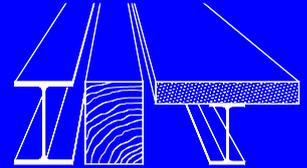


Universität Stuttgart  
Institut für Konstruktion und Entwurf  
Stahl-, Holz- und Verbundbau



# **Zuverlässigkeit von geschraubten Stahlverbindungen in Deutschland**

**Laura-Catrina Neugebauer**

**Masterarbeit**





## Zuverlässigkeit von geschraubten Stahlverbindungen in Deutschland

Geschraubte Verbindungen sind im Stahlbau von großer Bedeutung und werden zahlreich eingesetzt. Aus aktuellen Forschungsergebnissen wurden neue Bemessungsvorschläge für geschraubte Stahlverbindungen vorgeschlagen, die im Rahmen dieser Arbeit zu evaluieren sind.

In Deutschland legt der Eurocode DIN EN 1990 + NA die Zuverlässigkeit für Konstruktionen fest. Aufgrund stetiger Weiterentwicklungen sollen dazu neue Untersuchungen durchgeführt werden. Der Fokus dieser Masterarbeit liegt auf der Zuverlässigkeit geschraubter Stahlverbindungen in Deutschland liegen.

Dazu sind folgende Punkte zu bearbeiten:

- Literaturrecherche zu den Sicherheitsanforderungen sowie deren statistische Methoden für bauliche Anlagen in Deutschland auf Grundlage des Eurocode DIN EN 1990 + NA
- Untersuchung und Evaluation von aktuellen Forschungsergebnissen zu geschraubten Stahlverbindungen aus der Literatur
- Vergleich des neuen Entwurfs „prEN1993-1-8“ hinsichtlich Schraubenverbindungen mit den aktuell gültigen Bemessungsregeln
- Parameterstudie und Bewertung des Sicherheitsniveaus für geschraubte Stahlverbindungen in Deutschland

## Masterarbeit



## Stahlbau





## Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit "Zuverlässigkeit von geschraubten Stahlverbindungen" selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und bei der Erstellung dieser Arbeit die einschlägigen Bestimmungen, insbesondere zum Urheberrechtsschutz fremder Beiträge, eingehalten habe. Es wurden nur die in der Arbeit angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt.

Soweit meine Arbeit wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen (z. B. Bilder, Zeichnungen, Textpassagen) enthält, erkläre ich, dass diese Beiträge als solche unter Angabe der Quellen an der betreffenden Stelle gekennzeichnet sind (z. B. Zitat, Quellenangabe) und ich eventuell erforderlich gewordene Zustimmungen der Urheber zur Nutzung dieser Beiträge in meiner Arbeit eingeholt habe.

Stuttgart, den 24.05.2022

---

Laura-Catrina Neugebauer



## Bewertung

Die vorliegende Arbeit wurde mit der folgenden Note bewertet:

\_\_\_\_\_  
Note

Stuttgart, den 01.06.2022

Institutsstempel

\_\_\_\_\_  
Unterschrift Institutsleitung



## **Haftungsausschluss**

Obwohl die Arbeit nach bestem Wissen und Gewissen erstellt wurde, übernimmt weder die Verfasserin dieser Arbeit noch die Universität Stuttgart bzw. das Institut für Konstruktion und Entwurf Haftung für den Inhalt der Arbeit. Sollte direkt durch Nutzung oder indirekt infolge der Nutzung von Ergebnissen oder Teilergebnissen der Arbeit ein Schaden entstehen, ist jeglicher Schadensersatzanspruch ausgeschlossen. Mit der Verwendung von Ergebnissen aus dieser Arbeit gilt dieser Haftungsausschluss als akzeptiert.

## **Veröffentlichung oder Verbreitung der Arbeit**

Weder die Verfasserin dieser Arbeit noch die Universität Stuttgart bzw. das Institut für Konstruktion und Entwurf wird die Arbeit ohne schriftliche Zustimmung des Instituts für Konstruktion und Entwurf bzw. der Verfasserin veröffentlichen. Insbesondere, aber nicht ausschließlich, sind hiermit kommerzielle Zwecke und eine anderweitige Veröffentlichung oder Verbreitung in digitaler oder gedruckter Fassung gemeint. Die Weitergabe im privaten Rahmen oder zu Bewerbungszwecken der Verfasserin ist von dieser Regelung nicht betroffen. Bei Arbeiten, die in Zusammenarbeit mit Dritten entstanden sind, ist auch die Weitergabe an diese von dieser Regelung nicht betroffen.



## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit ist in Zusammenarbeit mit dem Institut für Konstruktion und Entwurf an der Universität Stuttgart entstanden.

Bedanken möchte ich mich bei Frau Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann, Leiterin des Instituts für Konstruktion und Entwurf an der Universität Stuttgart, die mir ermöglicht hat, meine Masterarbeit am Institut für Konstruktion und Entwurf zu schreiben.

Ein besonderes Dankeschön gilt Mareike von Arnim, Mitarbeiterin am Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart, die mich in zahlreichen Videokonferenzen stets fachlich und persönlich bei meiner Masterarbeit unterstützt hat und über die gesamte Bearbeitungszeit hinweg betreut hat.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie und Freunden bedanken, die sich viel Zeit für die Korrektur meiner Arbeit genommen haben und mich während der Masterarbeit auch persönlich sehr unterstützt haben.



## Kurzfassung

In Deutschland wird die Sicherheit von Bauwerken durch die Regelungen im sogenannten Eurocode gewährleistet. Dieser Eurocodes besteht aus zehn Normenreihen, in denen zum einen Regelungen für die Berechnung von Tragwerken festgehalten sind und zum anderen Angaben zu der Anwendung von einzelnen Materialien und deren jeweilige Bemessungsnachweise. In dieser Arbeit wird ein Augenmerk auf den Stahlbau, insbesondere auf die geschraubten Stahlverbindungen gelegt. Die Bemessung von geschraubten Anschlüssen wird durch die DIN EN 1993-1-8 geregelt. Im Rahmen von aktuellen Forschungsergebnissen wurde im Jahr 2021 ein neuer Bemessungsvorschlag für Stahlverbindungen in dem Entwurf prEN 1993-1-8 veröffentlicht.

Ziel dieser Arbeit war es die Zuverlässigkeit und Sicherheit des bisherigen Bemessungskonzeptes für geschraubte Stahlverbindungen aus der DIN EN 1993-1-8 und der prEN 1993-1-8 durch statistische Auswertungsverfahren zu verifizieren. Dabei wurde hauptsächlich der Nachweis auf Lochleibung an Stahlblechen untersucht. Es stellte sich heraus, dass die derzeit gültige Norm DIN EN 1993-1-8 als sicher und zuverlässig anzusehen ist. Jedoch hat die statistische Auswertung gezeigt, dass die tatsächlichen Lochleibungswiderstände durch das Bemessungskonzept stark unterschätzt werden. Die statistische Auswertung des Entwurfes prEN 1993-1-8 hat ergeben, dass dieser ebenfalls als sicher und zuverlässig anzusehen ist. Jedoch werden hier die Widerstände nicht unterschätzt, wodurch das Bemessungskonzept als sinnvoller angesehen werden kann.

Eine Parameterstudie an einer geschraubten Stahlverbindung hat gezeigt, dass bei dem Nachweis auf Lochleibung an einem Stahlblech, neben der Blechdicke und Zugfestigkeit des Stahls, hauptsächlich der Randabstand in Krafrichtung und der Lochabstand in Krafrichtung Einfluss auf den Widerstand haben. Es wurde bewiesen, dass der Randabstand und der Lochabstand quer zur Kraft keinen Einfluss auf den tatsächlichen Widerstand haben und die DIN EN 1993-1-8 den Lochleibungswiderstand durch den Einbezug dieser Parameter nur unwirtschaftlich verringert.



## **Abstract**

In Germany the safety of structures is guaranteed by the regulations in the so-called Eurocode. This Eurocode consists of ten series of standards which include regulations for the calculation of load-bearing structures and information on the application of individual materials and their respective design verifications. This work focuses on steel construction and in particular on bolted steel connections. The design of bolted connections is regulated by DIN EN 1993-1-8. In the context of current research results, a new design proposal for steel connections was published in the draft prEN 1993-1-8 in 2021.

The aim of this work was to verify the reliability and safety of the existing design concept for bolted steel connections from DIN EN 1993-1-8 and the draft prEN 1993-1-8 by means of statistical evaluation procedures. The main focus was on the verification of bearing resistance on steel plates. It turned out that the currently valid standard DIN EN 1993-1-8 can be regarded as safe and reliable. However, the statistical evaluation showed that the actual bearing resistance is greatly underestimated by the design concept. The statistical evaluation of the draft prEN 1993-1-8 has shown that it can also be regarded as safe and reliable, but here the resistances are not underestimated, and the design concept can be regarded as more reasonable.

A parameter study on a bolted steel connection has shown that, in addition to the plate thickness and tensile strength of the steel, the edge distance in the direction of the force and the hole spacing in the direction of the force mainly have an influence on the bearing resistance. It has been proven that the edge distance and the hole distance transverse to the force have no influence on the actual resistance and that DIN EN 1993-1-8 reduces the bearing resistance by including these parameters.



## Inhaltsverzeichnis

<b>Selbstständigkeitserklärung .....</b>	<b>I</b>
<b>Bewertung .....</b>	<b>II</b>
<b>Haftungsausschluss .....</b>	<b>III</b>
<b>Veröffentlichung oder Verbreitung der Arbeit.....</b>	<b>III</b>
<b>Danksagung.....</b>	<b>IV</b>
<b>Kurzfassung .....</b>	<b>V</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>VI</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation und Fragestellung .....	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise .....	2
<b>2 Grundlagen Sicherheitsanforderungen .....</b>	<b>3</b>
2.1 Die Entstehung und die Notwendigkeit des Eurocodes .....	3
2.2 Sicherheit und Zuverlässigkeit in der Baupraxis .....	5
2.2.1 Statistische Methoden .....	6
2.2.2 Sicherheitsniveau in der DIN EN 1990 [15] .....	17
2.2.3 Sicherheitsniveau von Stahlbauten.....	21
<b>3 Berechnungsgrundlagen für geschraubte Stahlverbindungen .....</b>	<b>24</b>
3.1 Aktuell gültige Bemessungskonzepte nach DIN EN 1993-1-8 [18].....	25
3.1.1 Abscheren .....	26
3.1.2 Lochleibung .....	27
3.1.3 Zug.....	31
3.1.4 Durchstanzen .....	32
3.1.5 Kombination von Scher-/Lochleibung und Zug.....	33
3.1.6 Blockversagen von Schraubengruppen.....	34
3.1.7 Sonderfälle .....	35
3.2 Neue Bemessungskonzepte nach prEN 1993-1-8 [13].....	37
3.2.1 Abscheren .....	38
3.2.2 Lochleibung.....	39
3.2.3 Zug und Durchstanzen .....	42
3.2.4 Kombination von Scher-/Lochleibung und Zug.....	42
3.2.5 Blockversagen von Schraubengruppen.....	42
3.3 Vergleich Bemessungskonzepte .....	46
<b>4 Grundlagen der statistischen Auswertung.....</b>	<b>51</b>

4.1	<i>Auswerteverfahren nach DIN EN 1990, Anhang D [15]</i> .....	51
4.1.1	Schritt 1: Entwicklung einer Widerstandsfunktion .....	51
4.1.2	Schritt 2: Vergleich der experimentellen und theoretischen Werte.....	51
4.1.3	Schritt 3: Abschätzung der Mittelwertkorrektur $b$ .....	52
4.1.4	Schritt 4: Abschätzung des Variationskoeffizienten des Streumaßes $\delta$ .....	53
4.1.5	Schritt 5: Verträglichkeitsprüfung.....	54
4.1.6	Schritt 6: Bestimmung der Variationskoeffizienten der Basisvariablen.....	54
4.1.7	Schritt 7: Bestimmung des charakteristischen Wertes $r_k$ der Widerstandsfunktion .....	54
4.1.8	Schritt 8: Bestimmung des Bemessungswertes der Widerstandsfunktion .....	57
4.1.9	Schritt 9: Bestimmung eines Teilsicherheitsbeiwertes .....	58
4.1.10	Schritt 10: Korrigierter Teilsicherheitsfaktor .....	58
4.2	<i>Datengrundlage</i> .....	59
4.2.1	Theoretische Eingangsdaten .....	59
4.2.2	Experimentelle Eingangsdaten .....	64
<b>5</b>	<b>Statistische Auswertung der Berechnungsmethoden</b> .....	<b>66</b>
5.1	<i>Allgemeines</i> .....	66
5.2	<i>Auswertung Stahlgüte S235</i> .....	68
5.3	<i>Auswertung Stahlgüte S275</i> .....	77
5.4	<i>Auswertung Stahlgüte S355</i> .....	81
5.5	<i>Auswertung Stahlgüte S460</i> .....	86
5.6	<i>Auswertung Stahlgüte S550</i> .....	88
5.7	<i>Auswertung Stahlgüte S690</i> .....	91
5.8	<i>Auswertung gesamte Versuchsergebnisse</i> .....	94
5.9	<i>Zusammenfassung</i> .....	97
<b>6</b>	<b>Parameterstudie am Beispiel eines Schraubenschlusses</b> .....	<b>101</b>
6.1	<i>System</i> .....	101
6.2	<i>Bemessung nach DIN EN 1993-1-8 [18]</i> .....	104
6.3	<i>Bemessung nach prEN 1993-1-8 [13]</i> .....	109
6.4	<i>Lochleibungsverformungen</i> .....	114
6.5	<i>Auswertung und Evaluation der Parameterstudie</i> .....	120
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>128</b>
<b>8</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>131</b>
<b>9</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>135</b>
<b>10</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>136</b>
<b>11</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>138</b>
<b>12</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>140</b>

---

12.1	<i>Anhang 1</i> .....	141
12.2	<i>Anhang 2</i> .....	144
12.3	<i>Anhang 3</i> .....	154
12.4	<i>Anhang 4</i> .....	155
12.5	<i>Anhang 5</i> .....	159
12.6	<i>Anhang 6</i> .....	160
12.7	<i>Anhang 7</i> .....	161



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation und Fragestellung

Um die Sicherheit von Bauwerken gewährleisten zu können, gibt es seit hunderten von Jahren in jedem einzelnen Land gewisse Standards, die bei dem Bau von Tragwerken eingehalten werden. [24] Diese Regelungen wurden im Laufe der Zeit immer konkreter und detaillierter und es wurden sogenannte Normen erstellt, nach denen sich die Baubeteiligten richten sollten. Im Jahre 2012 wurden dann allgemein gültige Richtlinien veröffentlicht, die nicht nur für die einzelnen Länder, sondern europaweit bis heute gültig sind. Es handelt sich dabei um die sogenannten Eurocodes. In ihnen werden zum einen Regelungen für die Berechnung von Tragwerken angegeben, zum anderen aber auch detaillierte Angaben zu der Verwendung von einzelnen Materialien und deren jeweilige Bemessungsnachweise. [26]

Unter anderem beinhalten diese die Regelungen zu der Berechnung und Verwendung von Stahlbauten. Diese Richtlinien sind im Eurocode 3, bzw. der DIN EN 1993-1-1 [21] bis DIN EN 1993-6 [19] zu finden. Hier wird unter anderem zwischen allgemeinen Bemessungsregeln von Trägern und Stützen und Regelungen für Detailanschlüsse, wie z.B. den Verbindungen zwischen zwei Trägern unterschieden. [34]

Im Stahlbau werden Verbindungen zwischen Trägern oder Stützen entweder mit Schweißnähten oder mit Schrauben ermöglicht. Die geschraubten Verbindungen stellen dabei die wichtigste Verbindungsart dar, da sie eine einfache und leichte Montage einer Stahlstruktur ermöglichen. Die Art und Herangehensweise der Bemessung von diesen geschraubten Anschlüssen ist in der Norm DIN EN 1993-1-8 [18] festgehalten. [18]

Im Rahmen von aktuellen Forschungsergebnissen wurden jetzt neue Bemessungsvorschläge für diese Stahlverbindungen gemacht, welche in einem Entwurf für die Norm, der prEN 1993-1-8 [13] festgehalten wurden. Hier wurden alle Nachweise, die an einer geschraubten Verbindung geführt werden müssen, angepasst. Besonders der Lochleibungsnachweis wurde dabei stark verändert. [13]

Es stellen sich nun die folgenden Fragen: Warum wurde die Notwendigkeit gesehen, einen neuen Bemessungsvorschlag aufzustellen? Worin liegt der Unterschied zwischen dem Entwurf prEN 1993-1-8 [13] und der gültigen DIN EN 1993-1-8 [18]? Wie zuverlässig sind jeweils das bisher gültige Bemessungsverfahren für geschraubte Stahlverbindungen und der neue Bemessungsvorschlag im Hinblick auf den Lochleibungsnachweis? Welche von diesen beiden Methoden führt zu den realistischeren Ergebnissen? Wovon ist der Nachweis des Lochleibungswiderstandes abhängig?

