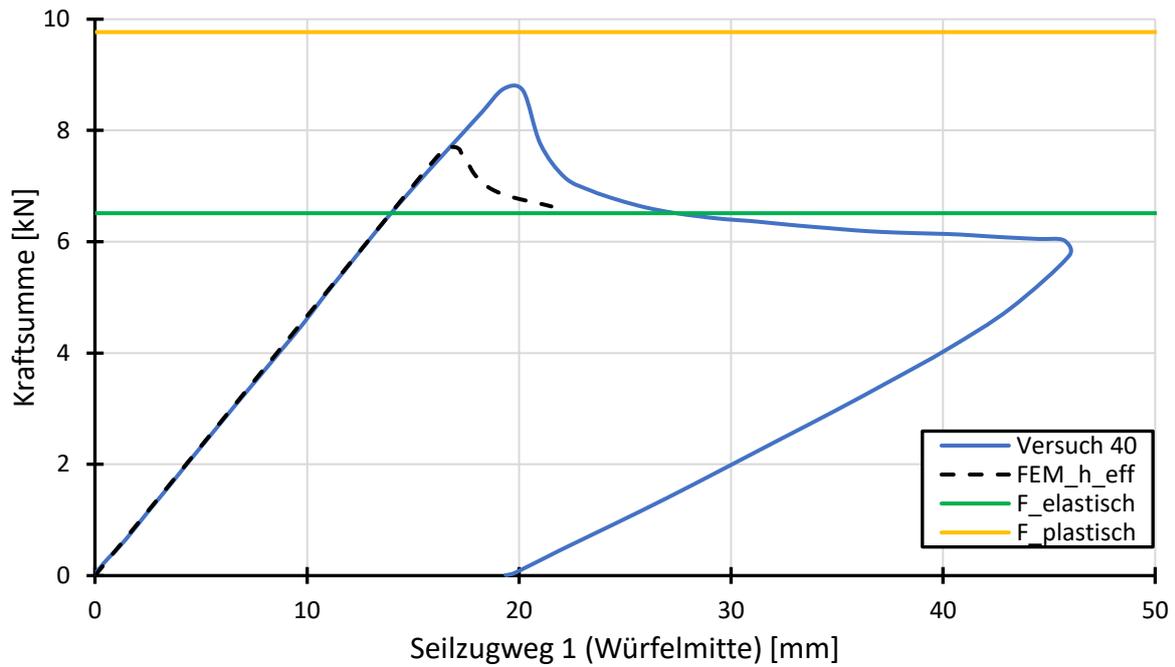


Abbildung A71: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 40

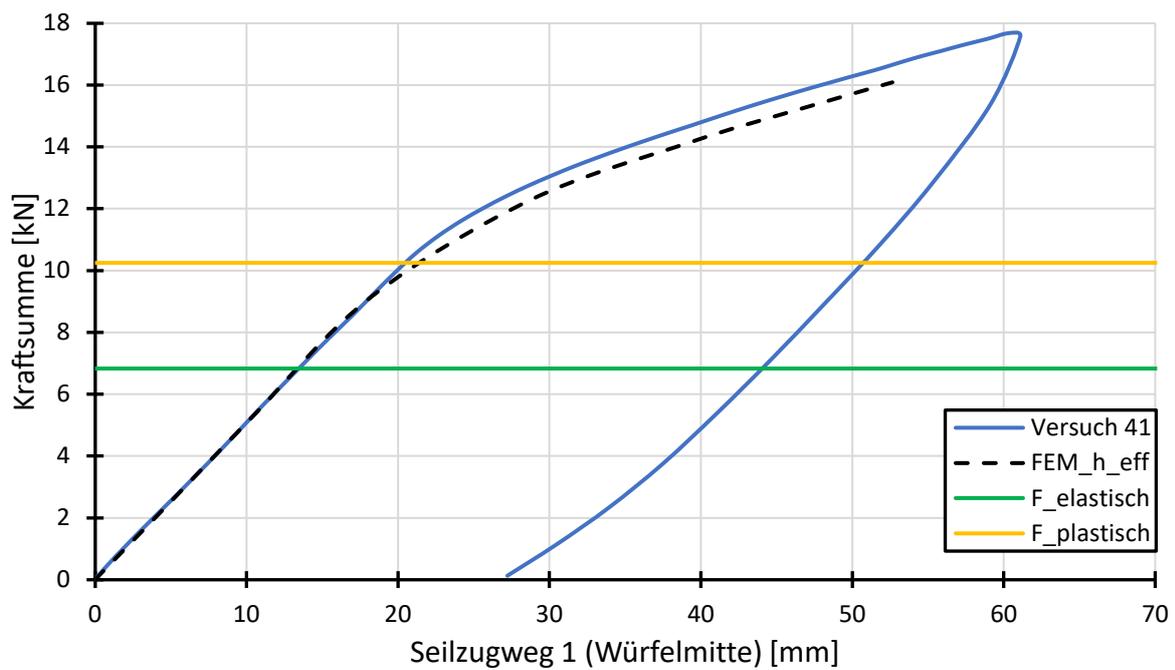


Abbildung A72: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 41

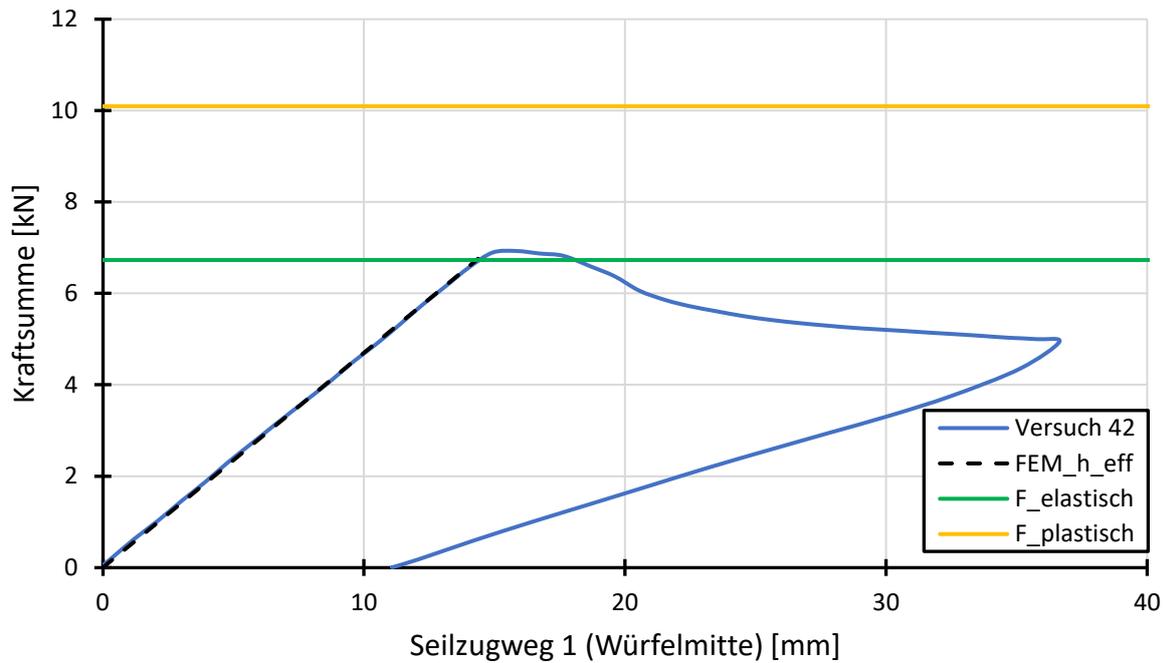


Abbildung A73: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 42

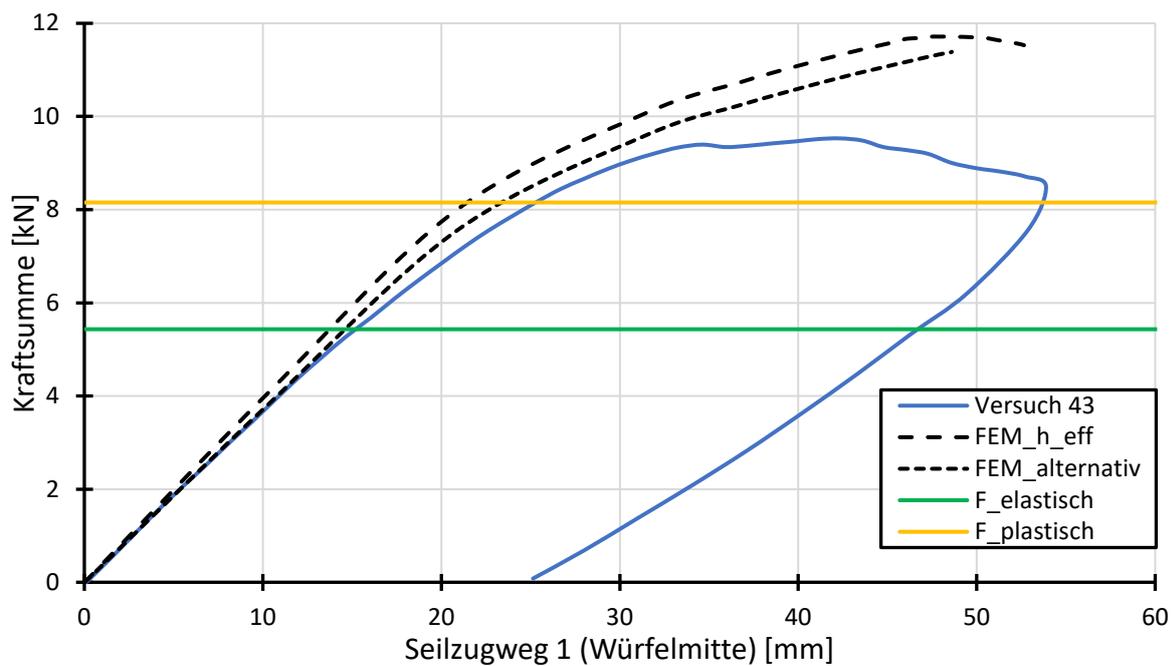


Abbildung A74: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 43

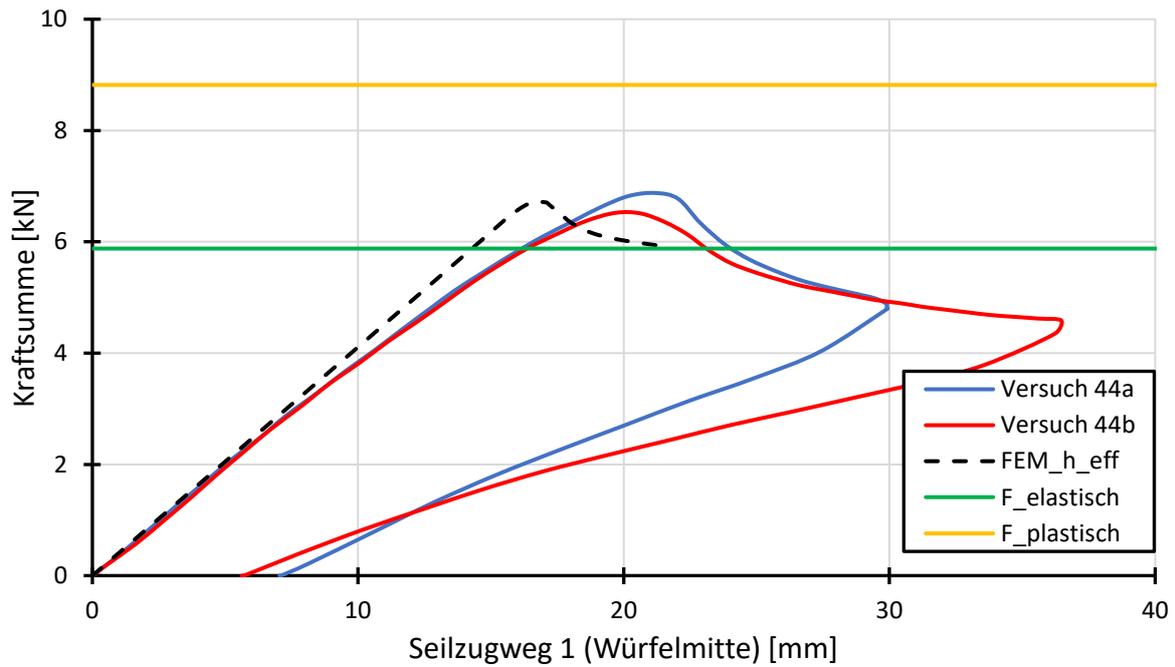


Abbildung A75: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 44

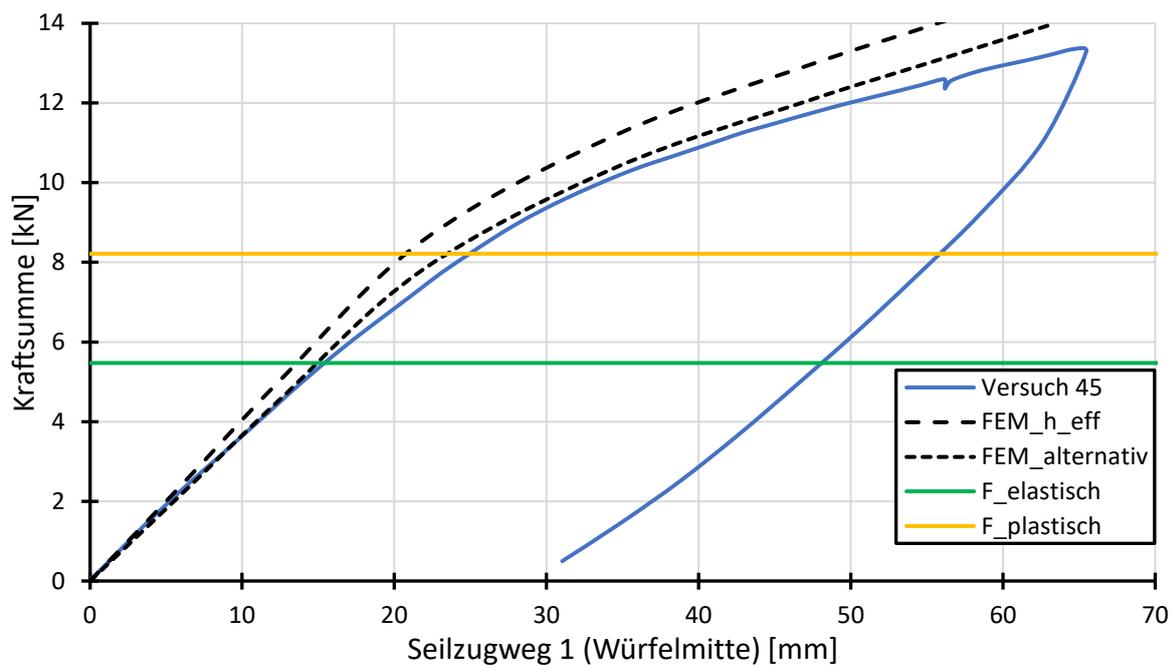


Abbildung A76: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 45

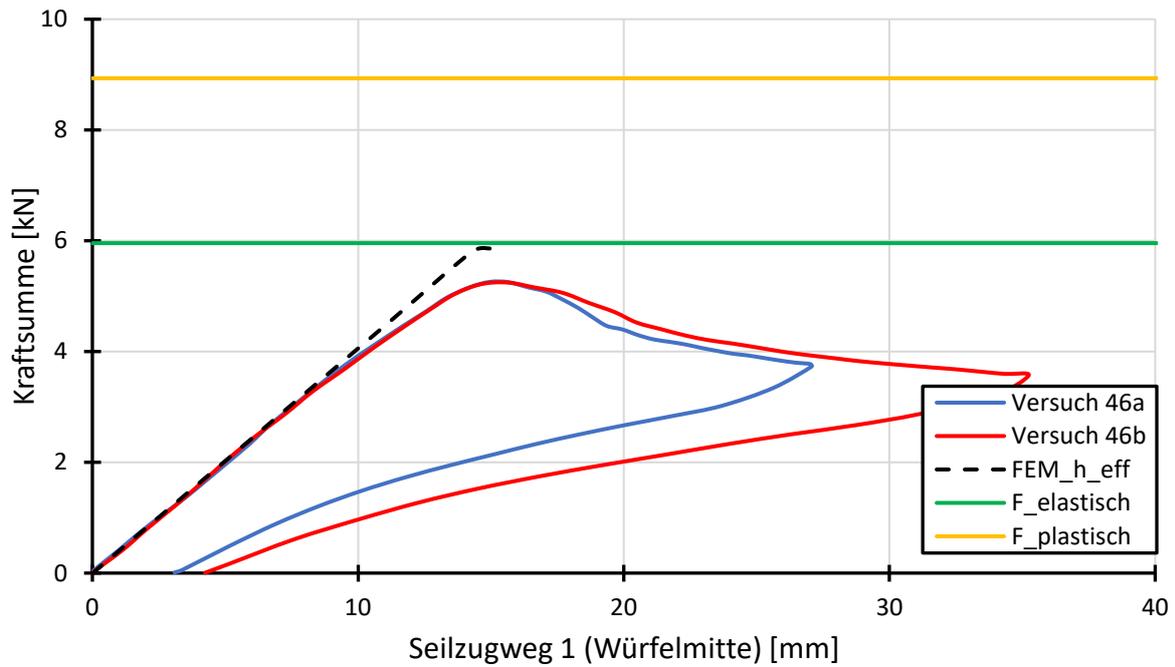


Abbildung A77: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 46

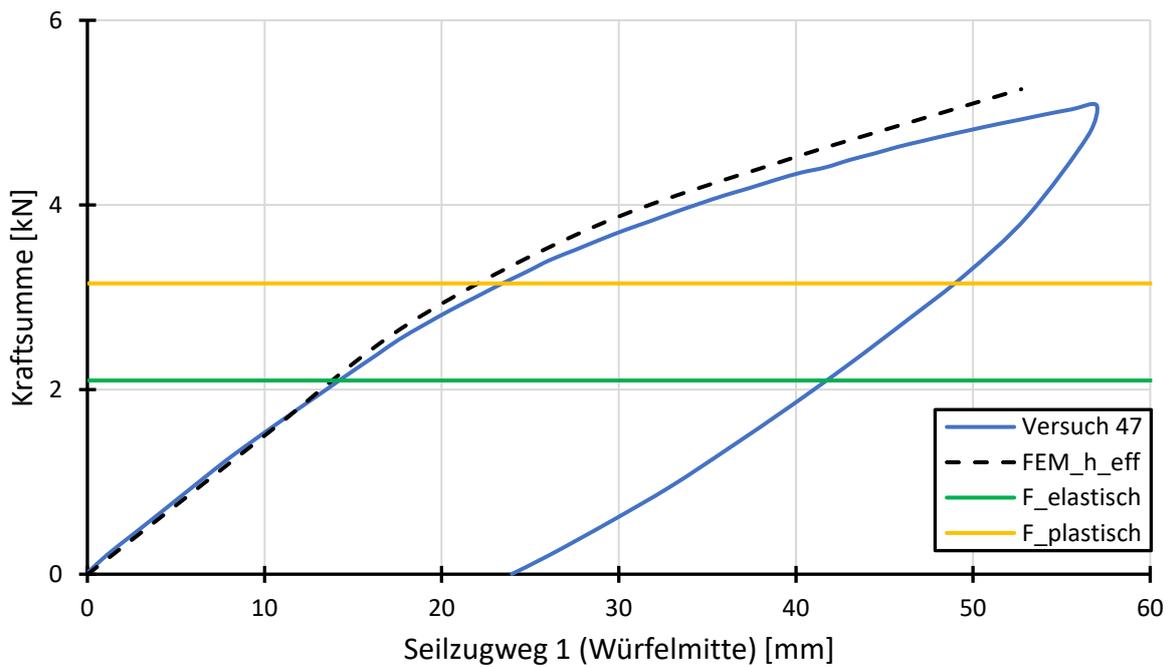


Abbildung A78: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 47

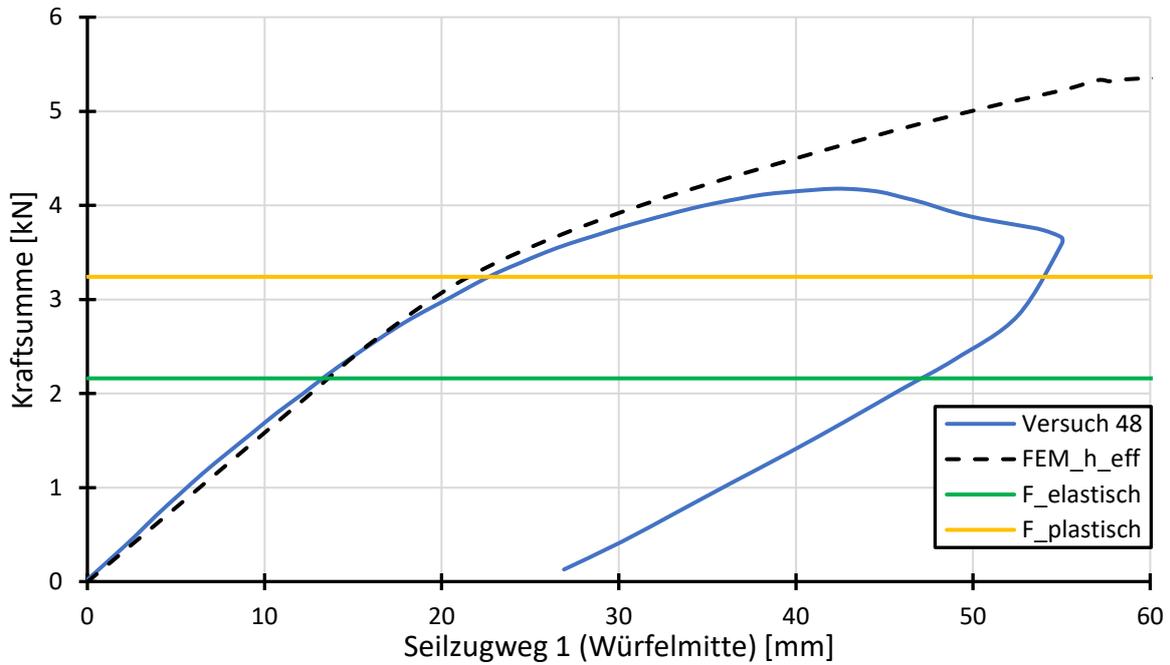


Abbildung A79: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 48

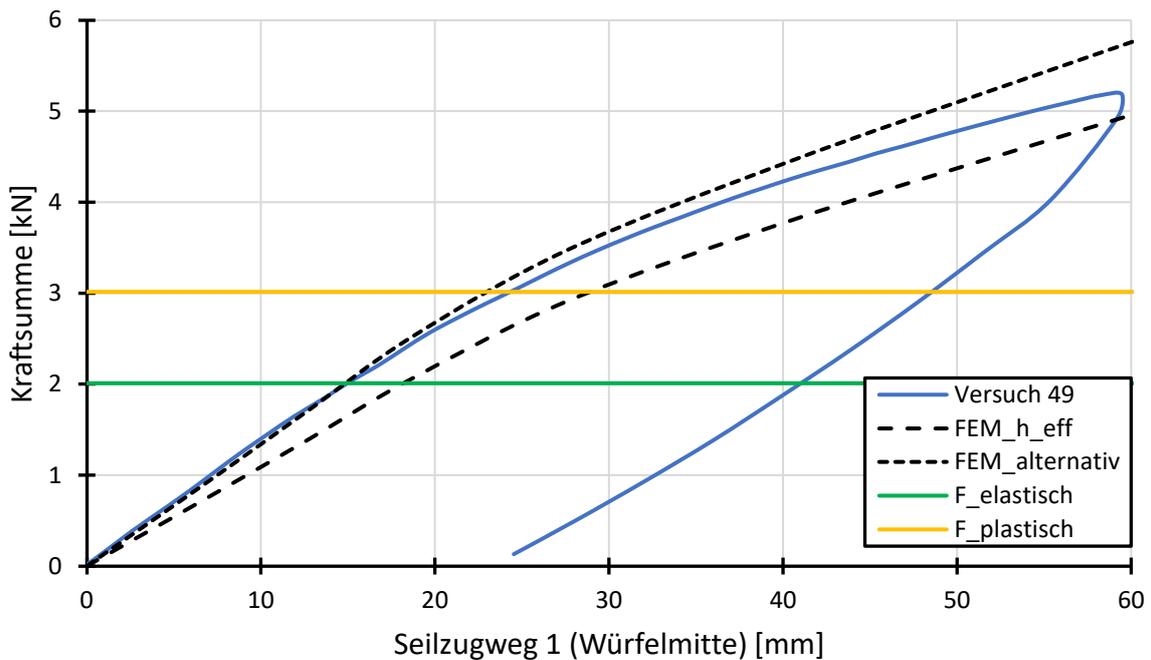


Abbildung A80: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 49

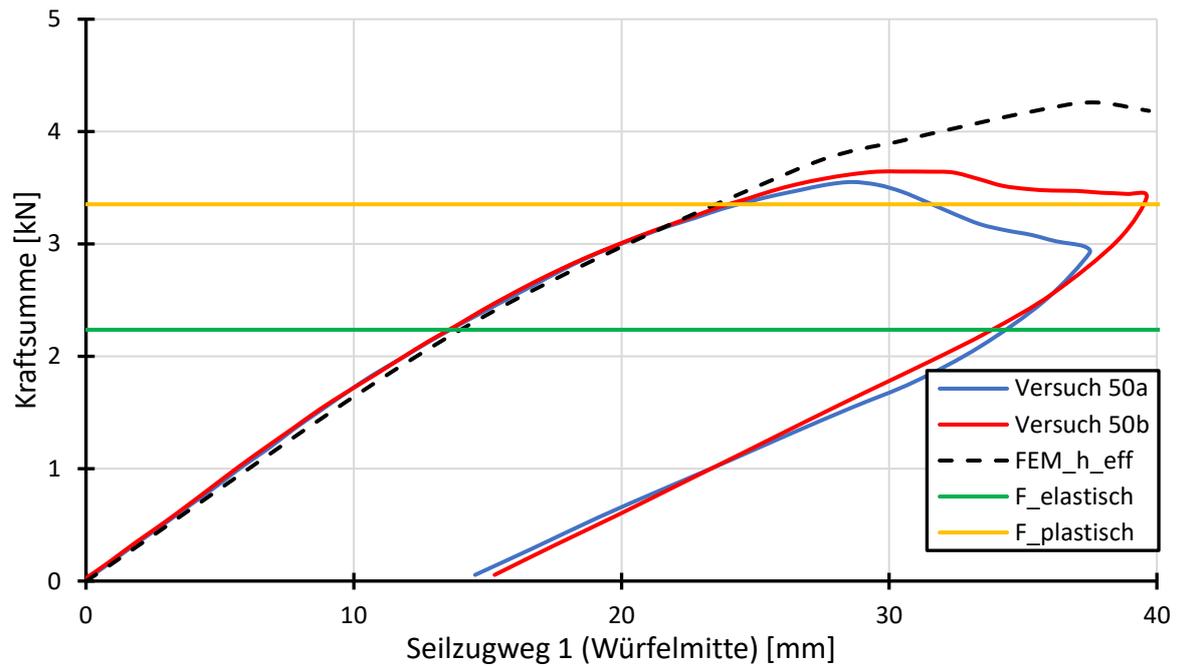


Abbildung A81: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 50