## 1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel dieser Arbeit ist es, den gestellten Fragen auf den Grund zu gehen und zu untersuchen, wie zuverlässig geschraubte Stahlverbindungen sind.

Um dies zu erreichen, wird in den ersten Kapiteln erläutert, warum es überhaupt europaweite Normen gibt und welchen Umfang sie haben. Im Anschluss wird untersucht, inwieweit die Zuverlässigkeit von Tragkonstruktionen in diesen Normen geregelt sind und nach welchen Verfahren dafür gesorgt wird, dass Baukonstruktionen zuverlässig und sicher sind. Dabei wird zuerst auf die allgemeinen Regelungen für Baukonstruktionen verwiesen und im Anschluss werden die Regelungen bei Stahlkonstruktionen genauer betrachtet.

In dem nächsten Schritt werden dann die Berechnungsmethoden aus der jetzt gültigen Norm [18] und dem Bemessungsvorschlag [13] gegenübergestellt und es wird dargelegt, welche Nachweise jeweils für eine geschraubte Verbindung geführt werden müssen. Darauf folgt dann der Vergleich zwischen den beiden Methoden, bei dem sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede herausgearbeitet werden.

Die Hauptaufgabe dieser Arbeit liegt in der statistischen Auswertung von beiden Berechnungsmethoden, um herauszuarbeiten, wie sicher und zuverlässig die vorausgesagten Ergebnisse der beiden Methoden sind. Dabei wird sich hauptsächlich auf den Nachweis der Lochleibung beschränkt. Der Ablauf von statistischen Auswertungen ist ebenfalls im Eurocode, genauer gesagt in der DIN EN 1990, Anhang D [15], geregelt. Zum besseren Verständnis wird der Ablauf detailliert in dieser Arbeit beschrieben, sodass die Auswertung später nachvollzogen werden kann. Im Anschluss werden die Grundlagen für die statistische Auswertung dargelegt. Dies beinhaltet zum einen theoretische Eingangsdaten wie Nachweisformeln und Angaben zu Werkstoffeigenschaften. Zum anderen werden jedoch auch die experimentellen Eingangsdaten erläutert. Hierbei handelt es sich um Versuchsergebnisse zu Lochleibungsnachweisen, die in der Literatur zu finden sind.

Der nächste Schritt ist die tatsächliche statistische Auswertung der theoretischen und experimentellen Versuchsergebnisse. Dabei werden sowohl die theoretischen Ergebnisse nach der DIN EN 1993-1-8 [18] betrachtet als auch die Ergebnisse nach prEN 1993-1-8 [13]. Um die Ergebnisse besser zu gliedern, werden alle verwendeten Stahlgüten einzeln nacheinander ausgewertet, dabei wird zusätzlich zwischen der Verbindungsmittelanzahl differenziert. Anschließend erfolgt eine ganzheitliche Betrachtung aller Stahlgüten. Nachdem die Auswertungen durchgeführt wurden, werden diese in einer Zusammenfassung miteinander verglichen und evaluiert. Es wird herausgearbeitet, wie zuverlässig die beiden Berechnungsmethoden sind und welches Sicherheitsniveau bei den beiden Methoden erreicht wird.

Um genau zu verstehen, wie der Nachweis auf Lochleibungsversagen funktioniert und welche Auswirkungen die Geometrie von Anschlüssen auf den berechneten Widerstand hat, wird im letzten Schritt dieser Arbeit eine Parameterstudie erstellt. In dieser Studie werden die Rand- und Lochabstände in einem geschraubten Stahlanschluss nacheinander variiert, um so herauszuarbeiten, wie sich die Lochleibungswiderstände verhalten und welcher geometrische Parameter den größten Einfluss auf diesen Widerstand hat.

## 2 Grundlagen Sicherheitsanforderungen

Wie in der Einleitung angesprochen, soll das Ziel dieser Arbeit eine Bewertung des Sicherheitsniveaus von geschraubten Stahlverbindungen nach den Grundsätzen der deutschen Normung sein. Um eine solche Bewertung und Analyse durchführen zu können, müssen jedoch im Vorhinein einige Grundlagen erklärt und erläutert werden. In diesem Kapitel wird daher zum einen erläutert, worum es sich bei den Eurocodes handelt und warum sie eingeführt wurden. Zum anderen werden die herrschenden Sicherheitsanforderungen dargestellt, die im Eurocode und in der Baupraxis gefordert werden.

### 2.1 Die Entstehung und die Notwendigkeit des Eurocodes

Richtlinien und Ordnungen im Bauwesen gibt es schon seit mehreren hundert Jahren. Sie wurden früher innerhalb berufsständischer Organisationen und Zünften festgehalten und von Generation zu Generation weitergegeben. Als die Städte jedoch immer größer wurden, stiegen auch die Sicherheitsanforderungen, die an Gebäude gestellt wurden. Um den möglichen Gefahren aus den privaten Häuserbauten entgegenzuwirken, wurden im späten Mittelalter schon die ersten städtischen Verordnungen erlassen. [24]

Diese Verordnungen und Richtlinien haben sich im Laufe der Zeit immer weiterentwickelt und wurden nach und nach von jedem Land einzeln in eigenen Baunormen festgehalten. [57] Als schließlich im Jahre 1952 die Europäische Union in Kraft trat, sah man sich großen Herausforderungen ausgesetzt. [27]

Jedes Land besaß seine eigenen Regelungen und der internationale Austausch und Handel in der Bauwirtschaft stellte sich sehr problematisch dar, da es große Differenzen zwischen den einzelnen europäischen Mitgliedsstaaten gab. Um diese Konflikte zu beseitigen, startete die Europäische Kommission im Jahre 1975 ein Aktionsprogramm. [26] Ziel dieses Programmes war es, neben der Beseitigung der Differenzen allgemeine Bestimmungen für die technischen Regeln im Bereich der Lastannahmen und für die Bemessung von baulichen Anlagen aufzustellen. Es wurden Vornormen der sogenannten Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau entwickelt. In den Eurocodes sollten die Nachweise für die Anforderungen von mechanischen Festigkeiten und Standsicherheit sowie die Bemessung im Brandfall nach der Bauprodukt-Richtlinie geregelt werden. Zudem sollten sie als Vertragsgrundlage für Ingenieur- und Bauleistungen dienen und allgemeine Regelungen für Bauprodukte festhalten. [26] Es sollte demnach ein Regelwerk geschaffen werden, welches europaweit die gleichen Richtlinien und Normen in der Baubranche einführt.

Der nächste Schritt war dann ab dem Jahr 1997 die Überprüfung und Überführung der von der Europäischen Kommission erstellten Vornormen in die Europäischen Normen. Diese wurden zum 1. Juli 2012 in Deutschland und in allen anderen europäischen Mitgliedsstaaten bindend. [44, 26]

Zuständig für die Eurocodes sind heutzutage das CEN, *Comité Européen de Normalisation*, das Europäische Komitee für Normung. Jedes europäische Land führt neben dem Eurocode ebenfalls den jeweiligen nationalen Anhang, welcher die Anwendung der Regelungen in dem jeweiligen Land ermöglicht. [26]

Die Eurocodes werden in zehn Gruppen unterteilt. Sie bestehen insgesamt aus 58 Teilen der Normenreihen DIN EN 1990 [15] bis DIN EN 1999 [20] und den zugeordneten nationalen Anhängen. [8]

Die zehn Hauptgruppen und die zugehörige Norm, beginnend bei 0 und endend bei 9, können der Abbildung 2-1 entnommen werden.

EN 1991	Eurocode 1: <i>Einwirkungen auf Tragwerke.</i>
EN 1992	Eurocode 2: <i>Entwurf, Berechnung und Bemessung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken.</i>
EN 1993	Eurocode 3: <i>Entwurf, Berechnung und Bemessung von Stahltragwerken.</i>
EN 1994	Eurocode 4: <i>Entwurf, Berechnung und Bemessung von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton.</i>
EN 1995	Eurocode 5: <i>Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holztragwerken.</i>
EN 1996	Eurocode 6: <i>Entwurf, Berechnung und Bemessung von Tragwerken aus Mauerwerk.</i>
EN 1997	Eurocode 7: <i>Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik.</i>
EN 1998	Eurocode 8: <i>Auslegung von Bauwerken in Erdbebengebieten.</i>
EN 1999	Eurocode 9: <i>Entwurf, Berechnung und Bemessung von Tragwerken aus Aluminium.</i>

Abbildung 2-1: Normen des Eurocodes ([15], S. 10)

Diese Arbeit befasst sich, hauptsächlich mit dem Eurocode 0 also der DIN EN 1990 [15] und dem Eurocode 3 bzw. DIN EN 1993-1-1 [16] bis DIN EN 1993-6 [19].

Die DIN EN 1990 [15] beinhaltet „Prinzipien und Anforderungen zu Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit.“([10], S.10) In ihm werden zum Beispiel die Teilsicherheitsbeiwerte für die Bemessung in den unterschiedlichen Grenzzuständen festgehalten, und zwar sowohl auf der Einwirkungs- als auch auf der Widerstandsseite. Zudem regelt er die Grundsätze der Bemessungen. Er dient daher als Grundlage für die Eurocodes 1 bis 9 und ist für die Verwendung bei Entwürfen, Berechnungen und Bemessungen mit den jeweiligen Eurocodes vorgesehen. [10]

Mit der DIN EN 1990 [15] wird dementsprechend das Sicherheitskonzept in der Baupraxis geregelt, durch das die Sicherheit von Menschen und Sachgütern gewährleistet werden soll. [6]

Die DIN EN 1993-1-1 [16] bis DIN EN 1993-6 [19] beinhaltet die Regelungen im Stahlbau. Zum einen enthalten sie die allgemeinen Regelungen für die Bemessung von Stahlbauten. Zum anderen enthalten sie Konstruktionsregeln und Bemessungsvorschriften für einzelne Bauwerkstypen. [34] Der genaue Aufbau kann Kapitel 3.1 dieser Arbeit entnommen werden.

## 2.2 Sicherheit und Zuverlässigkeit in der Baupraxis

Das folgende Kapitel befasst sich mit den Sicherheitsanforderungen, die in der heutigen Baupraxis gültig sind. Im ersten Schritt soll bestimmt werden, was Sicherheit im Allgemeinen und im Bereich des Bauwesens überhaupt bedeutet.

Sicherheit ist im weiten Sinne nichts Greif- oder Messbares. Es handelt sich bei der Sicherheit um ein individuelles Verständnis, ein Gefühl der handelnden Menschen, das sich aus Hoffnungen und Ängsten an ihre Umwelt einstellt. [51]

Und obwohl sich das Gefühl von Sicherheit aus vielen subjektiven Faktoren zusammensetzt, gibt es ein gesellschaftliches Einverständnis, dass Bauwerke sicher sein sollen. Die Tragsicherheit wird meist unbewusst als selbstverständlich unterstellt. [51, 29]

Um diesen Anspruch und diesem Vertrauen gerecht zu werden, nutzt der konstruktive Ingenieurbau naturwissenschaftliche Erkenntnisse, um das Gefühl von Sicherheit durch messbaren und quantitativen Werten und Kategorien zu ersetzen. Es wurden Sicherheitsfaktoren und Versagenswahrscheinlichkeiten eingeführt, mit deren Hilfe die Sicherheit eines Tragwerks abgebildet werden sollte. [51]

Im Bauwesen wird unter Sicherheit verstanden, dass Menschen vor dem Versagen von Tragwerken geschützt werden sollen. Das Risiko von Personenschäden soll auf kleine und akzeptable Wahrscheinlichkeiten begrenzt bleiben. Das schließt die Sicherheit bei der Benutzung des Bauwerks, aber auch die Sicherheit von Dritten im Einflussbereich eines Bauwerks ein. [42]

Laut *Klingmüller* und *Bourgund* (1992) wird die Sicherheit eines Bauwerks wie folgt definiert: „Im eingeschränkten Sinne bedeutet Sicherheit die Fähigkeit eines Tragwerks, all jenen Einwirkungen sowie bestimmten vorgegebenen außergewöhnlichen Ereignissen zu widerstehen, denen es während der Errichtung und seiner vorgesehenen Nutzung standhalten soll [...] ( [51], S.12).“

Die Sicherheit eines Bauwerks ist somit gewährleistet, wenn die Beanspruchung, die das Tragwerk im Laufe seiner Benutzung erfährt, geringer ist als seine Beanspruchbarkeit bzw. sein Widerstand. [51]

Es muss also die Bemessung einer Tragkonstruktion mit der Wahrscheinlichkeitsrechnung verknüpft werden, um die Sicherheit im Bauwesen zu quantifizieren. [51] In der Beschreibung von technischen Produkten bzw. technischen Konstruktionen wird dann nicht mehr nur von Sicherheit, sondern auch von Zuverlässigkeit gesprochen. So wird angegeben, wie verlässlich eine Funktion in einem vorgegeben Zeitintervall von einer Konstruktion erfüllt wird. [5]

In den folgenden Kapiteln wird ausführlicher beschrieben, welche statistischen Modelle dem Eurocode unterliegen und wie der Sicherheitsgedanke und die Sicherheitsanforderungen an Tragwerke im Eurocode umgesetzt werden. Zudem wird auf das Sicherheitsniveau von Stahlbauten eingegangen.

### 2.2.1 Statistische Methoden

Wie bereits erläutert regelt die DIN EN 1990 [15] das Sicherheitskonzept in der Baupraxis. Dies beinhaltet neben den Grundsätzen der Berechnungen und Bemessungen auch die statistischen Methoden, die für die Ermittlung von Widerständen und Einwirkungen berücksichtigt werden müssen. Diese Ansätze können dem Anhang C aus dem Eurocode 0 entnommen werden. Um im Bauwesen hohe Sicherheiten zu gewährleisten, werden für Einwirkungen und Widerstände sogenannte Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsbeiwerte eingeführt. Die Einwirkungen werden mit ihnen multipliziert, um sie zu erhöhen und die Widerstände werden durch sie dividiert, um sie zu verringern. Für die Kalibrierung dieser Beiwerte werden verschiedene statistische Methoden verwendet. [15]

In diesem Kapitel werden die einzelnen statistischen Verfahren genauer erläutert.

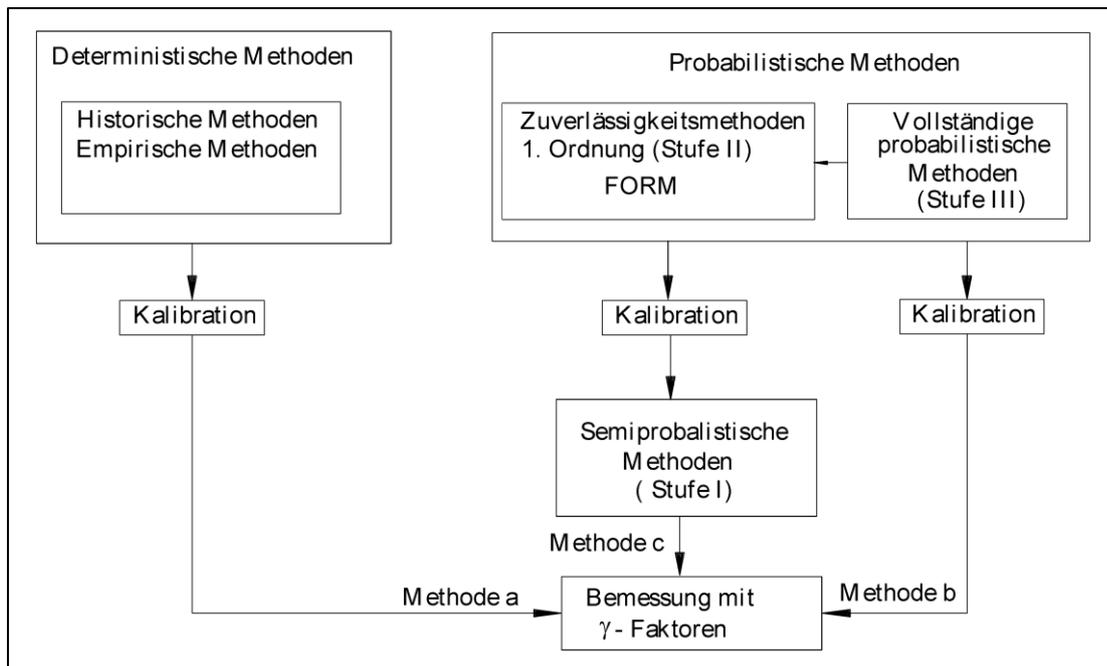


Abbildung 2-2: Überblick über statistische Methoden im Eurocode ([15], 87)

Die Abbildung 2-2 zeigt in einem Diagramm den Ablauf und die Zusammenhänge der einzelnen statistischen Methoden, die als Grundlage für die Kalibrierung und Erstellung der Bemessungsgleichungen und der Ermittlung der jeweiligen Teilsicherheitsbeiwerte, auch  $\gamma$ -Faktoren genannt, dienen. [15]

Bei den statistischen Verfahren wird zwischen den deterministischen und der probabilistischen Methoden unterschieden. Unter dem Begriff deterministisch versteht man, dass Methoden durch feste Vorbedingungen geregelt sind, sodass bereits festgelegte Ergebnisse immer wieder erreicht werden. Wohingegen man unter dem Begriff probabilistisch die Berücksichtigung von Wahrscheinlichkeiten versteht. [37]

Die deterministischen Methoden, auch laut Abbildung 2-2 als Methode a bezeichnet, sind die Verfahren, die auf den bisherigen Erfahrungswerten beruht. Zu ihnen gehören die his-

torischen und empirischen Methoden, also die Methoden, die durch Erfahrungen feste Vorbedingungen liefern. Sie stellt zum Großteil die Grundlage für die erste Fassung der Eurocodes dar. Die meisten Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte im Eurocode sind auf diese Weise entstanden.[10] Eine weitere Erläuterung hierzu kann dem Kapitel 2.2.1.1 entnommen werden.

Unter den probabilistischen Methoden sind die Methoden zu verstehen, die ausschließlich über Wahrscheinlichkeitsverfahren agieren. Sie geben genauere Auskünfte über die Zuverlässigkeit als die deterministischen Methoden. [10, 62]

Nach Abbildung 2-2 werden die probabilistischen Methoden in zwei Hauptgruppen unterteilt. Zum einen in die Zuverlässigkeitsmethoden und zum anderen in die vollständigen probabilistischen Methoden. Die reinen probabilistischen Methoden werden laut Abbildung 2-2 als Methode b bezeichnet. Sowohl die probabilistischen Methoden als auch die deterministischen Methoden dienen als Grundlage für die semiprobabilistischen Verfahren. Bei diesen werden deterministischen Sicherheitselemente, wie so genannte Teilsicherheitsbeiwerte, verwendet, die dann jedoch mit probabilistischen Methoden bestimmt werden. Die semiprobabilistischen Methoden werden auch als Methode c bezeichnet. Alle drei Methoden führen zu der Ermittlung der Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte. Diese werden für Einwirkungen oder Materialfestigkeiten in den aktuellen Eurocodes verwendet oder dienen lediglich als Grundlage für die alten, nicht mehr aktuellen Normen. [37]

In den folgenden Unterkapiteln werden das deterministische Sicherheitskonzept, das probabilistische Sicherheitskonzept sowie das semiprobabilistische Sicherheitskonzept genauer erläutert. Um sich mit den Methoden der Statistik genauer zu befassen, werden nun grundlegende Begriffe erklärt.

### Streuung

Streuungen sollen Informationen darüber geben, wie die Werte eines Datensatzes verteilt sind. Das bedeutet, ob sie konzentriert in einem Zahlenbereich liegen, oder breit gefächert sind. Zu Streuungsmaßen gehören die Standardabweichung und die Varianz. [63]

### Verteilung

Ein Wahrscheinlichkeitsraum, welcher angibt, wie eine Größe auf alle verfügbaren Werte verteilt ist, wird als Verteilung bezeichnet. Dabei wird oft von einem zweidimensionalen Raum mit Abszisse und Ordinate gesprochen. [63]

### Verteilungsfunktionen

Eine Verteilungsfunktion stellt die Funktion dar, welche aus den Werten der Ordinate über die Werte der Abszisse hinweg gebildet wird. [63]

### Mittelwert

Der Mittelwert  $\mu$ , auch arithmetisches Mittel genannt, wird nach [39] aus der Summe der jeweiligen Einzelwerte gebildet und durch die Anzahl  $n$  der Einzelwerte geteilt.

$$\mu = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^i x_i \quad (2.1)$$

### Varianz

Die Varianz stellt nach [63] die quadrierte Abweichung der Datenwerte von dem Mittelwert  $\mu$ , dividiert durch die Anzahl der Daten  $n$ , dar.

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n - 1} \quad (2.2)$$

Die Varianz stellt eine Abschätzung für die wahre Streuung dar. [39]

### Standartabweichung

Die Standartabweichung  $\sigma$  kann durch das Ziehen der Quadratwurzel der Varianz  $\sigma^2$  gebildet werden. Sie stellt den durchschnittlichen Abstand der Werte zum Mittelwert dar. Das bedeutet, je größer die Standartabweichung, desto größer ist die Streuung des jeweiligen Datensatzes. [63]

$$\sigma = \sqrt{\hat{\sigma}^2} \quad (2.3)$$

### Normalverteilung

Die Normalverteilung, auch Gauß-Verteilung oder Gauß'sche Glockenkurve genannt, stellt eine symmetrische Verteilung dar, die sich um den Mittelwert aufbaut. Sie stellt die häufigste Verteilung in der Statistik dar und kann durch den Mittelwert  $\mu$  und die Standartabweichung  $\sigma$  beschrieben werden. [63]

### Quantile

Der Quantilwert wird aus einer sortierten Datenreihe bestimmt und definiert einen bestimmten Bereich einer Datenmenge. Der Quantile legt fest, wie viele Datenwerte einer Verteilung unter oder über einer bestimmten Grenze liegen. Früher wurde für das Wort Quantile auch der Begriff Fraktile verwendet. [61, 39]

### Variationskoeffizienten

Der Variationskoeffizient  $V$  wird nach [39] z.B. als Maß verwendet, um die Streuungen zweier Verteilungen mit unterschiedlichen Mittelwerten zu vergleichen. Er wird dabei aus der Standardabweichung  $\sigma$  bezogen auf ihren Mittelwert  $\mu$  berechnet.

$$V = \frac{\sigma}{\mu} \quad (2.4)$$

### 2.2.1.1 Deterministisches Sicherheitskonzept

Bei dem deterministischen Sicherheitskonzept handelt es sich um eine Betrachtungsweise, bei der die Mittelwerte von Einwirkungen und den jeweiligen Widerständen unabhängig von statistischen Dichteverteilungen gegenübergestellt werden. [32] Einwirkungen und Widerstände werden als feste, nicht zu verändernde Größen erfasst. Streuungen und Standartabweichungen von Widerständen und Einwirkungen werden nicht weiter berücksichtigt. [7]

Je nachdem, welche Methode für die Zuverlässigkeitsanalyse gewählt wird, gibt es ein anderes Zuverlässigkeitsmaß. Dabei handelt es sich um Variablen mit deren Hilfe die Sicherheit in den Bemessungen des konstruktiven Ingenieurbaus gewährleistet werden soll. Bei dem deterministischen Sicherheitskonzept besteht das Zuverlässigkeitsmaß aus einem einzigen globalen Sicherheitsfaktor, bzw.  $\gamma$ -Faktor, der lediglich auf der Material- und somit Widerstandsseite angesetzt wird. Dieser ergibt sich aus den Unsicherheiten, die sich im Laufe der Jahre und aus den jeweiligen Erfahrungen haben ermitteln lassen. Das bedeutet, es hat sich mit der Zeit gezeigt, dass gewisse Beiwerte eine ausreichend hohe Sicherheit darstellen.[48]

Die Einwirkungen und die Widerstände besitzen bei diesem Zuverlässigkeitsmaß keine separaten Teilsicherheitsbeiwerte. Zudem werden für die Einwirkungen keine Sicherheiten angegeben bzw. ermittelt. Die globalen Sicherheitsfaktoren werden lediglich materialspezifisch differenziert. So liegt zum Beispiel der globale Sicherheitsfaktor von Stahl bei 1,75, wohingegen der Sicherheitsfaktor von Beton bei 3,0 liegt. Die jeweiligen Einwirkungen spielen dabei keine Rolle, es wurde dabei nur die jeweilige Streubreite von Festigkeiten betrachtet, die bei Beton deutlich höher waren als beim Stahl. [29]

Bei der Berechnung von Tragstrukturen wird die Materialfestigkeit oder -eigenschaft eines Werkstoffes mit dem Sicherheitsfaktor dividiert und so verringert. Die Einwirkungen werden dem ohne Sicherheitsfaktor gegenübergestellt. [48]

Die Vorteile dieses Sicherheitskonzeptes liegen besonders in der einfachen Anwendung. Es gibt normativ geregelte Grenzwerte für die Widerstände und es sind keine zusätzlichen Sicherheitsüberlegungen bzgl. Material und Einwirkungen notwendig. Zudem haben sich diese Werte über Jahrzehnte bewährt. [7]

Die Nachteile liegen hingegen in der Ungenauigkeit. Es gibt keine Möglichkeiten, das tatsächliche Zuverlässigkeit einer Tragkonstruktion zu quantifizieren. Genauso wenig lässt sich eine Aussage über die Versagenswahrscheinlichkeit einer Konstruktion treffen. Zudem kann kein Vergleich auf Sicherheitsebene für neu entwickelte Baustoffe und Materialien getroffen werden. Für neue Materialien kann mit diesem Konzept kein globaler Sicherheitsfaktor gebildet werden, da die Erfahrungswerte fehlen. [48]

### 2.2.1.2 Probabilistisches Sicherheitskonzept

Wie bereits im Kapitel 2.2.1 erläutert, befasst sich das probabilistische Sicherheitskonzept, im Gegensatz zu dem deterministischen Sicherheitskonzept, nicht mit den Erfahrungswerten aus der Vergangenheit. Es handelt sich um rein mathematische Methoden, welche die Wahrscheinlichkeitstheorie als Grundlage benutzen. [62]

Die Eingangswerte für eine Bemessung werden mit ihren jeweiligen statistischen Eigenschaften dargestellt. Das beinhaltet zum einen den Mittelwert, aber auch die Standardabweichung, den abgeleiteten Variationskoeffizienten und die Verteilfunktion der zu betrachtenden Größe. Die Werte werden nicht als feste Variablen betrachtet. Dies schließt sowohl die Einwirkungen als auch die Materialien ein. [45]

Bei den probabilistischen Sicherheitskonzepten muss, wie in Abbildung 2-2 abzulesen, zwischen den Zuverlässigkeitsmethoden 1. Ordnung und den vollständig probabilistischen Methoden unterschieden werden.

Die Zuverlässigkeitsmethoden 1. Ordnung, auch Stufe II nach Abbildung 2-2 genannt, sind probabilistische Näherungen. Diese Methode wird auch mit FORM, *First Order Reliability Method*, abgekürzt. Sie beruht auf einigen Vereinfachungen, führt jedoch meist zu genauen Ergebnissen. Mit dieser Methode werden der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  und die operative Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  bestimmt. [39, 9] Diese beiden Variablen liefern die Grundlage für die Bestimmung von Sicherheitselementen und sie gelten bei dem probabilistischen Sicherheitskonzept als Zuverlässigkeitsmaße. Der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  wird im Folgenden anhand von Grafiken genauer erläutert. [37, 48]

Die Variablen  $\beta$  und  $P_f$  werden für die endgültige Bestimmung der Sicherheitsfaktoren, auch  $\gamma$ -Faktoren, verwendet. [30]

Der Sicherheitsindex  $\beta$  ist nach [48] und [9] wie folgt definiert:

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} = \frac{\mu_R - \mu_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} \quad (2.5)$$

$$g = R - E = 0 \quad (2.6)$$

Die Gleichung 2.6 stellt mit R als Widerstand und E für die Einwirkungen die Grenzzustandsgleichung des Sicherheitskonzeptes dar. Also die Gleichung, nach der die Berechnungen im konstruktiven Ingenieurbau ablaufen. Der Zuverlässigkeits-, oder auch Sicherheitsindex  $\beta$  ist laut Gleichung 2.5 als das Verhältnis zwischen den Mittelwerten  $\mu$  und den Varianzen  $\delta^2$ , bzw. den Standardabweichungen  $\sigma$  definiert. Die Werte für  $\beta$  können dabei z.B. zwischen Eins und Fünf liegen. [9, 15]

Die Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der während eines festgelegten Zeitraums ein Grenzzustand überschritten wird und es zu einem Versagen kommt. [45] Sie wird nach [15] wie folgt definiert:

$$P_f = \phi * (-\beta) \quad (2.7)$$

Wobei  $\phi$  die Verteilungsfunktion für die standardisierte Normalverteilung darstellt. Hierbei könnte es sich z.B. um eine Gauß'sche Glockenkurve handeln. [15] Dem Sicherheitsindex

$\beta$  kann nach Gleichung 2.7 demnach eine Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  zugeordnet werden. Der Wert  $P_f$  kann dabei z.B. Werte von 0,1 bis  $1 \cdot 10^{-7}$  annehmen. [45]

Sowohl der Widerstand  $R$  als auch die Einwirkungen  $E$  können hier nicht als feste Variablen betrachtet werden. Beide Basisgrößen werden als Verteilungen abgebildet, die als stochastisch unabhängig voneinander gelten und nicht mathematisch begrenzt werden.[28] Das Zusammenspiel von Einwirkung und Widerstand im probabilistischen Sicherheitskonzept kann der folgenden Abbildung 2-3 entnommen werden.