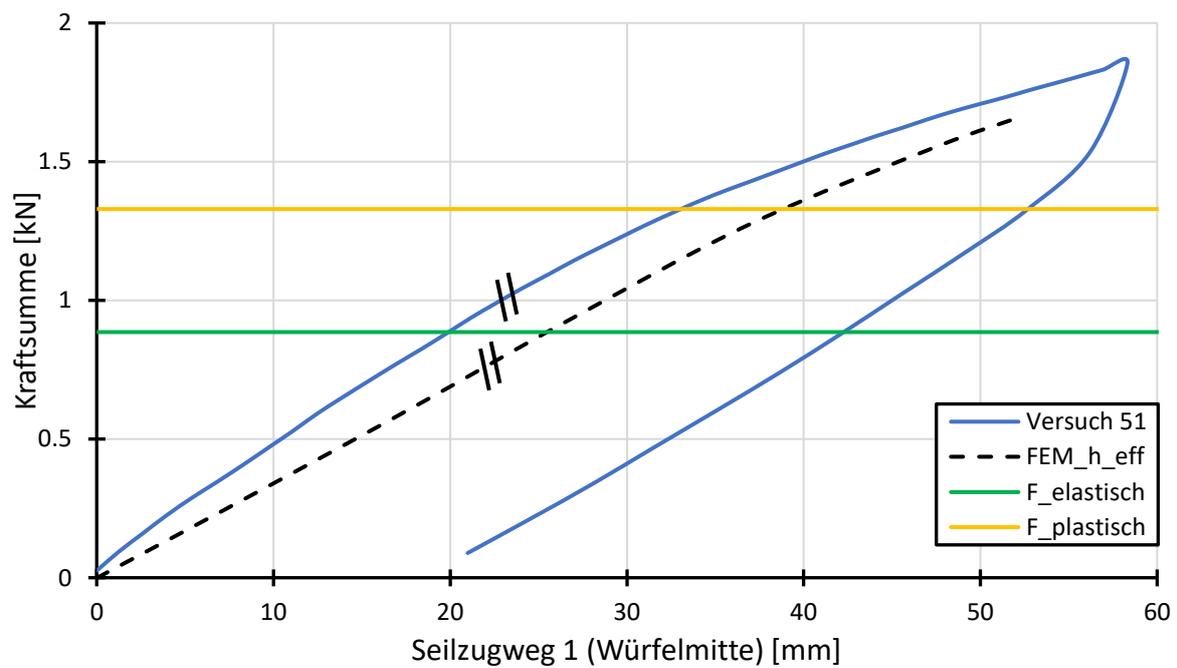


Abbildung A82: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 51

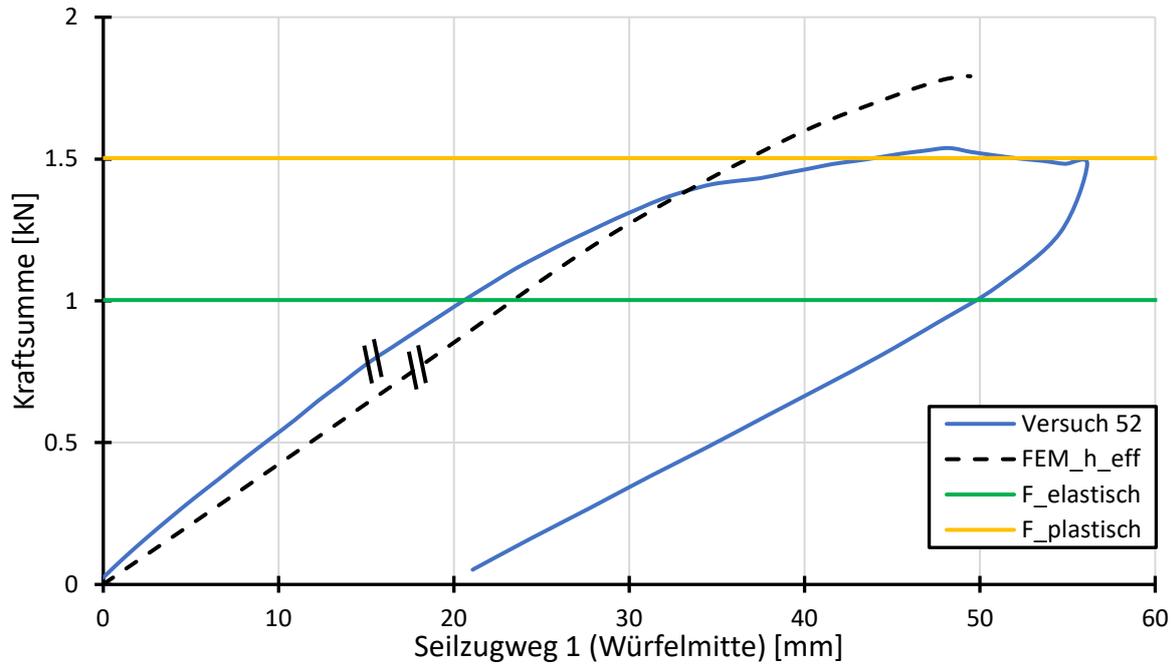


Abbildung A83: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 52

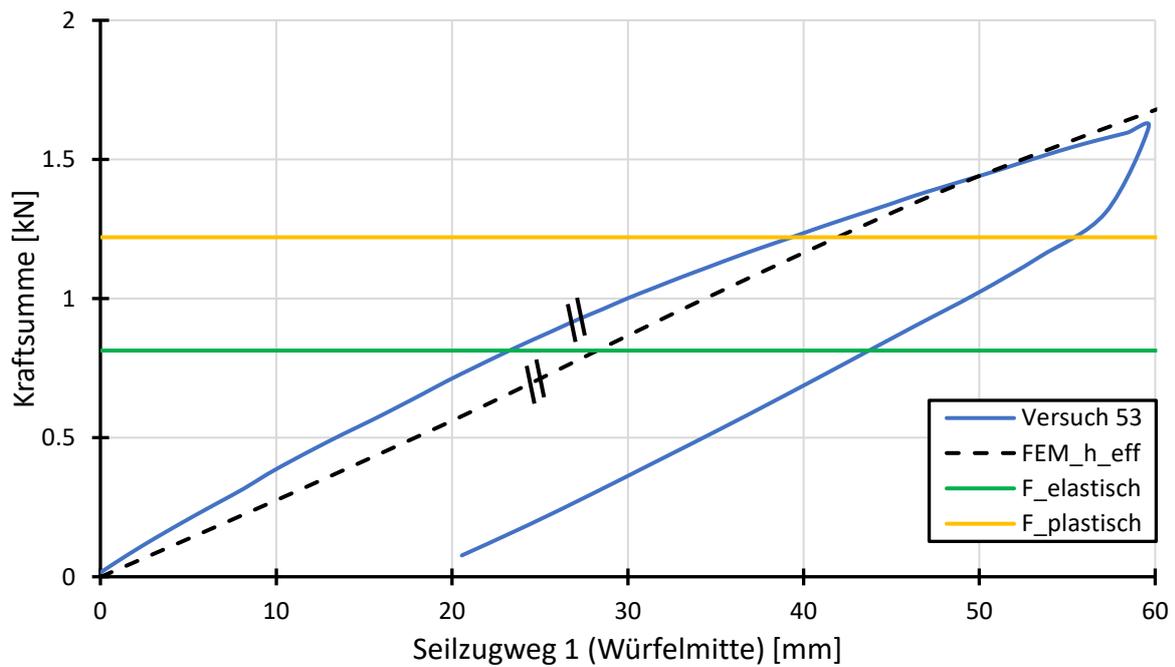


Abbildung A84: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 53

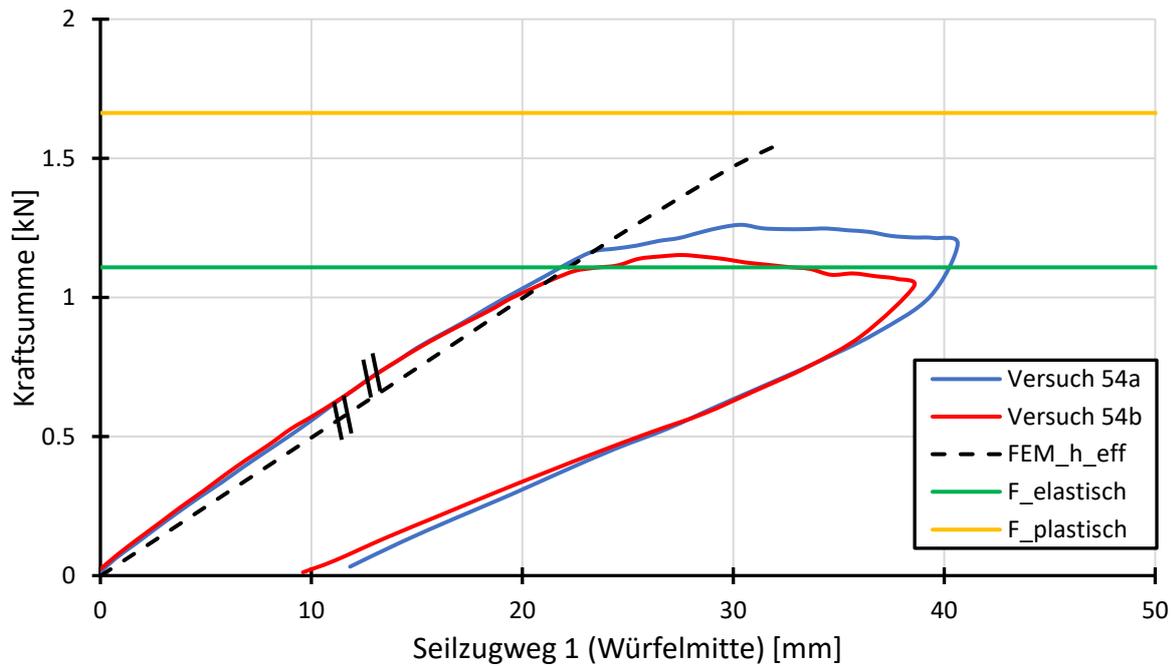


Abbildung A85: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 54

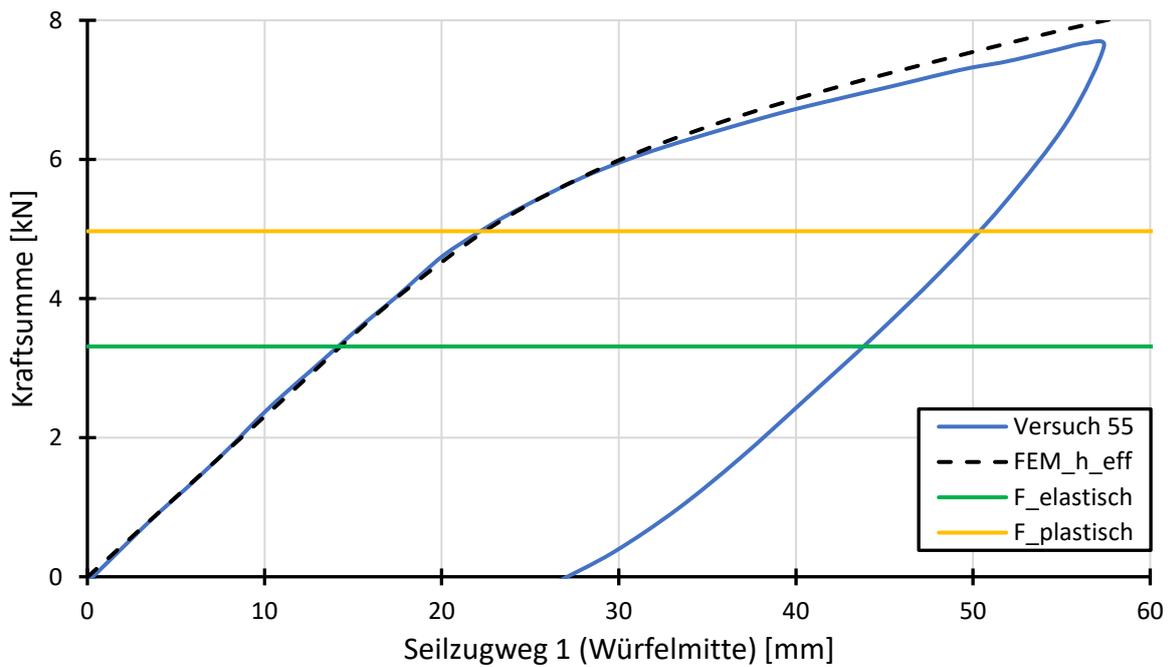


Abbildung A86: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 55

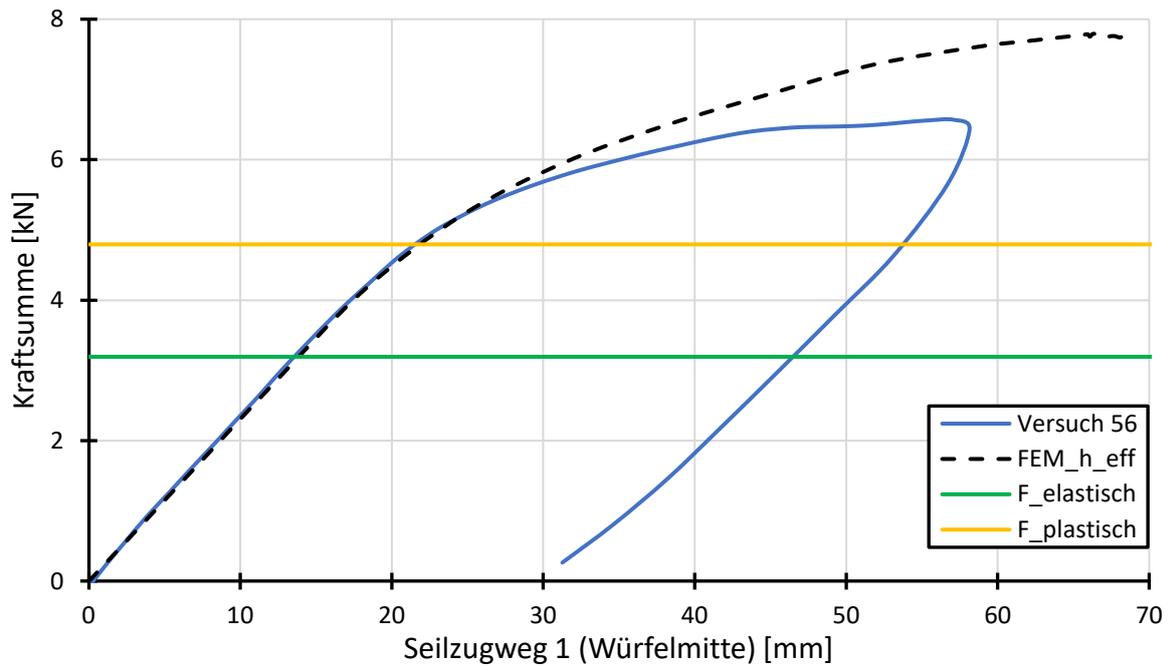