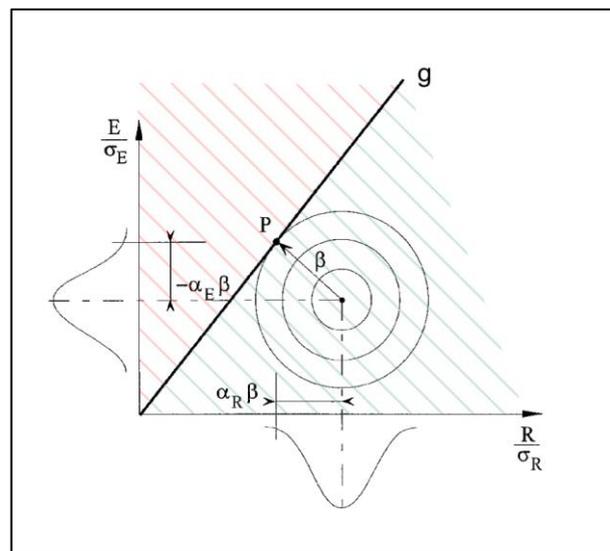


Abbildung 2-3: Zusammenspiel nach der Zuverlässigkeitsmethode 1. Ordnung (in Anlehnung an [15], S.90)

Auf der Abszisse ist in der Grafik das Verhältnis zwischen dem Widerstand  $R$  und der Standardabweichung des Widerstandes  $\sigma_R$  dargestellt und auf der Ordinate das Verhältnis zwischen der Einwirkung  $E$  und der Standardabweichung  $\sigma_E$ . Beide Verteilungen werden beispielhaft durch eine Gauß'sche Glockenkurve abgebildet. Diese wurde in Gleichung 2.7 auch als  $\phi$  bezeichnet. Die Mittelwerte der beiden Verteilungsfunktionen wurden verbunden und treffen sich in dem eingezeichneten Mittelpunkt der Kreise. Die Kreise stellen die unterschiedlichen Werte für den Sicherheitsindex  $\beta$  dar. Die Funktion  $g$  stellt die Grenzzustandsfunktion dar und der Punkt  $P$  ist der Bemessungspunkt. In Rot sind der Bereich des Versagens und in Grün der sichere Bereich markiert. [15]

Der Sicherheitsindex  $\beta$  gibt nach Abbildung 2-3 den kürzesten Abstand zwischen den Mittelwerten der Verteilungsfunktionen und der Grenzzustandsfunktion an.

Die Grenzzustandsfunktion bildet die Grenze zwischen dem sogenannten Versagensbereich und dem Überlebensbereich. Versagen tritt ein, wenn man sich oberhalb der Funktion  $g$  im roten Bereich bewegt. Die bereits definierte Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  ist demnach ebenfalls oberhalb der Grenzzustandsfunktion einzuordnen. Je kleiner der Sicherheitsindex  $\beta$  wird, desto größer wird die Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  und umgekehrt. [45]

Diese unterschiedlichen Bereiche neben der Grenzzustandsfunktion werden ebenfalls in Abbildung 2-4 verdeutlicht.

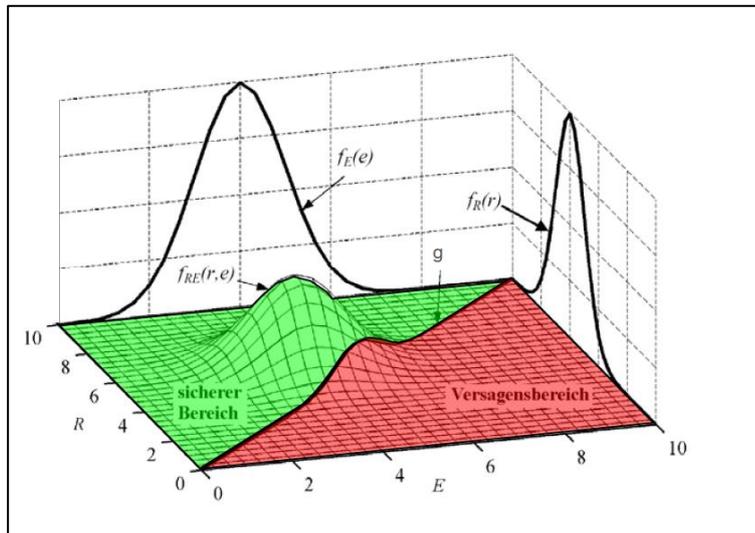


Abbildung 2-4: Dreidimensionale Darstellung der Verteilungsfunktionen (in Anlehnung an [2], S.19)

In der Grafik sind in einem dreidimensionalen Raum erneut die Verteilungsfunktionen der Einwirkungen  $f_E(e)$  und der Widerstände  $f_R(r)$  dargestellt. Mit der Funktion  $f_{RE}(r,e)$  wurden die beiden Verteilungsfunktionen in den dreidimensionalen Raum projiziert. Zwischen den Funktionen ist die Grenzzustandsgleichung  $g$  nach Gleichung 2.6 dieser Arbeit eingezeichnet. Der grün schraffierte Bereich, links oberhalb der Grenzzustandsfunktion ist als sicherer Bereich bezeichnet, der rot schraffierte Bereich rechts unter der Funktion als Versagensbereich. [2]

Die Zuverlässigkeit  $P_s$  einer Struktur lässt sich im Umkehrschluss und nach [45] wie folgt abbilden:

$$P_s = 1 - P_f \quad (2.8)$$

In der Bemessungspraxis werden die Streuungen von Einwirkungen und Widerständen betrachtet. Dazu gehören sowohl direkte als auch indirekte Lasten, aber auch geometrische Größen und Materialeigenschaften. [51]

In der Abbildung 2-3 werden zudem Wichtungsfaktoren  $\alpha_i$  eingeführt. Der Wichtungsfaktor  $\alpha_E$  steht für die Einwirkungen und  $\alpha_R$  für die Widerstände. Sie werden auch als Sensitivitätsfaktor bezeichnet und nehmen grundsätzlich einen Wert zwischen  $-1 \leq \alpha_i \leq 1$  an. Generell gilt, dass je größer der Wichtungsfaktor ist, desto größer ist der Einfluss der jeweiligen Basisvariable auf das Zuverlässigkeitsproblem. [2]

Der Zusammenhang zwischen dem Sicherheitsindex  $\beta$ , der Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  und den Wichtungsfaktoren  $\alpha_E$  und  $\alpha_R$  kann zusätzlich der Abbildung 2-5 entnommen werden.

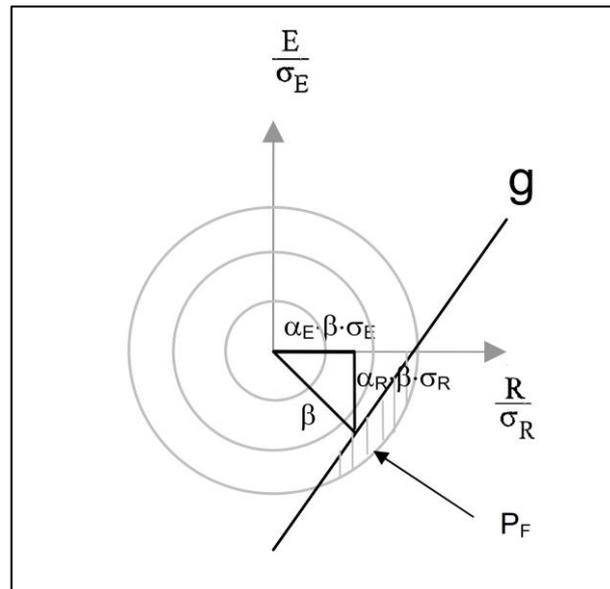


Abbildung 2-5: Zusammenhang des Sicherheitsindex und der Wichtungsfaktoren (in Anlehnung an [2], S. 51)

Durch die Wichtungsfaktoren  $\alpha_E$  und  $\alpha_R$  wird eine isolierte Betrachtung für die Einwirkungs- und Widerstandsseite ermöglicht. Die einzelnen Bemessungswerte für den Widerstand und die Einwirkungen hängen somit nur von ihrer jeweiligen Streuung, bzw. von dem Abstand zwischen den maximalen Werten bis zum Versagensbereich ab und sind nicht voneinander abhängig. [39]

Mit den Verfahren der Stufe II werden, durch die festgelegten  $\beta$ -Faktoren,  $\gamma$ -Faktoren ermittelt. [51] Die genaue Berechnung dieser Sicherheitsfaktoren kann dem Kapitel 2.2.2 dieser Arbeit entnommen werden.

Die zweite Hauptgruppe der probabilistischen Methoden stellen die vollständig probabilistischen Methoden dar. Sie werden nach Abbildung 2-2 als Stufe III betitelt und gelten als die Methoden, die die genauesten Auskünfte über Zuverlässigkeitsprobleme geben. [10] Bei diesen Methoden handelt es sich um wahrscheinlichkeitstheoretische Methoden mit wirklichkeitsnahen Überlegungen für die Verteilung der Basisvariablen von den Einwirkungen und den Widerständen und der Grenzzustandsgleichungen. Es wird ebenfalls die Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  berechnet. Unter Basisvariablen versteht man alle zu verwendenden Parameter, die für die Berechnung einer Tragstruktur notwendig sind. Bei Einwirkungen kann das z.B. der Winddruck sein und bei Widerständen z.B. die Materialfestigkeit. [39]

Diese Stufe-III-Verfahren werden besonders dann genutzt, wenn für Sondertragwerke genauere Untersuchungen notwendig werden. Da diese Methoden sehr exakte Ergebnisse liefern, können in der Theorie veränderliche Sicherheitsfaktoren für die Bemessung festgelegt werden. [51] Als Grundlage für die allgemeinen Bemessungsnormen werden sie jedoch selten verwendet, da oft statistische Daten fehlen. [10]

Die Vorteile der probabilistischen Sicherheitskonzepte liegt also in der Genauigkeit von Ergebnissen und darin, dass die Einwirkungs- und Widerstandsseiten separat voneinander betrachtet werden. Dies führt zu sehr wirtschaftlichen Tragkonstruktionen. [45, 51]

Der Nachteil des Konzepts liegt darin, dass eine ausreichend große Menge an statistischen Datensätzen vorliegen muss, damit eine eindeutige Aussage getroffen werden kann. Zudem ist der Aufwand einer solchen Methode sehr groß. In der Literatur wurden keine Beispiele für diese Verfahren für reale Problemstellungen in den Berechnungen von Tragkonstruktion gefunden. [10, 48]

### 2.2.1.3 Semi-probabilistisches Sicherheitskonzept

Bei dem semiprobabilistischen Sicherheitskonzept handelt es sich um eine Mischung aus deterministischen Annahmen und der probabilistischen Verteilungen. Es wird im Überblick der statistischen Methoden als Stufe-I-Verfahren bezeichnet. [37] In der Literatur wird dieses Sicherheitskonzept auch oft als Teilsicherheitskonzept bezeichnet. Dieses Konzept bildet die Grundlagen für die Berechnungen der Eurocodes. [45]

Die Basis der semiprobabilistischen Methoden bildet das probabilistische Sicherheitskonzept. Es ermittelt die Basisvariablen, die zur Bestimmung von Sicherheitselementen verwendet werden. Da oft jedoch keine ausreichend große Datenmenge zur stochastischen Beschreibung von z.B. Einwirkungen, zur Verfügung steht, werden auch deterministisch ermittelte Eingangswerte berücksichtigt. [29] Es werden deterministische Sicherheitselemente wie Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte verwendet, welche durch vereinfachte probabilistische Methoden, den Stufe-II-Verfahren, bestimmt werden. [39]

Aus dem probabilistischen Sicherheitskonzept fließen der Sicherheitsindex  $\beta$  und die Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  in das semiprobabilistische Sicherheitskonzept ein. Der Sicherheitsindex  $\beta$  wird durch die sogenannten Teilsicherheitsbeiwerte berücksichtigt, der mit Hilfe von diesen Kennwerten berechnet wird. Dabei wird  $\beta$  hinsichtlich des Bemessungszeitraums, des Grenzzustands und der Sicherheitsklasse eines Bauteils unterschieden. [45]

Bei den charakteristischen Basisvariablen handelt es sich um Quantilwerte der jeweiligen Verteilungen. Das bedeutet, dass diejenigen Werte herausgezogen werden, die eine bestimmte Wahrscheinlichkeit unter- bzw. überschreiten. [45]

Es werden Teilsicherheitsbeiwerte angegeben, die die Wahrscheinlichkeit der streuenden Rechenwerte, für die Widerstands- und die Einwirkungsseite berücksichtigen. [48] Die Teilsicherheitsbeiwerte sowie die charakteristisch ermittelten Werte für die Einwirkungen und Baustoffwiderstände sollen Bauteilzuverlässigkeiten sicherstellen. Die Sicherheit und die Zuverlässigkeit, dass ein Gebäude nicht versagt, wird somit gewährleistet, indem die Einwirkungen durch die Teilsicherheitsbeiwerte erhöht werden und die Bauteilwiderstände durch Teilsicherheitsbeiwerte verringert werden. [2]

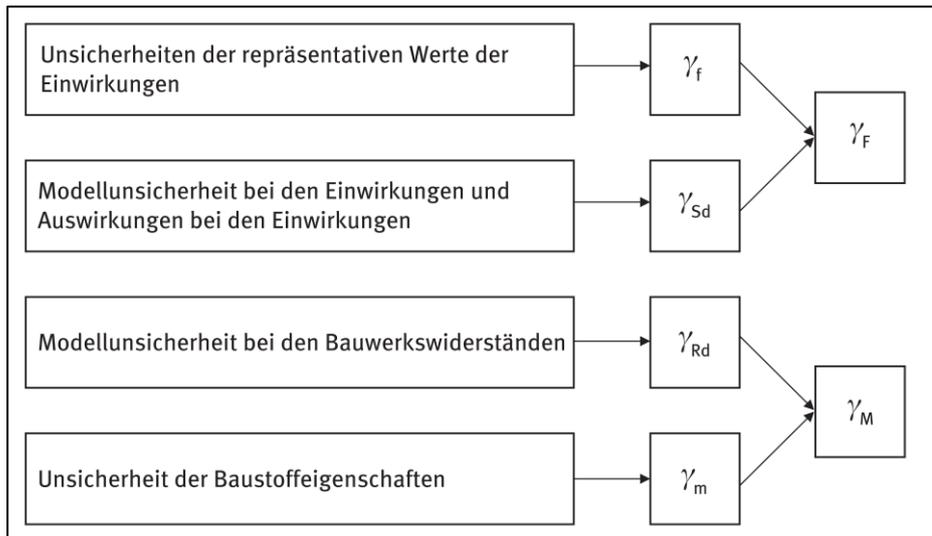


Abbildung 2-6: Beziehungen zwischen den einzelnen Teilsicherheitsbeiwerten für Einwirkungen und Widerstände ([10], S.97)

Nach Abbildung 2-6 setzen sich auf der Einwirkungsseite die Teilsicherheitsbeiwerte aus den Unsicherheiten der repräsentativen Einwirkungen sowie der Unsicherheiten aus Lastmodellen zusammen. Die Teilsicherheitsbeiwerte auf der Widerstandsseite beinhalten die Unsicherheiten von mechanischen Modellen und die der repräsentativen Werte der Baustoffwiderstände. [10]

Laut [15] wird die Variable  $\gamma_f$  als Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen definiert, welcher eine ungünstige Abweichung der Einwirkungen gegenüber der repräsentativen Werte berücksichtigt. Die Variable  $\gamma_m$  wird als Teilsicherheitsbeiwert für eine Baustoffeigenschaft definiert, dabei werden Modellunsicherheiten oder Größenabweichungen berücksichtigt. Die Ermittlung von Teilsicherheitsbeiwerten kann dem Kapitel 2.2.2 dieser Arbeit entnommen werden.

Neben den Teilsicherheitsbeiwerten werden auch Kombinationsbeiwerte für Einwirkungen im semiprobabilistischen Sicherheitskonzept ermittelt. [15] Da diese Arbeit im Weiteren jedoch ausschließlich die Widerstandsseite betrachtet, wird auf die Ermittlung dieser zusätzlichen Sicherheitselemente nicht weiter eingegangen.

### 2.2.2 Sicherheitsniveau in der DIN EN 1990 [15]

Wie bereits erläutert, bedeutet die Sicherheit im Bauwesen, dass der Widerstand eines Tragwerks größer als die Beanspruchung eines Tragwerks ist. Da der Eurocode das Hauptwerkzeug des konstruktiven Ingenieurbaus darstellt, muss in ihm alles geregelt sein, sodass eine ausreichende Sicherheit und Zuverlässigkeit von Konstruktionen gewährleistet werden kann. [39]

Die Zuverlässigkeit einer Tragkonstruktion im Eurocode wird zum einen über Nachweisgleichungen und Grenzzustandsbetrachtungen und zum anderen über Teilsicherheitsbeiwerte sichergestellt.[48] Geregelt wird dies mit Hilfe der bereits im Kapitel 2.2.1 beschriebenen Sicherheitskonzepte. [45] Das umfassende Sicherheitskonzept im Eurocode wird auch Teilsicherheitskonzept genannt. [15]

Die allgemeine Nachweisgleichung lautet, dass Widerstände größer als Einwirkungen sein müssen. [48] Die Aufgabe von den im Eurocode festgehaltenen Sicherheitskonzepten ist es, eine Differenz zwischen den Bemessungswerten der Einwirkungs- und Widerstandsseite zu gewährleisten. Dieser Abstand soll die Unsicherheiten auf beiden Seiten abdecken.[45]

Nach [15] gilt folgende Gleichung:

$$E_d \leq R_d \quad (2.9)$$

Mit  $E_d$  als Bemessungswert einer Auswirkung und  $R_d$  als Bemessungswert eines Widerstandes soll eine ausreichende Sicherheit geschaffen werden. [15, 45]

In dem Nachweisverfahren wird zum einen zwischen Bemessungssituationen und zum anderen zwischen Grenzzuständen unterschieden. Bei den Bemessungssituationen wird zwischen ständigen, vorübergehenden und außergewöhnlichen Situationen unterschieden, bei den Grenzzuständen zwischen dem Grenzzustand der Tragfähigkeit und den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit. Bei dem Grenzzustand der Tragfähigkeit wird die Sicherheit von Personen und die Sicherheit des Tragwerks betrachtet. Es werden das Tragwerksversagen und die Materialermüdung untersucht. Bei dem Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit werden vor allem das Wohlbefinden der Nutzer und das Erscheinungsbild eines Bauwerks untersucht. [15] Die beiden unterschiedlichen Grenzzustände werden im Weiteren nur noch als GZT und GZG betitelt.

Je nach Bemessungssituation und zu betrachtendem Grenzzustand werden sogenannte Kombinationsbeiwerte und Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen eingesetzt. Diese sorgen z. B. dafür, dass maßgebende Lasten um 50% erhöht und die unwichtigeren Lasten verringert, bzw. ganz weggelassen werden können, um eine möglichst realitätsnahe Bemessung zu ermöglichen. [15] Da es in dieser Arbeit lediglich um die Widerstandsseite einer Bemessung gehen soll und nicht um die Einwirkungsseite, wird dieses Thema im weiteren Verlauf nicht weiter untersucht.

Bei der Nachweisgleichung 2.9 handelt es sich um einen Teil des deterministischen Sicherheitskonzepts. Die Gleichung wurde also allein aus Erfahrungswerten gebildet. [48] Im deterministischen Sicherheitskonzept ist es üblich, dass Spannungsnachweise nur in wenigen, für kritisch erkannten Punkten durchgeführt werden. Dabei handelt es sich üblicher-

weise um die Punkte mit den Maximalbeanspruchungen. Bereiche mit geringeren Beanspruchungen und geringeren Spannungen können vernachlässigt werden. Dies ist anschaulich in Abbildung 2-7 dargestellt. Die blauen Punkte kennzeichnen dort die maximal belasteten Stellen, die als kritisch anzusehen sind [51]

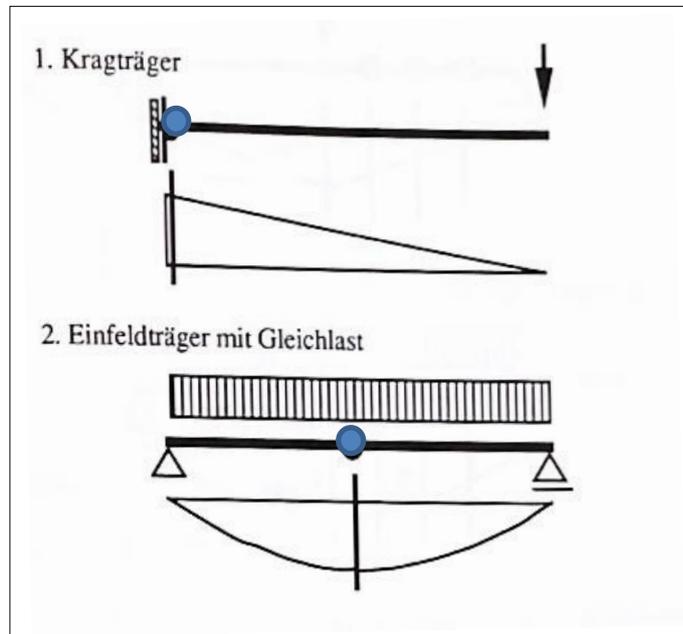


Abbildung 2-7: Nachweispunkte für Spannungen ([51], S.77)

Im Gegensatz zu der deterministischen Betrachtungsweise geht man im probabilistischen Vorgehen davon aus, dass ein System in allen Punkten versagen kann. Dies liegt daran, dass bei diesem Vorgehen eine Verletzung von Sicherheitsbedingungen in jedem Punkt möglich ist. Nach dieser Methode müssten somit alle möglichen Spannungspunkte untersucht werden und nicht nur die mit der größten Belastung. Im Eurocode wird lediglich das deterministische System verwendet. Das Vorgehen der Spannungsnachweise wird somit für den Benutzer möglichst einfach gehalten. [51]

Zu dem Konzept der Nachweisgleichung gehört im Eurocode auch das Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte. Sie repräsentieren die zu erwartenden Streuungen und berücksichtigen das semiprobabilistische Sicherheitskonzept. [48]

Wie bereits beschrieben, gibt es Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen. Zusätzlich gibt es diese ebenfalls für die Bauteilwiderstände. [15] Das Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte lässt sich mit der Abbildung 2-8 erklären.

Man erkennt, dass es sowohl bei den Einwirkungen als auch bei den Widerständen Streuungen gibt. Diese wurden in einer Dichtefunktion in Form der Gauß'schen Glockenkurve dargestellt. Der schraffierte Bereich in der Abbildung stellt die Überlagerung der beiden Dichtefunktionen dar. Es handelt sich hier um die Nennsicherheitszone, bzw. den Versagensbereich. Ziel der Bemessung ist es im schlechtesten Fall, ein Gleichgewicht zwischen

den Einwirkungen und den Widerständen zu erreichen und den Bereich der Versagenswahrscheinlichkeit möglichst gering zu halten. Nur so stellt sich die allgemeine Nachweisgleichung 2.9 ein. [47]

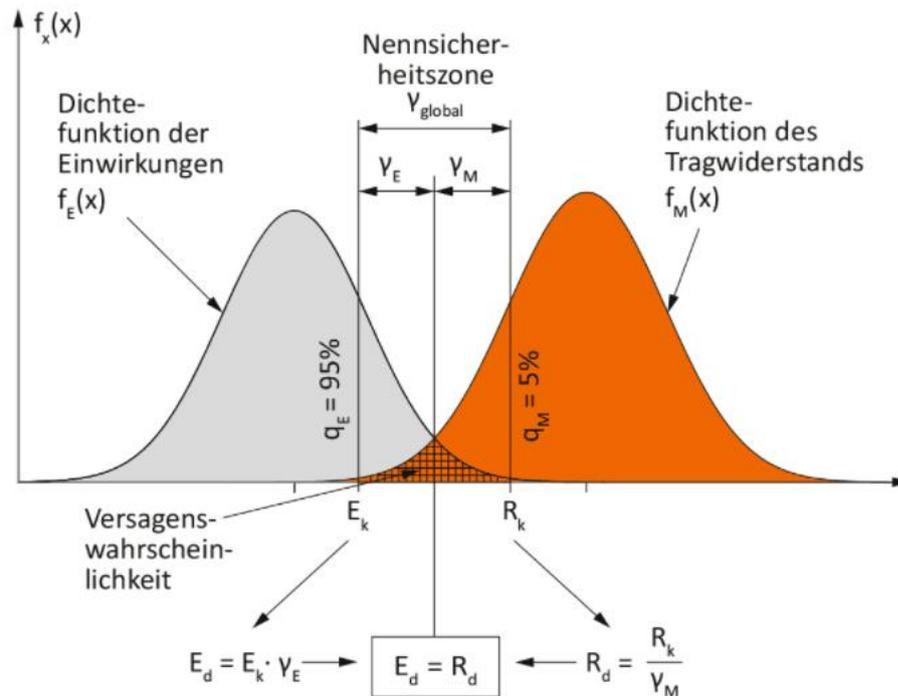


Abbildung 2-8: Teilsicherheitskonzept [47]

Wie in Kapitel 2.2.1.3 bereits beschrieben, werden für die Basisvariablen von Widerständen  $R_k$  und Einwirkungen  $E_k$  lediglich die Fraktil- bzw. Quantilwerte verwendet. Dabei handelt es sich um einen festgelegten Wert aus der Dichtefunktion der Datenmenge. [39] Im Bereich des konstruktiven Ingenieurbaus wird hier immer von einem Quantilwert  $q_E$  von 95% auf der Einwirkungsseite und gleichwertig in den meisten Fällen einem Quantilwert  $q_M$  von 5% auf der Widerstandsseite ausgegangen. Für Stahl gelten hier gesondert Regelungen, die im nächsten Kapitel weiter erläutert werden. [47] Grundsätzlich darf bei einem Tragfähigkeitsnachweis der Tragwiderstand  $R_k$  nie kleiner als die Einwirkung  $E_k$  sein. Um diese Nennsicherheit zu erreichen, wird der Abstand zur Versagenswahrscheinlichkeit durch den Teilsicherheitsfaktor  $\gamma_{\text{global}}$  festgelegt. [33]

Damit die Nachweisgleichung 2.9 erreicht wird, wird die Basisvariable der Einwirkungen  $E_k$  mit dem Teilsicherheitsfaktor  $\gamma_E$  multipliziert und damit erhöht. Die Basisvariable der Tragwiderstände wird durch den Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  dividiert und somit verringert. Das Gleichgewicht ist geschaffen und gleichzeitig die Sicherheit der Bauwerksbemessung erhöht. [47]

Der globale Teilsicherheitsbeiwert ist Teil des deterministischen Sicherheitskonzepts und bis 2001 basierten die technischen Vorschriften in Deutschland auf diesem. Mit der Einführung der DIN 1055-100 [14], dem Vorläufer des heutigen Eurocodes, wurden die differenzierten Teilsicherheitsbeiwerte eingeführt. [6]

Die Teilsicherheitsbeiwerte ergeben sich im Eurocode nach [30] im allgemeinen aus folgenden Gleichungen:

$$\gamma_E = \frac{\mu_E - \alpha_E * \beta * \sigma_E}{\mu_E - k * \sigma_E} = \frac{1 - \alpha_E * \beta * V_E}{1 - k * V_E} \quad (2.10)$$

$$\gamma_R = \frac{\mu_R - \alpha_R * \beta * \sigma_R}{\mu_R - k * \sigma_R} = \frac{1 - \alpha_R * \beta * V_R}{1 - k * V_R} \quad (2.11)$$

$\mu_i$	Mittelwert
$\alpha_i$	Wichtungsfaktor
$\beta$	Zuverlässigkeitsbeiwert
$\sigma_i$	Standartabweichung
$V_i$	Variationskoeffizient
$k$	Fraktilwert der Normalverteilung

Bis auf den Fraktilwert der Normalverteilung wurden in dieser Arbeit bereits alle verwendeten Variablen in Kapitel 2.2.1 betrachtet. Dieser k-Wert wird in Kapitel 4.1 genauer erläutert.

An der Ermittlung der Teilsicherheitsbeiwerte kann man die Parallelen zu dem probabilistischen Sicherheitskonzept erkennen, da die in ihm verwendeten Variablen und statistischen Kenngrößen als Grundlage der Formeln dienen. Dazu kann das Kapitel 2.2.1.2 dieser Arbeit verglichen werden.

### 2.2.3 Sicherheitsniveau von Stahlbauten

In diesem Kapitel soll das Sicherheitsniveau der DIN EN 1993 [11], genauer betrachtet werden.

Theoretisch soll die DIN EN 1990 [15] als Grundlage für alle anderen Eurocodes dienen. Dies schließt auch das Sicherheitskonzept und die Berechnung der Basisvariablen und Teilsicherheitsbeiwerte ein. In Hinblick auf den Eurocode 3, also die Berechnung und den Entwurf von Stahlbauten, trifft dies bei der Ermittlung des Teilsicherheitsbeiwertes  $\gamma_M$  jedoch nicht zu. [39]

Nach [11] werden, entgegen dem Konzept der DIN EN 1990 [15], die charakteristischen Werte des Baustahls nicht mit an statistischer Verteilung angepassten Quantilwerten berechnet. Bei diesem Material werden nominelle Werte verwendet. Die Teilsicherheitsbeiwerte werden somit wie folgt berechnet:

$$\gamma_M = \frac{r_{nom}}{r_d} \quad (2.12)$$

Dabei stellt  $r_d$  den Bemessungswert des Widerstandes und  $r_{nom}$  den nominellen Widerstandswert dar. [39]

Im Stahlbau gibt es nicht nur einen einzigen Teilsicherheitsbeiwert auf der Widerstandsseite. Es wird unterschieden, um welche Beanspruchung es geht und je nachdem ein anderer Teilsicherheitsbeiwert verwendet. [16]

Nach [16] und [18] ergibt sich folgende Tabelle mit den Teilsicherheitsbeiwerten und ihrer Verwendung.