Abbildung A87: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 56

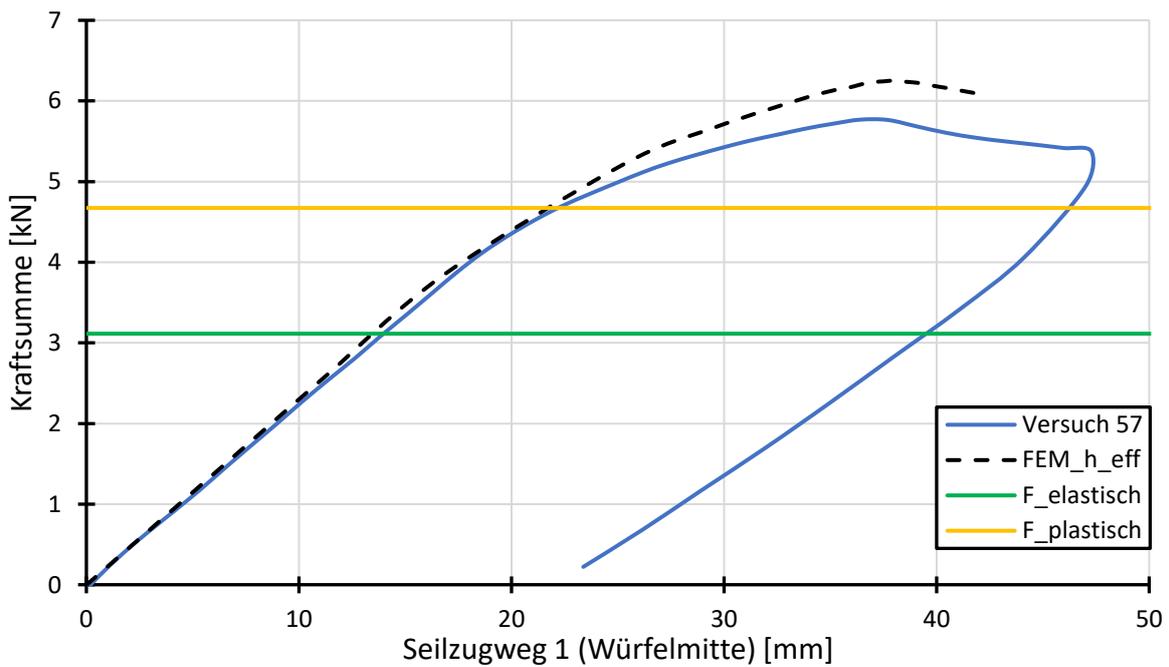


Abbildung A88: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 57

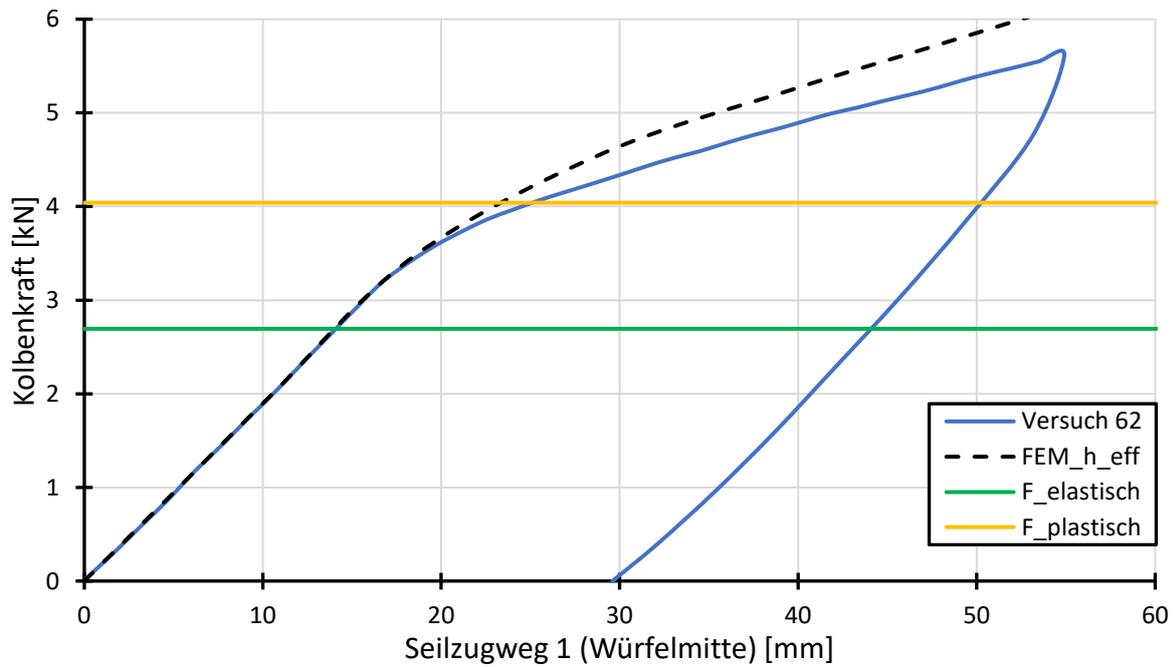


Abbildung A89: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 62

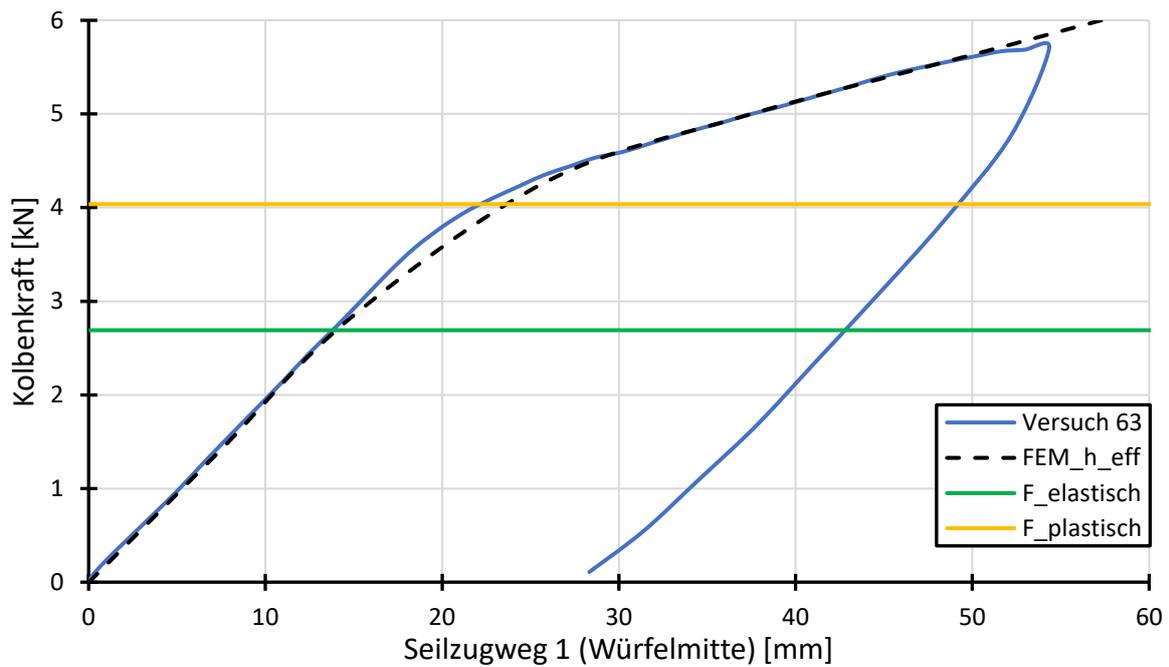


Abbildung A90: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 63

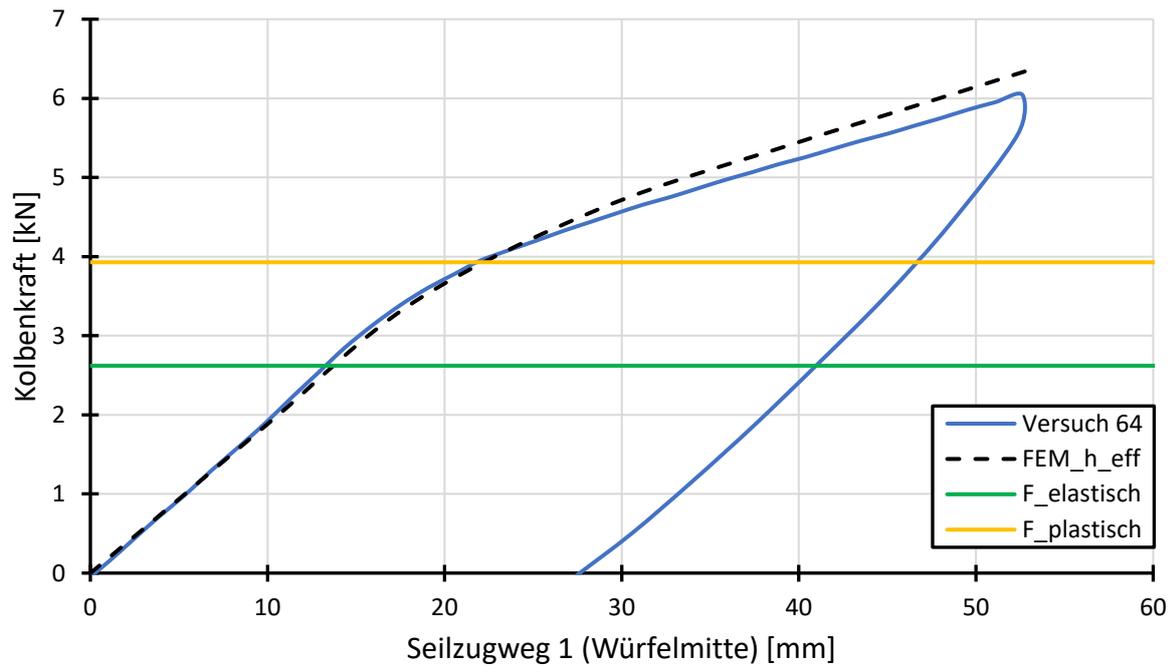


Abbildung A91: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 64

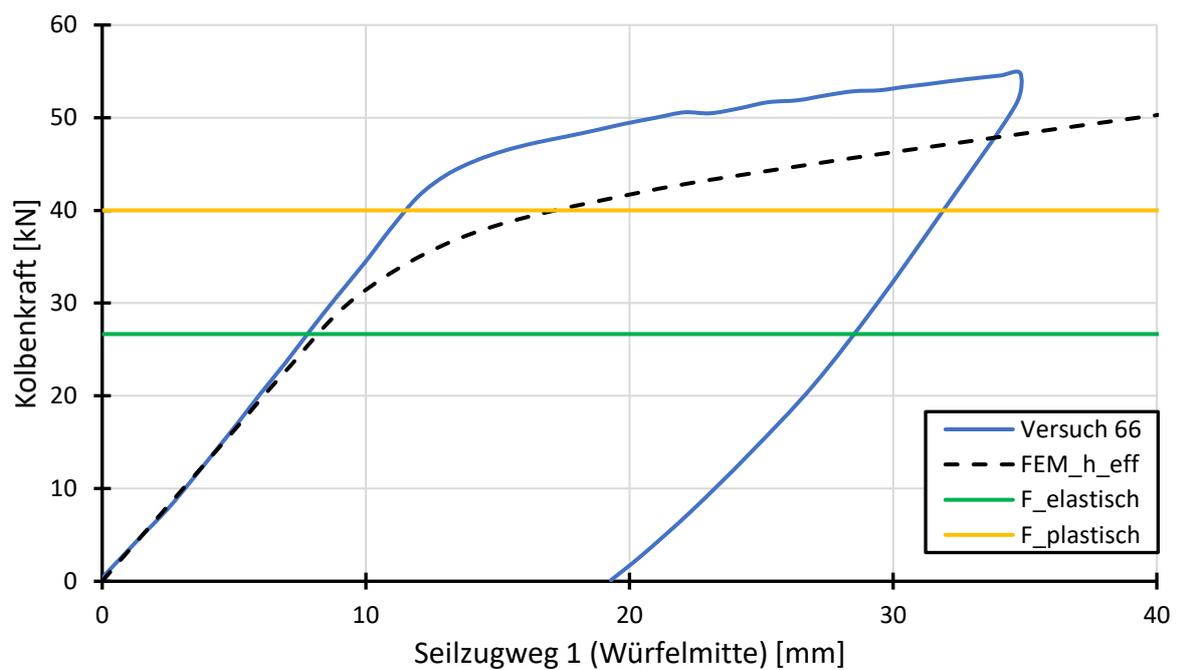


Abbildung A92: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 66