Tab. 2-1: Teilsicherheitsbeiwerte im Stahlbau ([16], S. 48 &amp; [18], S. 21)

Beanspruchung	Teilsicherheitsbeiwert	Wert
Beanspruchung von Querschnitten	$\gamma_{M0}$	1,0
Beanspruchung von Bauteilen bei Stabilitätsversagen	$\gamma_{M1}$	1,1
Beanspruchung von Querschnitten bei Bruchversagen	$\gamma_{M2}$	1,25
Beanspruchbarkeit von Schrauben, Nieten, Bolzen, Schweißnähten und Blechen auf Lochleibung	$\gamma_{M2}$	1,25
Gleitfestigkeit im GZT	$\gamma_{M3}$	1,25
Gleitfestigkeit im GZG	$\gamma_{M3,ser}$	1,25
Lochleibungsbeanspruchung von Injektionschrauben	$\gamma_{M4}$	1,0
Beanspruchung von Knotenanschlüssen im Fachwerk mit Hohlprofilen	$\gamma_{M5}$	1,0
Beanspruchung von Bolzen im GZG	$\gamma_{M6,ser}$	1,0
Vorspannung hochfester Schrauben	$\gamma_{M7}$	1,1

Das Sicherheitsniveau wird im Stahlbau somit nicht verallgemeinert, sondern es wird für jeden Nachweis eine statistische Auswertung durchgeführt und je ein Teilsicherheitsbeiwert ermittelt. [16]

Neben den Teilsicherheitsbeiwerten und der Einteilung nach Beanspruchung, werden die unterschiedlichen Stahlquerschnitte in vier unterschiedliche Querschnittsklassen eingeteilt werden. Diese Einteilung ist abhängig von dem Verhältnis der Querschnittsdicke zur Querschnittsbreite, der Abstützung der Querschnittsteile, der Spannungsverteilung innerhalb des Querschnittsteils und der jeweiligen Materialfestigkeit. [16, 59]

Mit Hilfe der Querschnittsklassifizierungen werden vorhandene Schnittgrößenkombinationen eindeutig angegeben und das unterschiedliche Verhalten der Querschnitte unter Druckspannungen wird klassifiziert. [59, 46]

Es wird dabei zwischen vier unterschiedlichen Querschnittsklassen unterschieden. Bei den Querschnitten, die der Klasse 1 und 2 zugeteilt werden, wird eine plastische Spannungsverteilung über die Querschnittsfläche angenommen. Bei der Querschnittsklasse 3 wird von einer elastischen Spannungsverteilung ausgegangen und bei der Klasse 4 von einer elastischen Spannungsverteilung mit einer reduzierten wirksamen Querschnittsfläche. Diese Reduktion ist bedingt durch örtliches Beulen der Querschnittsteile. [59, 16]

Durch diese Einstufung wird ermittelt, mit welchen Materialeigenschaften gerechnet werden darf. Es wird zwischen plastischen und elastischen Materialeigenschaften unterschieden. Bei einer elastischen Tragwerksberechnung wird davon ausgegangen, dass die Spannungs-Dehnungsbeziehung in jedem Spannungszustand linear läuft. Das bedeutet, dass je größer die Dehnung ist, desto größer wird auch die Spannung. Bei der plastischen Tragwerksberechnung darf hingegen von einer bilinearen Spannungs-Dehnungsbeziehung ausgegangen werden. [11] Diese ist in Abbildung 2-9 dargestellt.

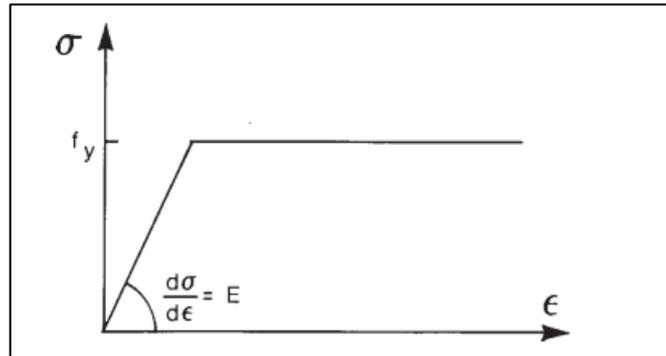


Abbildung 2-9: Bilineare Spannungs-Dehnungsbeziehung ([11], S. 52)

In der Abbildung ist auf der Abszisse die Dehnung  $\epsilon$  angegeben und auf der Ordinate die Spannung  $\sigma$ . Anders als bei der linearen Spannungs-Dehnungsbeziehung erkennt man, dass ab einem gewissen Punkt die Spannung nicht weiter linear zur Dehnung ansteigt, sondern ab dem Punkt  $f_y$  den gleichen Wert behält. Das tatsächliche Verhalten von Stahl weicht zwar leicht von dieser theoretischen Betrachtung ab, die theoretische Betrachtung hilft jedoch die Spannungs-Dehnungs-Beziehung des Stahls besser zu verstehen. [11]

Durch die Querschnittsklassifizierungen wird im Vorhinein geprüft, ob eine ausreichend große Rotationskapazität zur Verfügung steht, damit sich plastische Gelenke ausbilden können und eine allgemeine plastische Tragwerksberechnung geführt werden kann. [16]

Im Stahlbau wird also mit mehreren Methoden die Sicherheit zusätzlich zu den allgemeinen Verfahren aus der DIN EN 1990 [15] gewährleistet.

### 3 Berechnungsgrundlagen für geschraubte Stahlverbindungen

Im Stahlbau werden Bauteilverbindungen in der Regel mit Schrauben oder Schweißnähten ausgeführt, im Hochbau stellen vor allem die geschraubten Verbindungen die wichtigste Verbindungsart dar. [58]

In Europa wird für die Bemessung von geschraubten Stahlverbindungen der Eurocode 3, bzw. die DIN EN 1993-1-8 [18] als Grundlage genommen. In ihm werden die Regeln für die Berechnung und die Bemessung, aber auch für den Entwurf von Anschlüssen festgehalten. [18] Die DIN EN 1993-1-1 [16] bis DIN EN 1993-6 [19] wurde zusammen mit den anderen Eurocodes im Jahre 2010 veröffentlicht und seit 2014 werden diese Normen regelmäßig überarbeitet. Ziel dieser Überarbeitung ist es, die Handhabung bei der Verwendung zu verbessern, die national unterschiedlichen Parameter weiter zu vereinheitlichen und die Anforderungen an die Stabilität zu verbessern. Die aktuell gültigen Normen sind die DIN EN 1993-1-8:2010 [18] und der Nationale Anhang für Deutschland DIN EN 1993-1-8/NA:2020 [22]. [56]

Durch diese Überarbeitung werden mögliche Verbesserungspunkte gefunden und es wird ein Entwurf für eine Revision der Eurocodes erstellt. Das gilt auch für den EC 3. Nachdem der Entwurf für die DIN EN 1993-1-8 [18] mehrere Komitees durchlaufen hat, ist er im Jahr 2021 als prEN 1993-1-8 [13] veröffentlicht worden. [56]

Im Folgenden werden die DIN EN 1993-1-8 [18] und die prEN 1993-1-8 [13] miteinander verglichen.

### 3.1 Aktuell gültige Bemessungskonzepte nach DIN EN 1993-1-8 [18]

Wie bereits erwähnt, werden in der DIN EN 1993-1-8 [18] die Grundsätze und Regeln für den Entwurf, die Berechnung und die Bemessung von Stahlschlüssen geregelt. Dies beinhaltet zum einen Schrauben-, Niet- und Bolzverbindungen und zum anderen Schweißverbindungen. Dabei werden die Stahlsorten von S235 bis S460 behandelt und es wird von einer vorwiegend ruhenden Belastung ausgegangen. [16]

Da sich diese Arbeit lediglich mit den geschraubten Stahlverbindungen befasst, wird im Folgenden auf alle maßgebenden Nachweise für diese Verbindungen eingegangen. Die Nachweise für Niet-, Bolz- und Schweißverbindungen werden nicht weiter aufgeführt.

#### Geschraubte Stahlverbindungen

Bei den geschraubten Stahlverbindungen werden sowohl Nachweise für die Schraube aber auch für die anschließenden Stahlbauteile geführt.

Nach [18] werden die geschraubten Stahlverbindungen in die Kategorien A bis E unterteilt. Die Kategorien A bis C stellen dabei die Scherverbindungen dar und die Kategorien D bis E die Zugverbindungen. Die folgende Tabelle fasst die fünf Kategorien zusammen.

Tab. 3-1: Kategorien von Schraubverbindungen [18]

Kategorie	Erläuterungen und Merkmale	Nachweis
Scherverbindungen		
A	Scher- und Lochleibungsverbindung, Schrauben der Festigkeitsklasse 4.6 bis 10.9	Abscheren, Lochleibung
B	Gleitfeste Verbindungen im GZG, Hochfeste vorgespannte Schrauben der Festigkeitsklassen 8.8 bis 10.9	Gleiten (GZT), Abscheren, Lochleibung
C	Gleitfeste Verbindungen im GZT, Hochfeste vorgespannte Schrauben der Festigkeitsklassen 8.8 bis 10.9	Gleiten (GZT), Lochleibung, Überprüfung Nettoquerschnitt
Zugverbindungen		
D	Nicht vorgespannte Verbindungen, Schrauben der Festigkeitsklasse 4.6 bis 10.9	Zug, Durchstanzen Schraubekopf
E	Vorgespannte Verbindungen, Schrauben der Festigkeitsklasse 8.8 und 10.9	Zug, Durchstanzen Schraubekopf

Es wird unterschieden zwischen dem Nachweis der Beanspruchbarkeit auf Abscheren, der Beanspruchbarkeit auf Zug, der Kombination aus Abscheren und Zug, dem Nachweis der Durchstanzkraft, dem Nachweis der Lochleibung und dem Nachweis des Blockversagens.[18] Im Folgenden werden alle Nachweise nacheinander genauer erläutert. Da es in dieser Arbeit hauptsächlich um Verbindungen mit Scherbeanspruchung und mit Zugbelastung gehen soll, werden die Nachweise für gleitfeste Verbindungen im Weiteren nicht betrachtet.

### 3.1.1 Abscheren

Bei dem Nachweis des Abscherens muss die vorhandene Abscherkraft mit der Grenzabscherkraft der Schraube verglichen werden. Abscheren ist ein Vorgang, der auftritt, wenn Kräfte senkrecht zur Schraubenachse übertragen werden sollen. Abbildung 3-1 zeigt eine Prinzipskizze, auf der aufgezeigt wird, wie die Kraft  $F$  aus dem rechten Blech in die beiden linken Bleche gelangt. Es werden sowohl die beiden Scherfugen als auch die wirkenden Kräfte dargestellt. Die Bleche wirken durch die Beanspruchung der Kraft  $F$  eine Druckspannung auf die Schraube aus. Wenn die entstehende Schubspannung und die resultierenden Scherkräfte  $V_a$  von dem Schraubenschaft nicht aufgenommen werden können, tritt in den Scherfugen der Versagensmechanismus des Abscherens auf. [58]

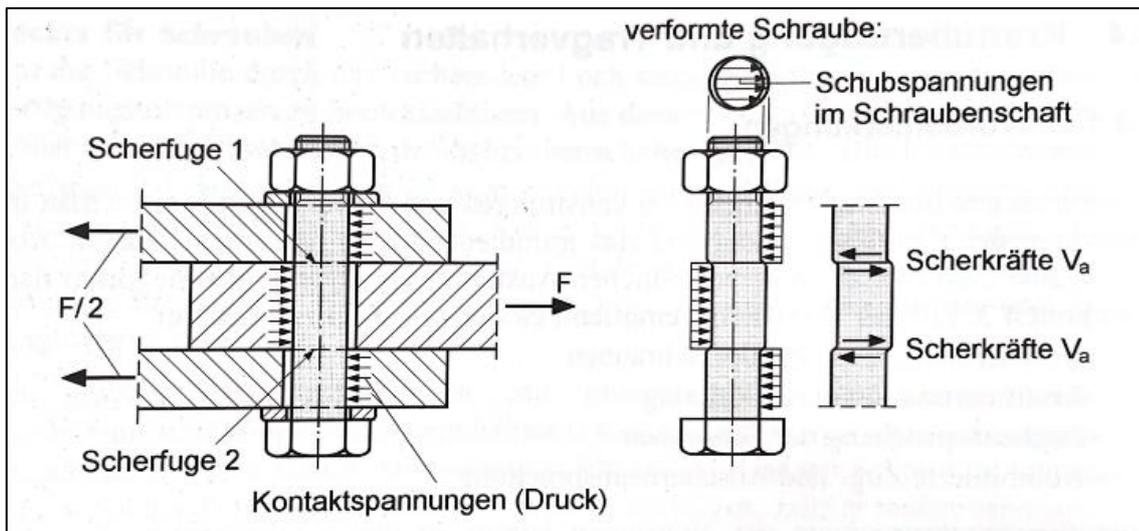


Abbildung 3-1: Abscherbeanspruchung einer Schraube ([58], S. 204)

Nach [18] lautet der Nachweis des Abscherens je Scherfuge wie folgt.

$$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd} \quad (3.1)$$

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_V * f_{ub} * A_{(s)}}{\gamma_{M2}} \quad (3.2)$$

$F_{v,Ed}$	Vorhandene Abscherkraft je Schraube und je Scherfuge [N]
$F_{v,Rd}$	Grenzabscherkraft je Schraube und je Scherfuge [N]
$\alpha_V$	Parameter zur Berücksichtigung der Schraubenfestigkeit [-]
$f_{ub}$	Zugfestigkeit des Schraubenwerkstoffes [N/mm <sup>2</sup> ]
$A_{(s)}$	Schaftquerschnittsfläche der Schraube bzw. Spannungsquerschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]
$\gamma_{M2}$	Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchung von Querschnitten bei Bruchversagen infolge von Zugspannungen [-]

Bei dem Nachweis des Abscherens muss die Lage der Trenn- bzw. Scherfuge im Vorhinein überprüft werden. Liegt der Schaft der Schraube in der Scherfuge, ist mit dem Schaftquerschnitt A zu rechnen. Liegt jedoch das Gewinde der Schraube in der Schaffuge, ist mit der Spannungsquerschnittsfläche zu rechnen. [60]

Es muss zudem beachtet werden, dass auch bei dem Parameter  $\alpha_V$  zwischen der Lage im Gewinde und der Lage im Schaft unterschieden wird. Zudem hat die Schraubenfestigkeitsklasse einen Einfluss. [18] Der jeweilige  $\alpha_V$ -Wert kann der Tabelle Tab. 3-2 entnommen werden.

Tab. 3-2: Parameter zur Berücksichtigung der Lage und Schraubenfestigkeit [18]

<u>Grenzabscherkraft</u>	<u>Scherfuge</u>	<u>Festigkeitsklasse</u>
$F_{v,Rd} = 0,6 * f_{ub} * A_{(s)} / \gamma_{M2}$	Gewinde	4.6, 5.6 und 8.8
$F_{v,Rd} = 0,5 * f_{ub} * A_{(s)} / \gamma_{M2}$	Gewinde	4.8, 5.8, 6.8 und 10.9
$F_{v,Rd} = 0,6 * f_{ub} * A_{(s)} / \gamma_{M2}$	Schaft	4.6 bis 10.9

### 3.1.2 Lochleibung

Beim Nachweis der Lochleibung wird die vorhandene Abscherkraft mit der Grenzlochleibungskraft verglichen.[18] Die Lochleibungsspannung entsteht durch das Anpressen der Schrauben an die Bleche. Abbildung 3-2 stellt dazu ein Prinzipbeispiel dar, in dem die Spannungen an den Kontaktstellen zwischen Schraube und Blech eingezeichnet sind. Es ist egal, ob es sich dabei um eine einschnittige Verbindung, mit nur einer Scherfuge oder einer zweischnittigen Verbindung, mit zwei Scherfugen, handelt. Bei dem Nachweis der Bleche muss sichergestellt werden, dass es nicht zu unzulässigen Verformungen und Aufweitungen an den Löchern kommt. [58]

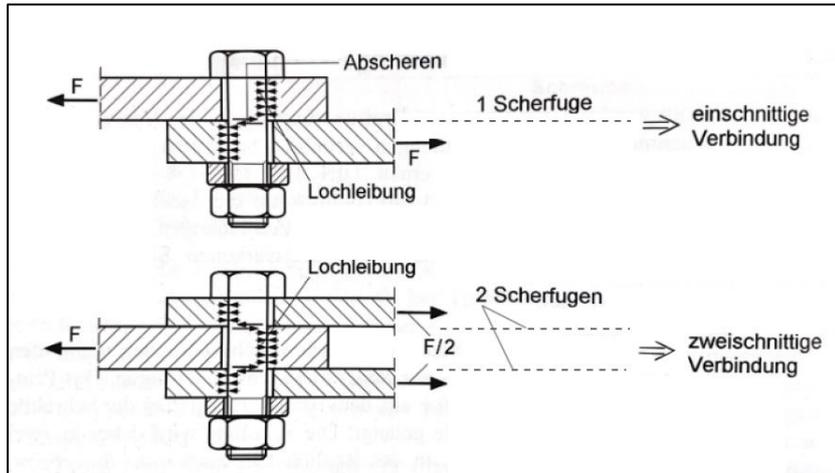


Abbildung 3-2: Ein- und Zweischnittige Scherverbindung ([58], S. 204)

Bei dem Nachweis des Bleches innerhalb einer Stahlverbindung wird eine Lochleibungsspannung berechnet. Dies geschieht, indem die zu übertragende Kraft auf die Lochleibungsfläche bezogen wird. Die Lochleibungsfläche ergibt sich hier aus der Blechdicke  $t$  und dem Schaftdurchmesser  $d$  der Schraube. Diese fiktive Spannung wird mit einem zulässigen Lochleibungsdruck verglichen. Die Grenzlochleibungskraft ergibt sich somit aus dem zulässigen Lochleibungsdruck multipliziert mit der Lochleibungsfläche. [41]

Generell tritt Lochleibung erst auf, wenn die Belastung die Fließgrenze des Stahls überschreitet und es zu einem plastischen Verhalten des Stahlbleches kommt. Dies bedeutet, dass die Zugfestigkeit der Schraube größer als die Zugfestigkeit des Bleches ist und die Verbindung auf Lochleibung versagt und nicht auf Abscheren der Schraube. [25]

Zum besseren Verständnis wird eine Übersicht über die Lochabstände an einem Stahlblech in Abbildung 3-3 aufgeführt. Die verwendeten Parameter werden hiermit als bekannt vorausgesetzt.

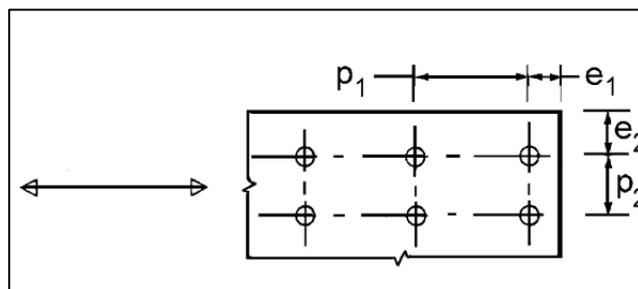


Abbildung 3-3: Bezeichnung der Lochabstände eines Stahlbleches ([18], S. 28)

Es treten im Allgemeinen drei Versagensarten um das Schraubenloch auf, je nachdem welche Geometrie des Anschlusses vorliegt.

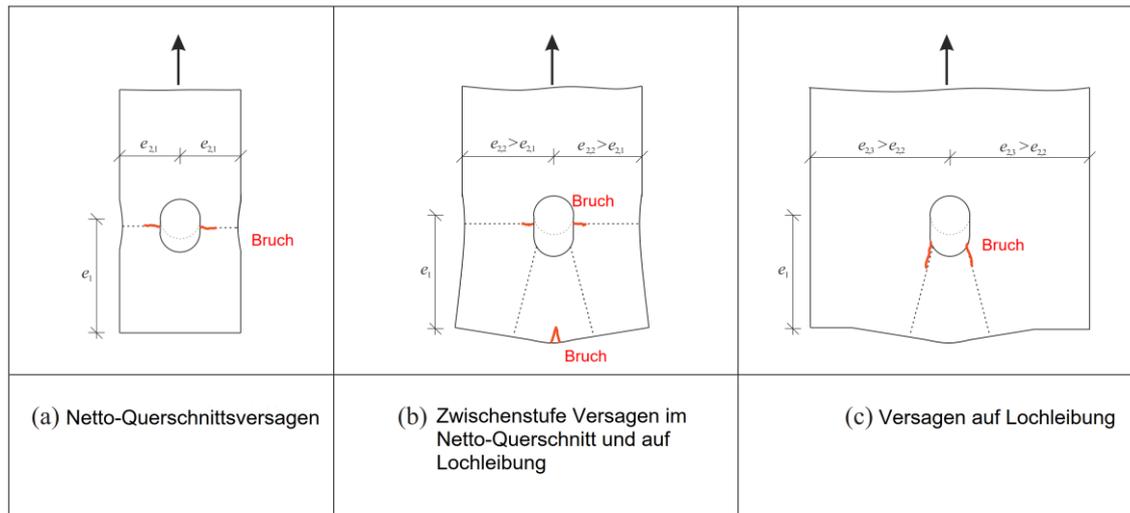


Abbildung 3-4: Versagensarten Lochleibung (in Anlehnung an [53], S. 2)

Die Versagensart ist dabei abhängig von dem Randabstand quer zur Krafrichtung  $e_2$ . Wird die Kraft in dem jeweiligen Anschluss über die Kontaktfläche zwischen Schraube und Blech in das Blech eingeleitet, kommt es zu einer Druckbeanspruchung im Stahlblech die zum Fließen des Stahlbleches am Lochrand führt. Um diese Druckbeanspruchung aufnehmen zu können, formt sich ein Zugbogen um das Schraubenloch, sodass die Kräfte auf das gesamte Blech übertragen werden. Bei geringen Randabständen  $e_2$  kann sich dieser Zugbogen jedoch nicht ausreichend ausbilden, sodass es zu einem Versagen im Netto-Querschnitt des Stahlbleches kommt. In der Abbildung 3-4 a) ist das Versagen bei einem sehr kleinen Randabstand  $e_2$  veranschaulicht. Dargestellt ist ein Stahlblech mit Schraubenloch. Hier, in Rot eingezeichnet, kommt es zu einem Zugversagen rechts und links neben dem Schraubenloch. Es gibt zudem nur geringe Verformungen am Schraubenrand. In der Abbildung b) ist die Zwischenstufe zwischen dem Versagen im Netto-Querschnitt und dem Versagen auf Lochleibung dargestellt. Hier ist erneut ein Stahlblech mit einem Schraubenloch visualisiert, jedoch ist hier der Randabstand  $e_2$  größer als in Abbildung a). Hier kommt es bereits zum vollständigen Fließen des Stahls am Blechrand. Jedoch ist der Abstand weiterhin nicht ausreichend groß genug, dass das Blech ausschließlich auf Lochleibung versagt. Auch hier kommt es zu Zugversagen am Schraubenloch, jedoch in geringerer Form als in Abbildung a). Zudem tritt an der Spitze des Zugbogens Zugversagen im Blech auf und es kommt zu einer horizontalen Dehnung des Bleches. In der Abbildung c) ist nun das tatsächliche Versagen auf Lochleibung dargestellt. Auch hier hat das Stahlblech die Fließspannung erreicht und es tritt eine große Verformung am Schraubenloch auf. Zusätzlich entsteht eine horizontale Dehnung des Stahlbleches und es kommt zu einem Zugversagen, welches quer zur Krafrichtung am Schraubenloch auftritt. [53]

Sobald Gleichung 3.3 eingehalten wird, ist der Lochleibungsnachweis erfüllt. Folgend ist der Nachweis nach [18] aufgeführt. Es wird zum einen zwischen den innen liegenden Schrauben und den am Rand liegenden Schrauben unterschieden und zum anderen wird zwischen quer zur Krafrichtungen und in Krafrichtung differenziert.

$$F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd} \quad (3.3)$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_{ub} * d * t}{\gamma_{M2}} \quad (3.4)$$

$$\alpha_b = \min \left\{ \alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right\} \quad (3.5)$$

Für am Rand liegende Schrauben in Krafrichtung  $\alpha_d = \frac{e_1}{3 * d_0} \quad (3.6)$

Für innen liegende Schrauben in Krafrichtung  $\alpha_d = \frac{p_1}{3 * d_0} - \frac{1}{4} \quad (3.7)$

Für am Rand liegende Schrauben quer zur Krafrichtung  $k_1 = \min \left\{ 2,8 * \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 1,4 * \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\} \quad (3.8)$

Für innen liegende Schrauben quer zur Krafrichtung  $k_1 = \min \left\{ 1,4 * \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\} \quad (3.9)$

$F_{v,Ed}$	Vorhandene Abscherkraft je Schraube und je Bauteil [N]
$F_{b,Rd}$	Grenzlochleibungskraft je Schraube und je Bauteil [N]
$\alpha_b$	Parameter zur Berücksichtigung der Schraubenlage und Krafrichtung [-]
$f_{ub}$	Zugfestigkeit des Schraubenwerkstoffes [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_u$	Zugfestigkeit des Stahlsorte [N/mm <sup>2</sup> ]
$d$	Schaftdurchmesser der Schraube [mm]
$d_0$	Lochdurchmesser [mm]
$t$	Bauteildicke [mm]
$\gamma_{M2}$	Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchung von Querschnitten bei Bruchversagen infolge von Zugspannungen [-]

In der „Background Documentation“ des Eurocode 3 [25], im Folgenden auch BGD genannt, wird darauf hingewiesen, dass, sobald der Randabstand  $e_1$  des Schraubenloches groß genug ist, bzw. eine Wert größer  $3*d_0$  erreicht, kein Zugversagen in der Platte auftritt und kein Lochleibungsversagen am Schraubenloch auftreten kann. Zudem wird angemerkt, dass Lochleibungsversagen auch dann auftritt, wenn der Abstand zwischen den Schrauben  $p_1$  zu gering ist. Das ist der Grund, weswegen mit dem  $\alpha_d$ -Wert die Abstände zwischen den Schraubenlöchern, bzw. der Abstand zwischen Schraubenloch und Rand mitberücksichtigt wird. [25]

Die DIN EN 1993-1-8 [18] geht zudem auf die Sonderfälle von großem Lochspiel und Langlöchern ein. Bei großem Lochspiel, bei denen der Lochdurchmesser ein größeres Lochspiel zur Schraube hat als das in [12] geregelte Nennlochspiel, wird die Lochleibungstragfähigkeit zusätzlich mit dem Beiwert 0,8 abgemindert und bei Langlöchern zusätzlich mit dem Beiwert 0,6. Langlöcher haben lediglich in Querrichtung das zugelassene Nennlochspiel nach [12].

Einen weiteren Sonderfall stellen schräg angreifende Schraubenkräfte dar. Für diese darf die Lochleibungstragfähigkeit getrennt für die parallele und senkrechte Kraftkomponente

nachgewiesen werden. Den letzten Sonderfall stellt die Senkschraube dar. [18] Diese werden jedoch in dieser Arbeit nicht weiter untersucht werden, daher werden alle weiteren Erläuterungen aus der DIN EN 1993-1-8 [18] hierzu nicht weiter aufgeführt.

### 3.1.3 Zug

Neben den Beanspruchungen quer zur Schraubenachse kann es bei Anschlüssen auch zu Kräften in Richtung der Schraubenachsen kommen. Die Kräfte, die bei diesen Anschlüssen in den Schrauben wirken, werden über Biegung der Bleche in die Schrauben übertragen. In der Abbildung 3-5 ist ein zugbeanspruchter Anschluss dargestellt. Es sind sowohl die angreifenden Kräfte  $F$  dargestellt als auch die resultierenden Kräfte in der Schraube  $N$  und im Blech  $Q$ . Die Kraft  $Q$  stellt dabei die sogenannte Abstützkraft der Bleche dar.

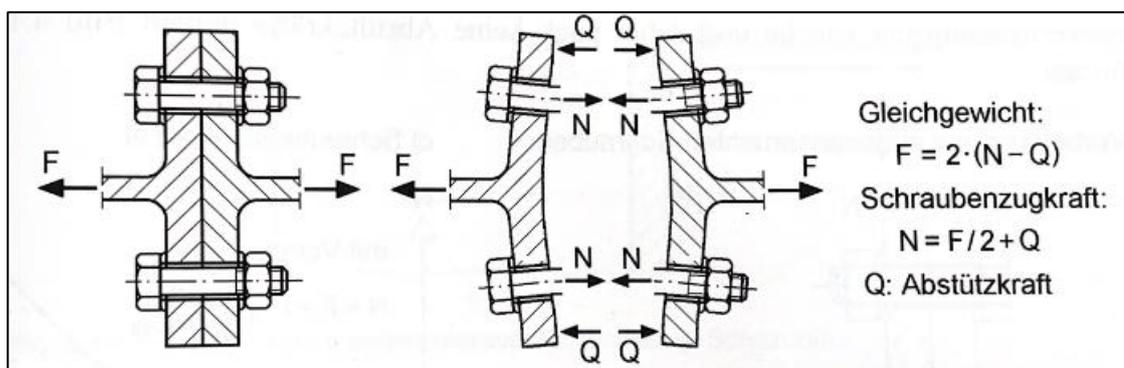


Abbildung 3-5: Zugbeanspruchte Schrauben in einer Verbindung ([58], S.211)

In dem Nachweis auf Zug wird die angreifende Zugkraft mit der Grenzzugkraft der Schraube verglichen. [18] Der Nachweis nach [18] ist im Folgenden aufgeführt.

$$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd} \quad (3.10)$$

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 * f_{ub} * A_s}{\gamma_{M2}} \quad (3.11)$$

$F_{t,Ed}$	Vorhandene Zugkraft je Schraube [N]
$F_{t,Rd}$	Grenzzugkraft je Schraube [N]
$k_2$	Parameter zur Berücksichtigung der Schraubenart [-] $k_2 = 0,9$ ; $k_2 = 0,63$ bei Senkschrauben
$f_{ub}$	Zugfestigkeit des Schraubenwerkstoffes [N/mm <sup>2</sup> ]
$A_s$	Spannungsquerschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]
$\gamma_{M2}$	Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchung von Querschnitten bei Bruchversagen infolge von Zugspannungen [-]

### 3.1.4 Durchstanzen

Bei zugbeanspruchten Anschlüssen kommt es nicht nur zu einer Zugbeanspruchung in der Schraube, sondern auch zu Abstützkräften in den Blechen. Dies ist in Abbildung 3-5 dargestellt. Ob diese Abstützkräfte auftreten, hängt von der Dehnung der Schrauben und der Verformung der auf Biegung beanspruchten Bleche ab. Sind die abstützenden Kräfte zu groß oder die Blechdicke zu gering, kann es zu einem Herausreißen der Schraube kommen. Man spricht dann von einem Durchstanzen der Schraube. [58]

Bei dem Nachweis auf Durchstanzen wird die einwirkende Zugkraft mit der Grenzdurchstanzkraft des Bleches verglichen. Der Nachweis wird wie folgt geführt: [18]

$$F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd} \quad (3.12)$$

$$B_{p,Rd} = \frac{0,6 * \pi * d_m * t_p * f_u}{\gamma_{M2}} \quad (3.13)$$

$B_{v,Rd}$	Grenzdurchstanzkraft [N]
$F_{t,Ed}$	Vorhandene Zugkraft je Schraube [N]
$d_m$	Mittelwert des Eckmaßes und der Schlüsselweite des Schraubenkopfes [mm]
$t_p$	Blechdicke unter dem Schraubenkopf [mm]
$f_u$	Zugfestigkeit des Stahlsorte [N/mm <sup>2</sup> ]
$\gamma_{M2}$	Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchung von Querschnitten bei Bruchversagen infolge von Zugspannungen [-]

### 3.1.5 Kombination von Scher-/Lochleibung und Zug

Bei Stahlverbindungen kann es vorkommen, dass in Schrauben sowohl Abscher- als auch Zugbeanspruchungen wirken. In Abbildung 3-6 ist ein Beispiel für eine solche Verbindung dargestellt. Durch die angreifende Kraft  $F$  entstehen sowohl Zugkräfte  $N$  als auch Abscherkräfte  $V_a$  in der Schraube. [58]

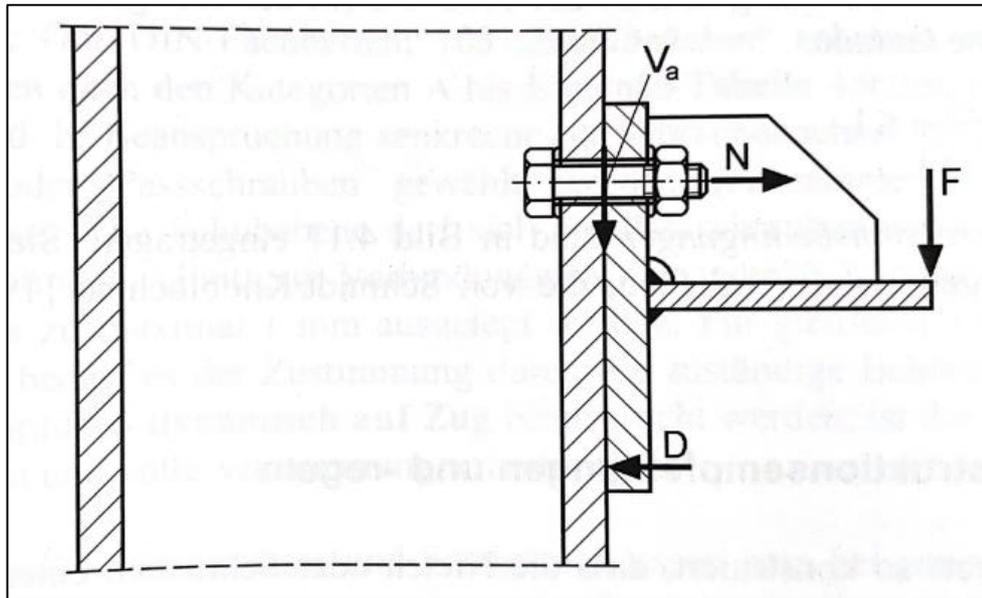


Abbildung 3-6: Zug- und Abscherbeanspruchung einer Schraube ([58], S. 213)

Im Nachweis der Kombination von Scher- bzw. Lochleibung und Zug wird untersucht, ob die Interaktion zwischen der Zugbeanspruchung und der Abscherbeanspruchung größer als 1,0 wird. [58] Der Nachweis nach [18] wird im Folgenden dargestellt.