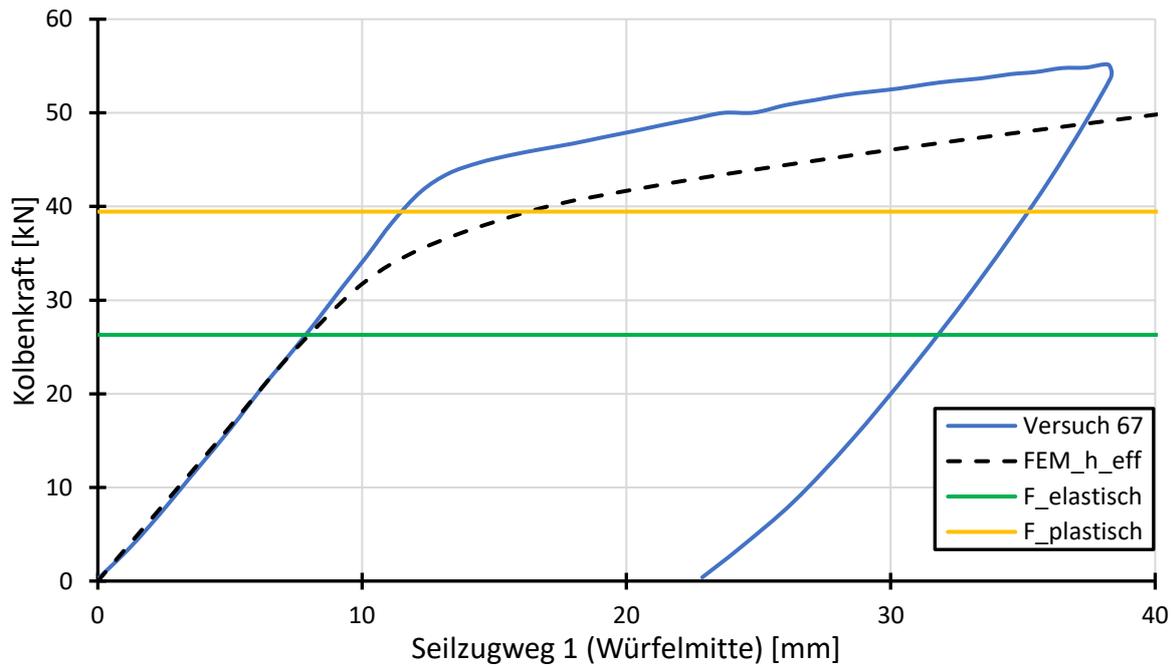


Abbildung A93: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 67

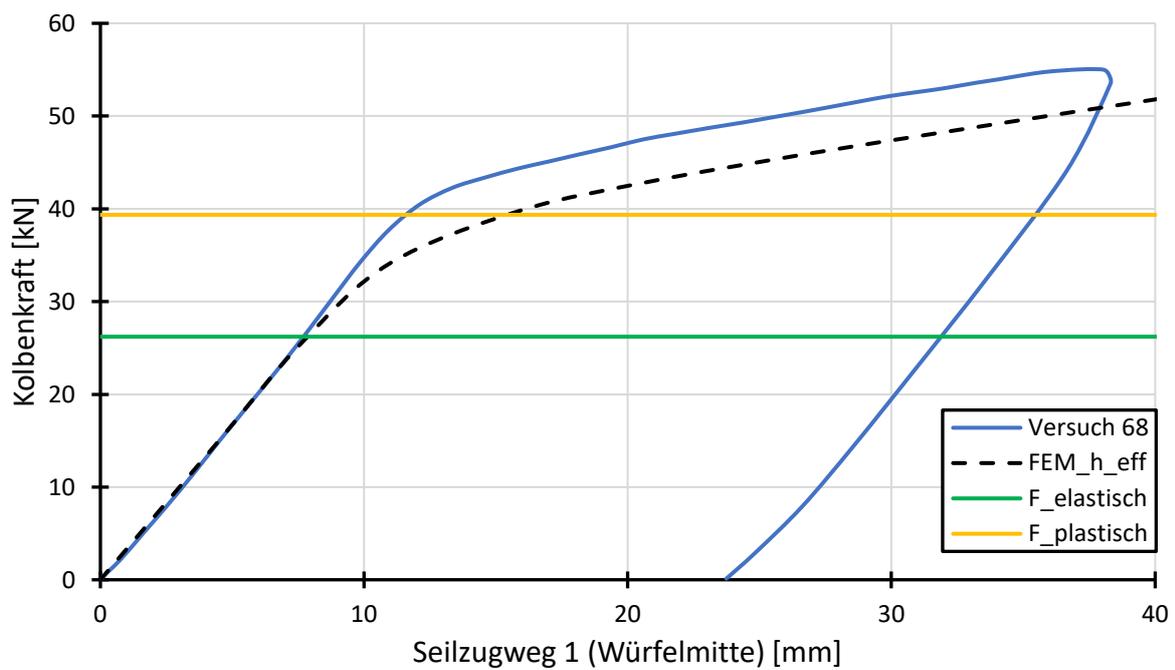


Abbildung A94: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 68

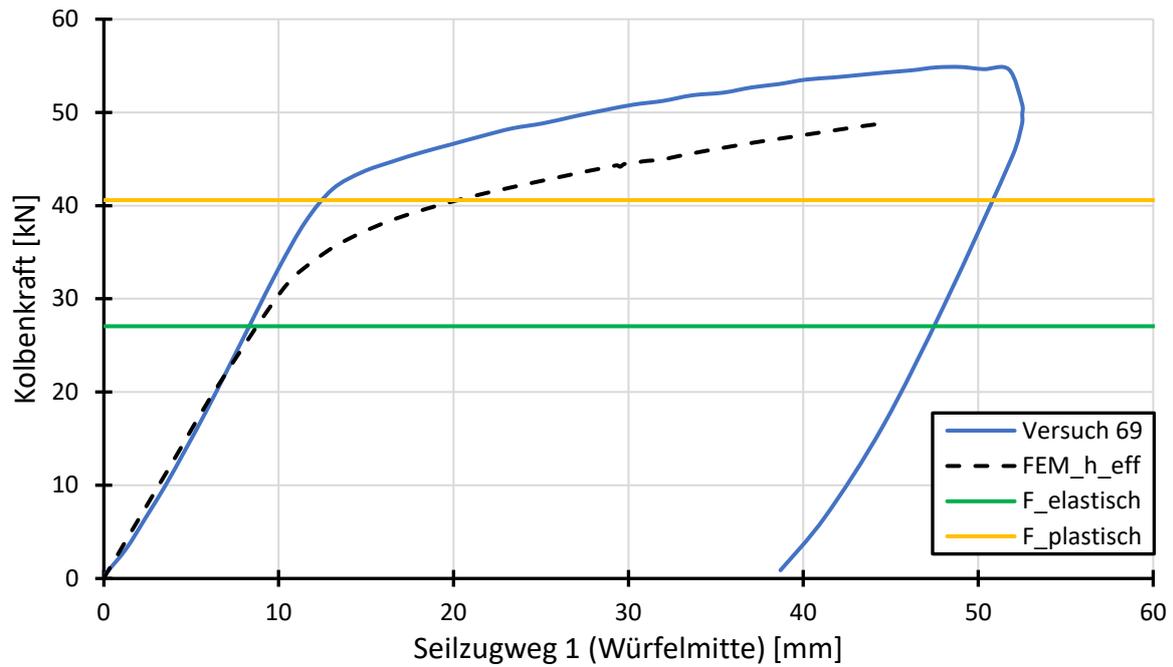


Abbildung A95: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 69

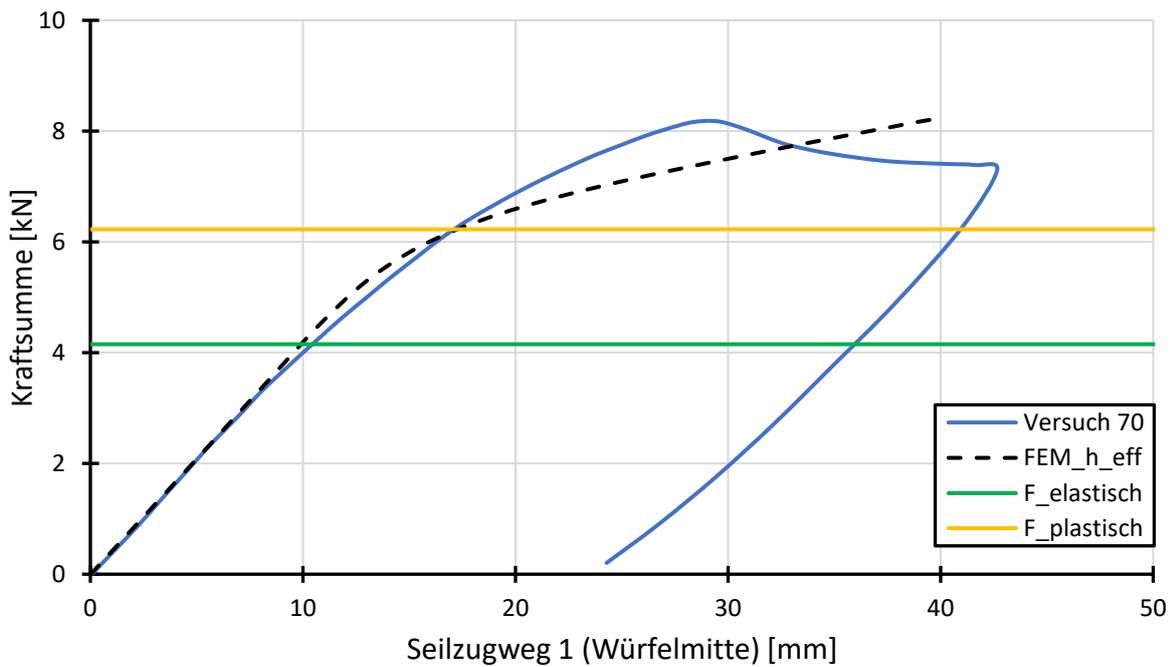


Abbildung A96: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 70

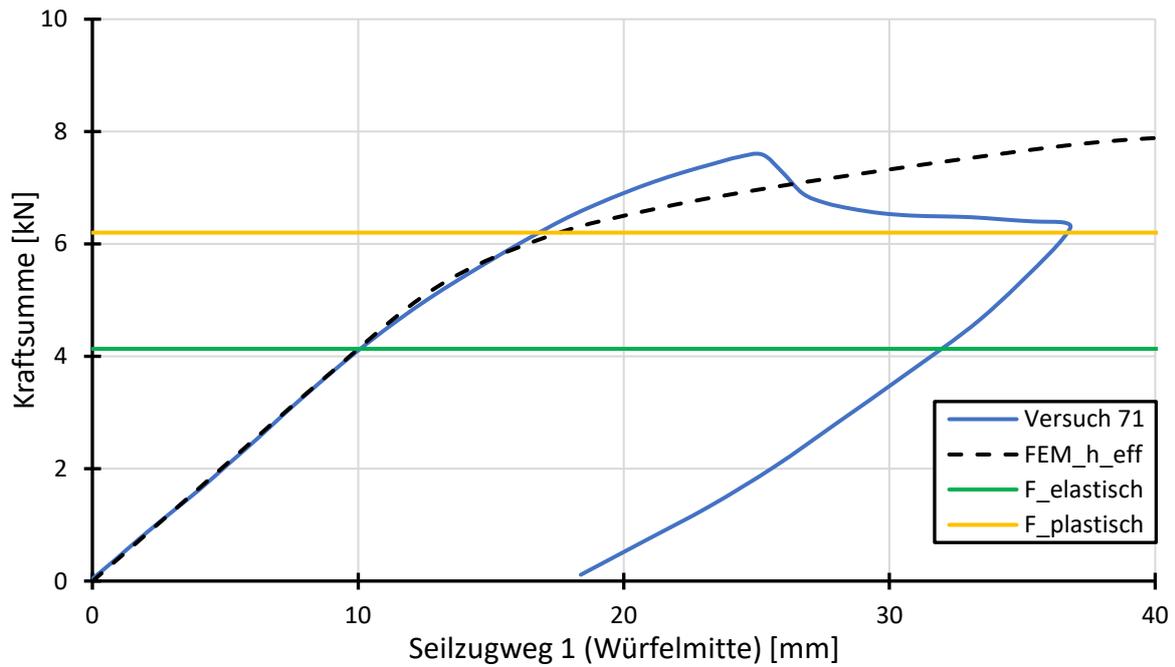


Abbildung A97: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 71

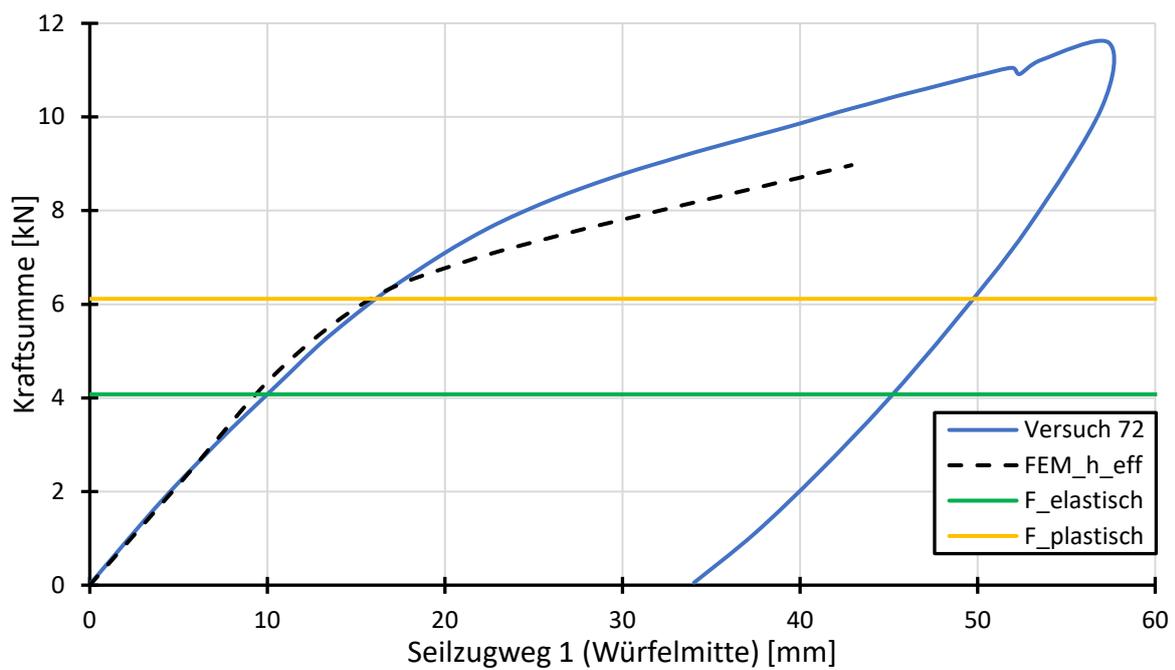


Abbildung A98: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 72

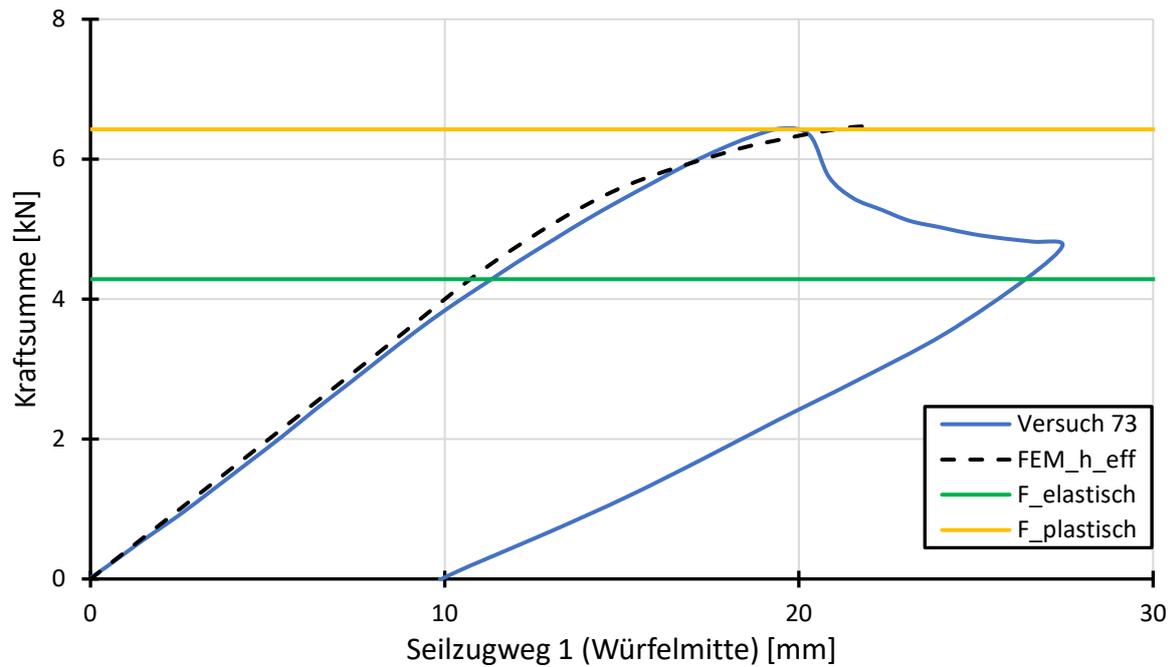


Abbildung A99: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 73

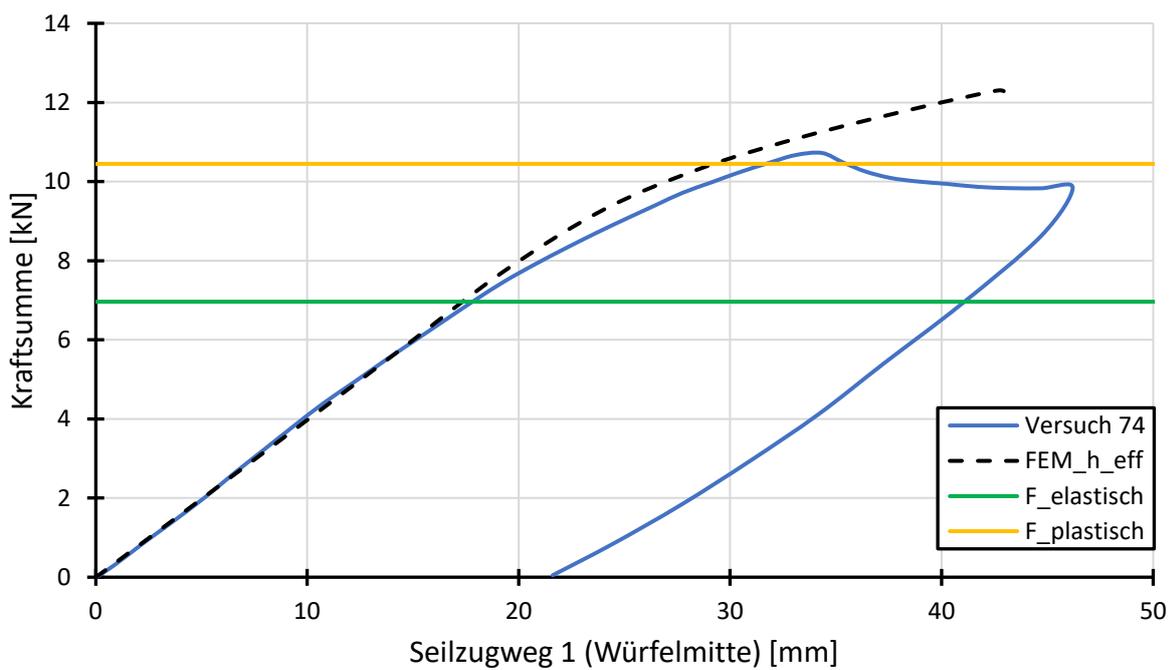


Abbildung A100: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 74

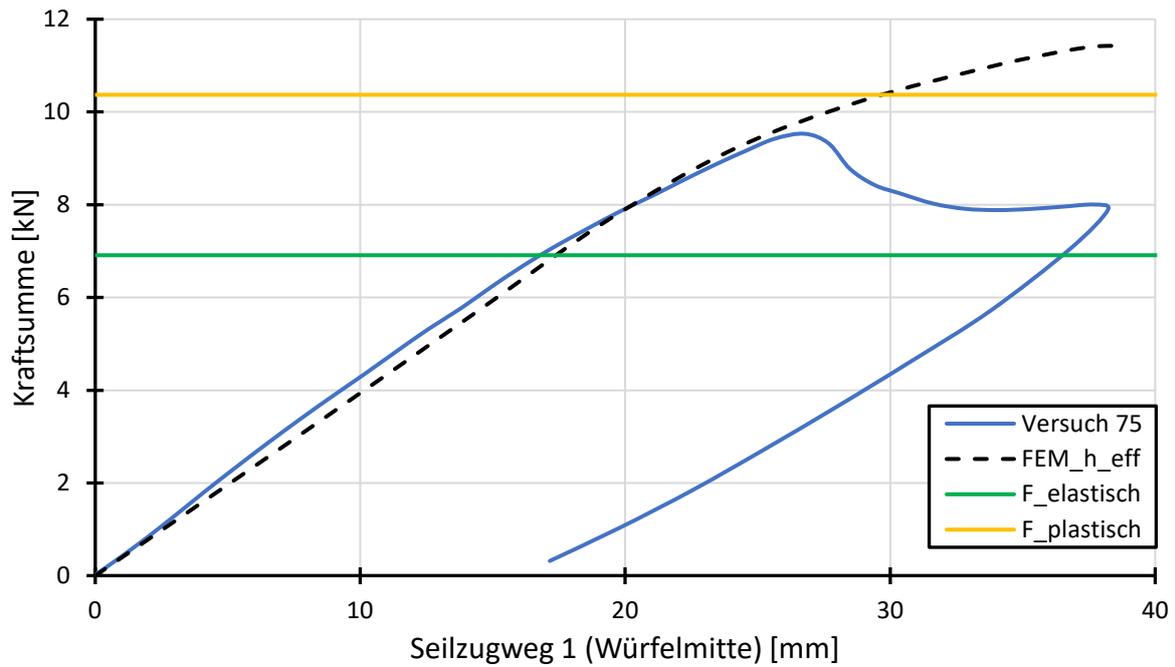


Abbildung A101: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 75

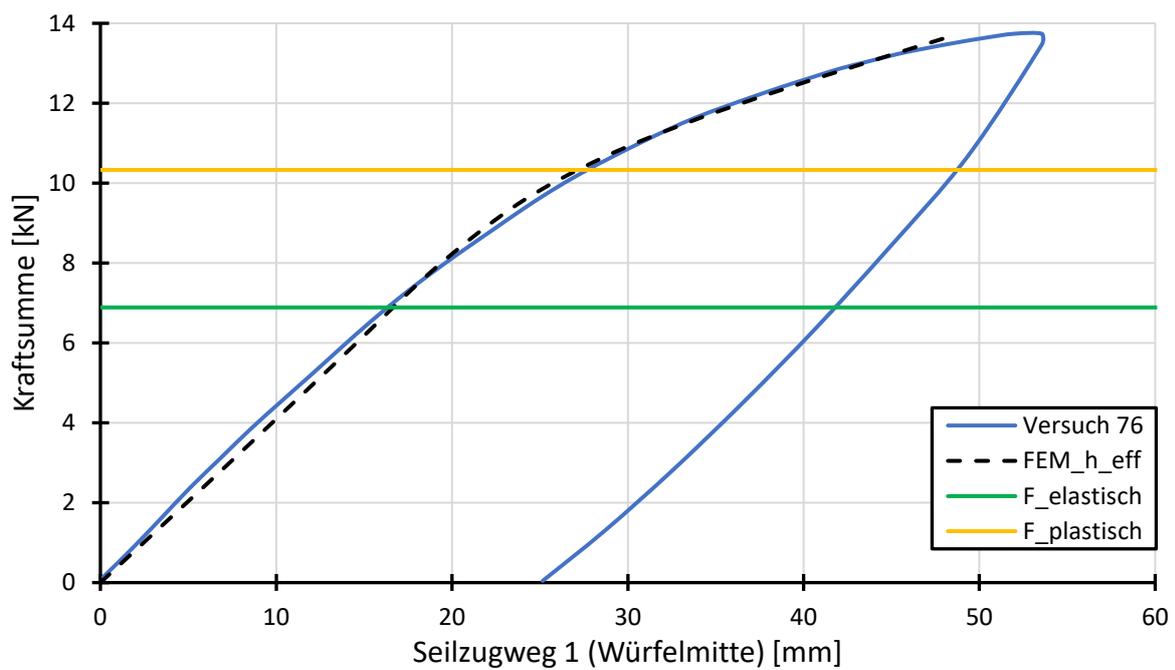


Abbildung A102: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 76

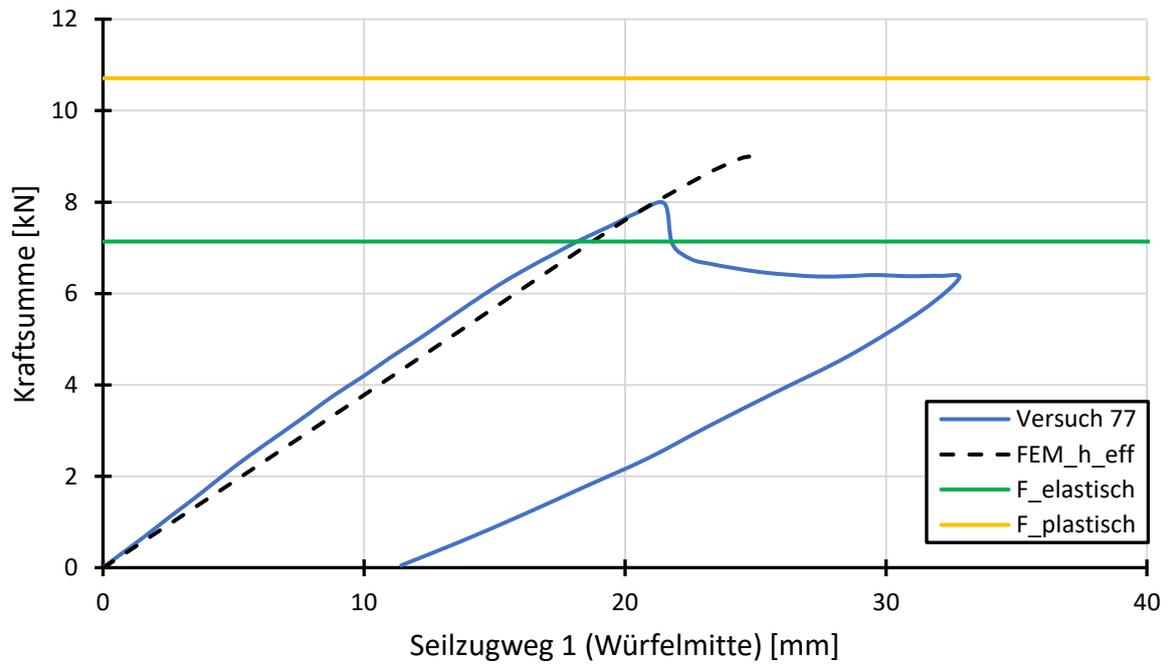


Abbildung A103: Experimentelle und numerische Ergebnisse mit Tragfähigkeiten Probekörper 77

A.7 Vergleich der mittragenden Stäbe m infolge Spannungsansatz

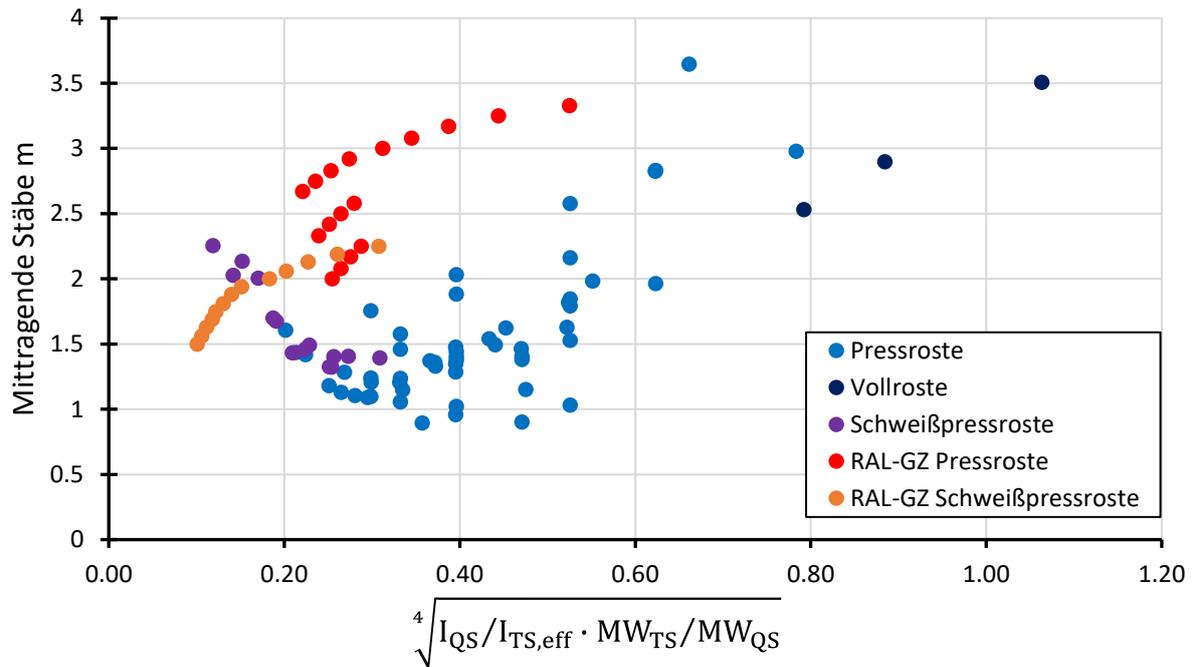


Abbildung A104: Mittragende Stäbe der unterschiedlichen Gitterrosttypen infolge Spannungsansatz

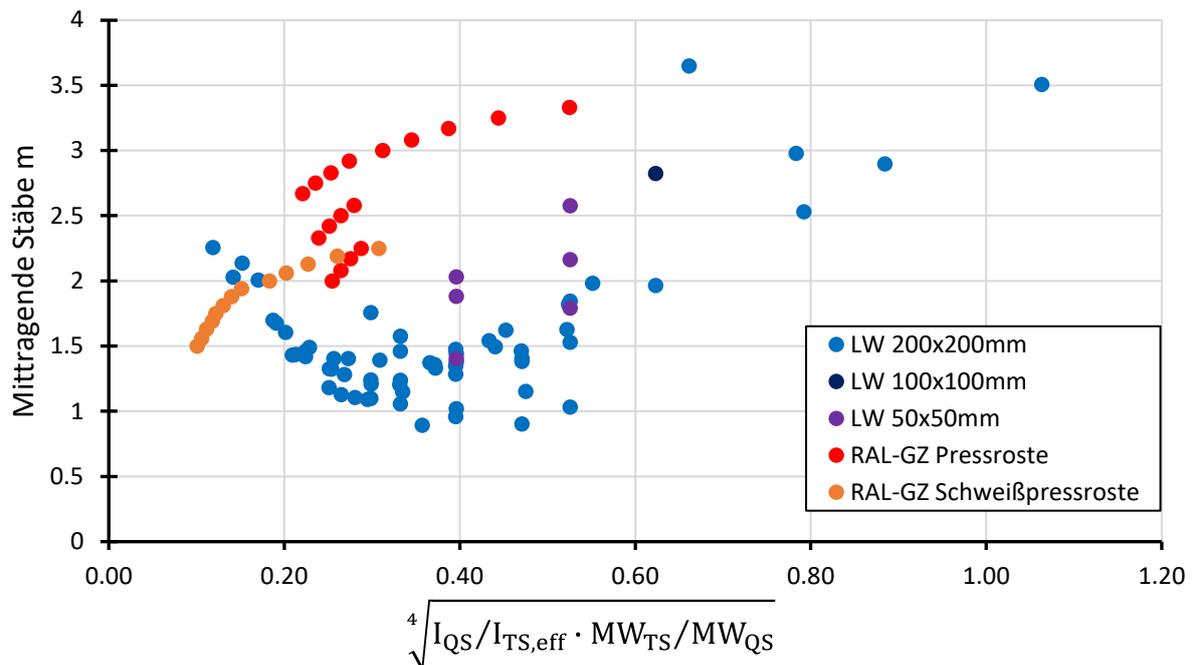


Abbildung A105: Mittragende Stäbe durch unterschiedlichen Lastwürfel infolge Spannungsansatz

A.8 Graphische Darstellung der Ergebnisse zu den Parameterstudien

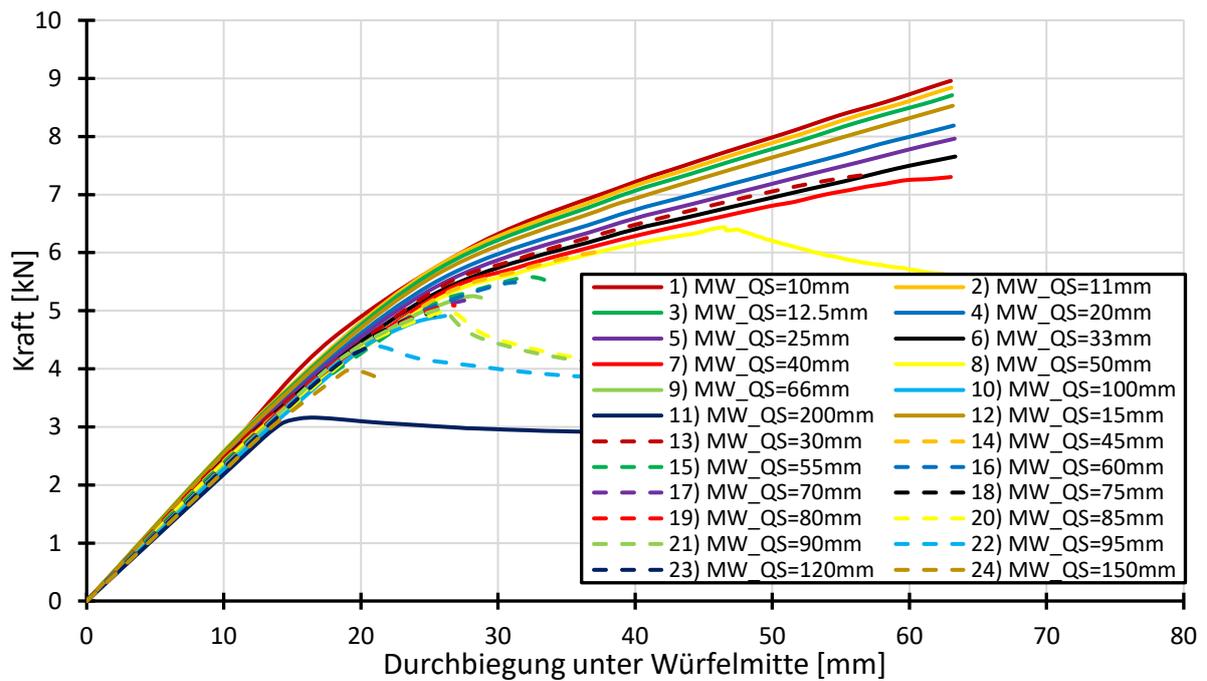


Abbildung A106: Last-Verformungs-Diagramm zur dritten Parameterstudie

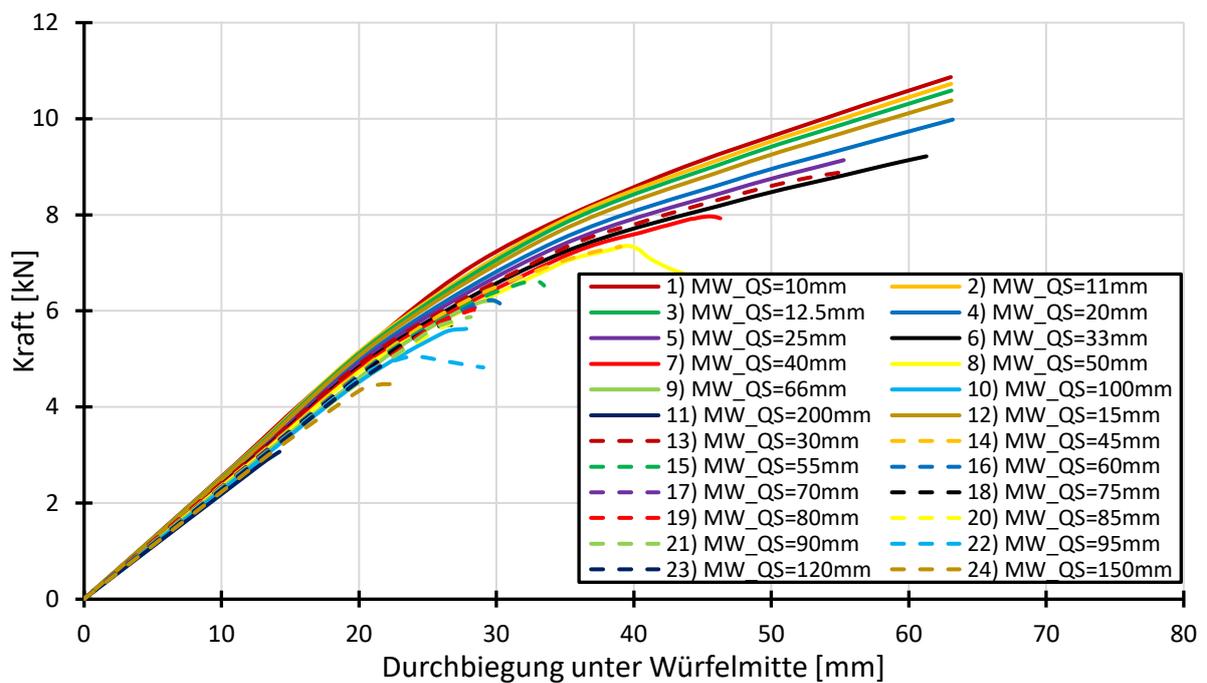


Abbildung A107: Last-Verformungs-Diagramm zur vierten Parameterstudie

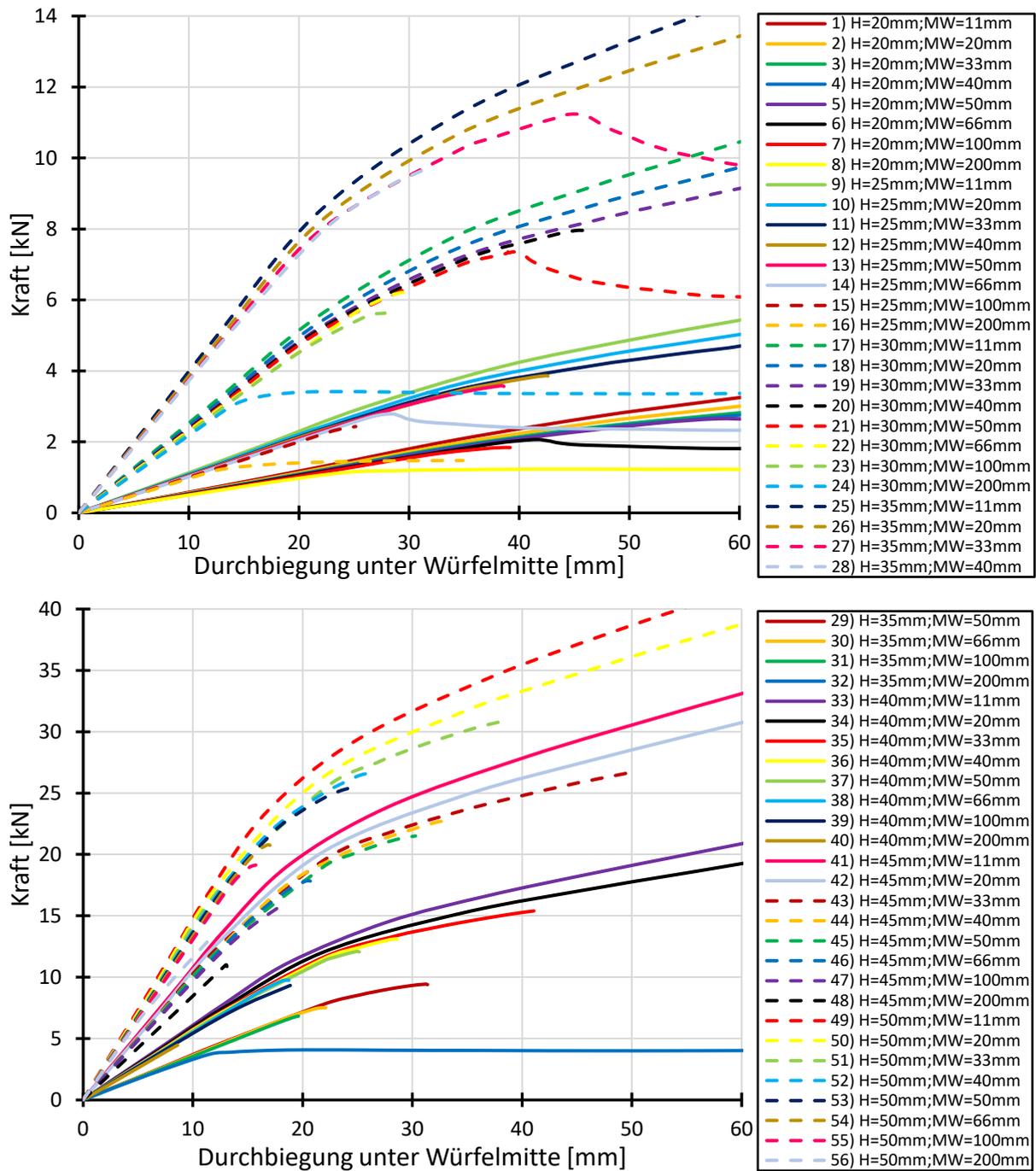


Abbildung A108: Last-Verformungs-Diagramme zur sechsten Parameterstudie

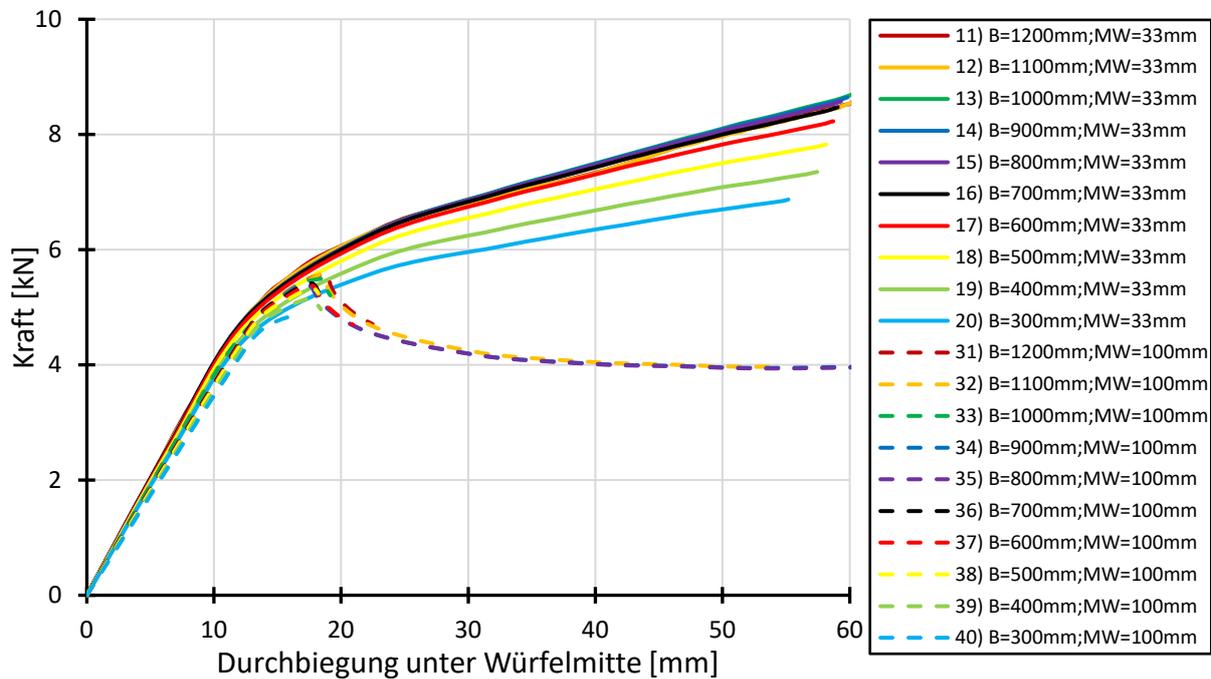
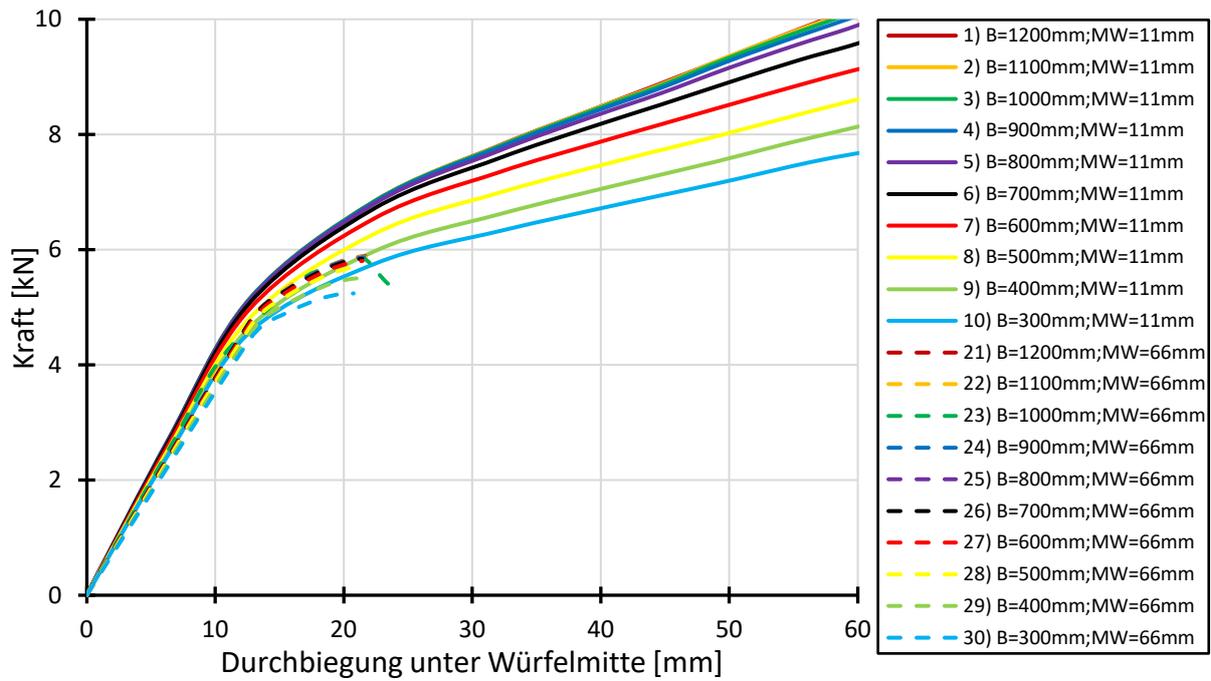


Abbildung A109: Last-Verformungs-Diagramme zur achten Parameterstudie

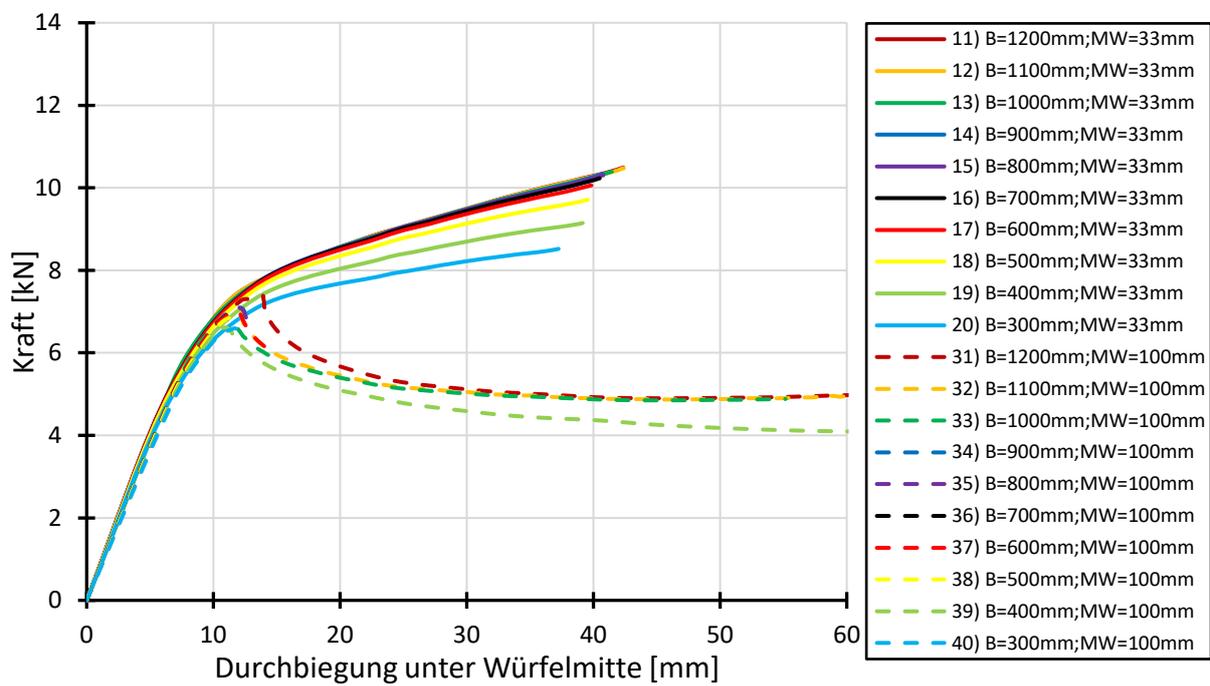
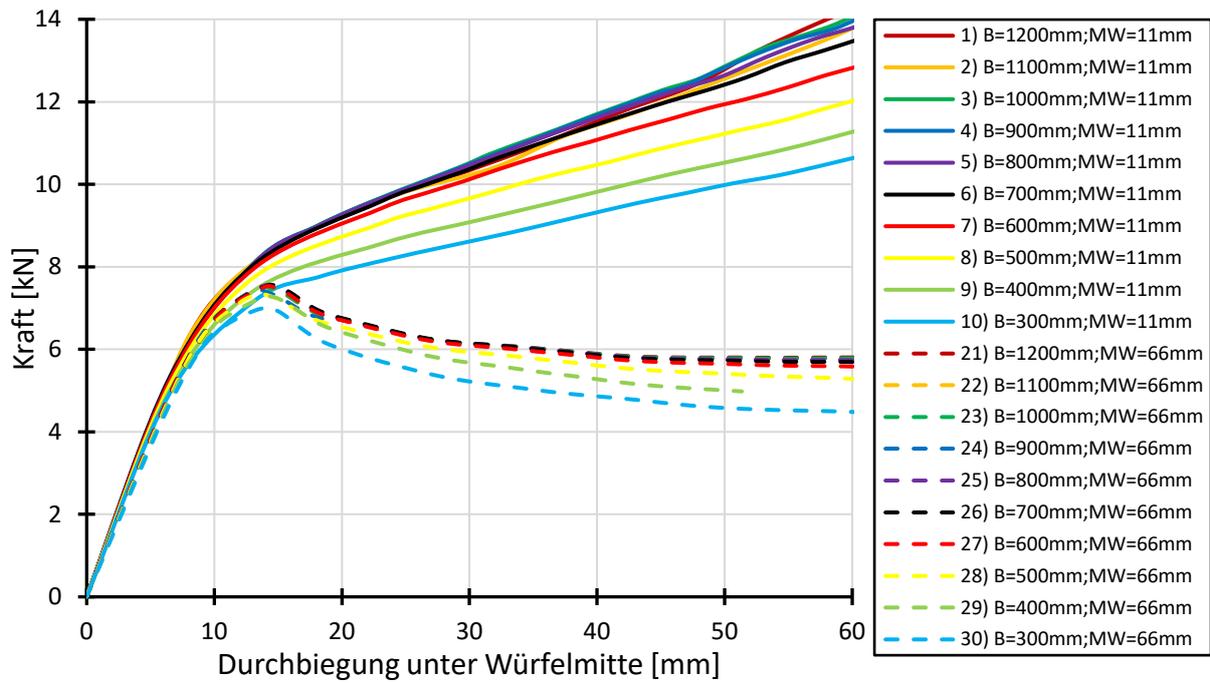


Abbildung A110: Last-Verformungs-Diagramme zur neunten Parameterstudie

Eidesstattliche Versicherung

Name, Vorname

Matrikelnummer

Ich versichere hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit mit dem Titel

selbständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Für den Fall, dass die Arbeit zusätzlich auf einem Datenträger eingereicht wird, erkläre ich, dass die schriftliche und die elektronische Form vollständig übereinstimmen. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Ort, Datum

Unterschrift

Belehrung:

§ 156 StGB: Falsche Versicherung an Eides Statt

Wer vor einer zur Abnahme einer Versicherung an Eides Statt zuständigen Behörde eine solche Versicherung falsch abgibt oder unter Berufung auf eine solche Versicherung falsch aussagt, wird mit Freiheitsstrafe bis zu drei Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

§ 161 StGB: Fahrlässiger Falscheid; fahrlässige falsche Versicherung an Eides Statt

(1) Wenn eine der in den §§ 154 bis 156 bezeichneten Handlungen aus Fahrlässigkeit begangen worden ist, so tritt Freiheitsstrafe bis zu einem Jahr oder Geldstrafe ein.

(2) Straflosigkeit tritt ein, wenn der Täter die falsche Angabe rechtzeitig berichtigt. Die Vorschriften des § 158 Abs. 2 und 3 gelten entsprechend.

Die vorstehende Belehrung habe ich zur Kenntnis genommen:

Ort, Datum

Unterschrift