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 * F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.14)$$

$F_{v,Ed}$	Vorhandene Abscherkraft je Schraube und Scherfuge [N]
$F_{v,Rd}$	Grenzabscherkraft je Schraube und je Scherfuge [N]
$F_{t,Ed}$	Vorhandene Zugkraft je Schraube [N]
$F_{t,Rd}$	Grenzzugkraft je Schraube [N]

Damit der Nachweis erfüllt ist, sollte die Gleichung 5.14 erfüllt sein.

### 3.1.6 Blockversagen von Schraubengruppen

Zu einem Blockversagen innerhalb einer Verbindung kann es kommen, wenn es gleichzeitig zu einem Schubversagen des Bleches entlang der schubbeanspruchten Schraubenreihe und einem Zugversagen des Bleches entlang der zugbeanspruchten Schraubenreihe kommt. [1]

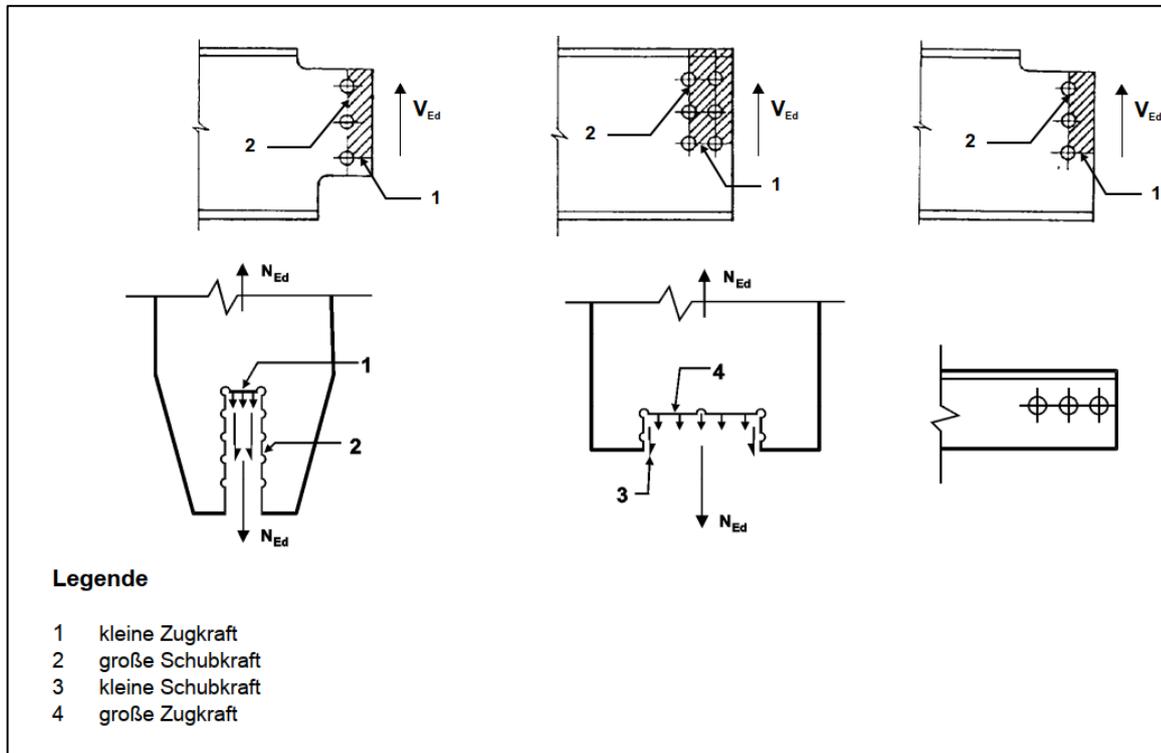


Abbildung 3-7: Blockversagen von Schraubengruppen (in Anlehnung an [18], S. 37)

In Abbildung 3-7 sind mehrere Formen des Blockversagens abgebildet. Dieses Versagen kann bei I-Profile, Winkeln oder Blechen auftreten. Es wird aufgezeigt, dass es zum Blockversagen kommen kann, wenn eine große Schubkraft und eine kleine Zugkraft herrschen, aber auch wenn eine kleine Schubkraft und eine große Zugkraft wirken. [18]

Bei dem Nachweis auf Blockversagen wird zwischen symmetrisch angeordneten und zentrisch belasteten Schraubengruppen und exzentrisch belasteten Schraubengruppen unterschieden. Der Nachweis nach [18] lautet wie folgt.

$$N_{Ed} \leq V_{eff,1,Rd} \quad (3.15)$$

Symmetrisch angeordnete Schraubengruppe mit zentrischer Belastung

$$V_{eff,1,Rd} = \frac{f_u \cdot A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y \cdot A_{nv}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad (3.16)$$

$$V_{Ed} \leq V_{eff,2,Rd} \quad (3.17)$$

Schraubengruppe mit exzentrischer Belastung

$$V_{eff,2,Rd} = \frac{0,5 * f_u * A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y * A_{nv}}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} \quad (3.18)$$

$V_{eff,i,Rd}$	Widerstand gegen Blockversagen [N]
$N_{Ed}$	Vorhandene Zugbeanspruchung [N]
$V_{Ed}$	Vorhandene Schubbeanspruchung [N]
$f_u$	Zugfestigkeit der Stahlsorte [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_y$	Fließfestigkeit der Stahlsorte [N/mm <sup>2</sup> ]
$A_{nt}$	Zugbeanspruchte Nettoquerschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]
$A_{nv}$	Schubbeanspruchte Nettoquerschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]
$\gamma_{M0}$	Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchung von Querschnitten [-]
$\gamma_{M2}$	Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchung von Querschnitten bei Bruchversagen infolge von Zugspannungen [-]

### 3.1.7 Sonderfälle

Neben Schraub- und Blechnachweisen ist in [18] zudem der Sonderfall der einseitig angeschlossenen Winkel bzw. unsymmetrischen Bauteile zu nennen. Bei diesen Anschlüssen muss neben der Lochleibung, dem Abscheren, dem Zug und Durchstanzen noch untersucht werden, ob die maximale Tragfähigkeit  $N_{u,Rd}$  eingehalten ist.

Hier wird zwischen drei Möglichkeiten unterschieden. Zum einen wird der Anschluss mit einer Schraube betrachtet, mit zwei Schrauben und mit drei oder mehr Schrauben.

Mit einer Schraube

$$N_{u,Rd} = \frac{2,0 * (e_2 - 0,5 * d_0) * t * f_u}{\gamma_{M2}} \quad (3.19)$$

Mit zwei Schrauben

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 * A_{net} * f_u}{\gamma_{M2}} \quad (3.20)$$

## Mit drei oder mehr Schrauben

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_3 * A_{net} * f_u}{\gamma_{M2}} \quad (3.21)$$

$A_{net}$  Netto-Querschnittsfläche des Winkels oder angeschlossenen asymmetrischen Bauteils [mm<sup>2</sup>]

$\beta_2$  und  $\beta_3$  Abminderungsbeiwerte in Abhängigkeit vom Lochabstand  $p_1$  [-]

Hierbei ergibt sich  $A_{net}$  aus der Nettoquerschnittsfläche des kleinsten Winkelschenkels und die Abminderungsbeiwerte  $\beta_2$  und  $\beta_3$  ergeben sich aus der folgenden Tabelle

Tab. 3-3: Abminderungsbeiwerte für Sonderfälle  $\beta_2$  und  $\beta_3$  ([18], S. 38)

Lochabstand	$p_1$	$\leq 2,5 d_0$	$\geq 5,0 d_0$
2 Schrauben	$\beta_2$	0,4	0,7
3 Schrauben oder mehr	$\beta_3$	0,5	0,7

### 3.2 Neue Bemessungskonzepte nach prEN 1993-1-8 [13]

Die prEN 1993-1-8 [13] befasst sich ebenfalls mit dem Entwurf, der Berechnung und der Bemessung von Anschlüssen. Es wird dabei ebenfalls von vorwiegend ruhenden Belastungen ausgegangen, jedoch befasst sich dieser Entwurf für eine neue DIN EN 1993-1-8 [18] mit den Stahlsorten S235 bis S700 und inkludiert damit auch hochfeste Stahlsorten in die allgemeinen Bemessungsregeln. [13]

Dieses Kapitel befasst sich, wie das vorherige, nur mit den geschraubten Stahlverbindungen. Schweißverbindungen, Niet- und Bolzverbindungen werden daher nicht weiter berücksichtigt.

#### Geschraubte Stahlverbindungen

In der prEN 1993-1-8 [13] wird weiterhin zwischen den Schraubanschlüssen mit Scherbeanspruchung und den Schraubanschlüssen mit Zugbeanspruchung differenziert. Die Scherverbindungen werden auch in der künftigen Version in die drei Kategorien Scher-Lochleibungsverbindung (A), gleitfeste Verbindung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (B) und gleitfeste Verbindung im Grenzzustand der Tragfähigkeit (C) eingeteilt. Die Zugbeanspruchten Verbindungen werden wie bisher in die Kategorien nicht vorgespannt (D) und vorgespannte Verbindungen (E) unterschieden. [13]

Bei den Scherverbindungen wird in dieser Fassung bereits in der Übersicht über die Kategorien von Schraubverbindungen darauf hingewiesen, dass auch auf den Nachweis des Blockversagens von Schraubengruppen bei den Schraubkategorien A und B geachtet werden soll. Weiterhin entfällt bei der Kategorie C der Nachweis der Beanspruchung auf Abscheren und der Nachweis der Beanspruchung auf Lochleibung. Es muss mit der neuen Fassung lediglich nachgewiesen werden, dass der Nachweis auf Gleiten im GZT eingehalten ist. Die letzte Änderung betrifft den Nachweis des Netto-Querschnitts. Für alle Scherverbindungen, also Kategorie A, B und C gilt, dass die Netto-Querschnittsfläche unter Berücksichtigung der Schraubenlöcher ebenfalls untersucht werden muss. Die Materialkennwerte und anderen Nachweisangaben ändern sich nicht und können dem Kapitel 3.1 und der Tab. 3-1 entnommen werden. [13]

Für die Zugbeanspruchten Kategorien bleibt hingegen in der neuen Fassung alles identisch. Alle Nachweisangaben und Materialkennwerte entsprechen den Angaben in der DIN EN 1993-1-8 [18] und können ebenfalls dem Kapitel 3.1 und der Tab. 3-1 entnommen werden. [13]

Im Folgenden werden die einzelnen Nachweise für Schraubverbindungen und die jeweiligen Änderungen in der neuen Fassung prEN 1993-1-8 [13] aufgeführt.

### 3.2.1 Abscheren

Der Nachweis des Abscherens ändert sich in dem Entwurf prEN 1993-1-8 [13] nicht zu den Gleichungen 3.1 und 3.2. Es wird lediglich die Angabe gemacht, dass nur dann die Schaftquerschnittsfläche  $A$  in der Formel angewendet werden darf, wenn ein Mindestabstand  $x$  erreicht ist, den der Schraubenschaft über die Scherfuge hinausragt. [13]

$$x = \max\{0,1 * d; 0,5 * t_2\} \quad (3.22)$$

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_V * f_{ub} * A_{(s)}}{\gamma_{M2}} \quad (3.23)$$

$x$	Abstand zwischen Übergangsbereich der Schraube und Scherfuge [mm]
$d$	Schaftdurchmesser der Schraube [mm]
$t_2$	Abstand Scherfuge und Mutter [mm]
$F_{v,Rd}$	Grenzabscherkraft je Scherfuge und Schraube [N]
$\alpha_V$	Parameter zur Berücksichtigung der Schraubenfestigkeit [-]
$f_{ub}$	Zugfestigkeit des Schraubenwerkstoffes [N/mm <sup>2</sup> ]
$A_{(s)}$	Schaftquerschnittsfläche der Schraube bzw. Spannungsquerschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]
$\gamma_{M2}$	Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchung von Querschnitten bei Bruchversagen infolge von Zugspannungen [-]

Um die Gleichung 3.22 etwas verständlicher zu machen, zeigt Abbildung 3-8 die genauen geometrischen Abmessungen und Variablen der Schraube. Dabei sind  $t_1$  und  $t_2$  die jeweiligen Blechdicken,  $l_s$  die Gesamtlänge des Schraubenschaftes und mit 1 wurde die Scherfuge zwischen den Blechen markiert. [13]

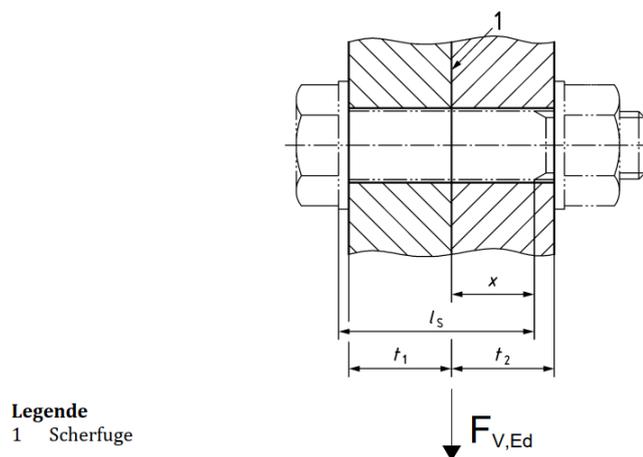


Abbildung 3-8: Abstand Scherfuge und Übergangsbereich in einer Scherverbindung (in Anlehnung an [13], S. 49)

### 3.2.2 Lochleibung

Der Nachweis der Lochleibung sieht in prEN 1993-1-8 [13] wie folgt aus:

$$F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd} \quad (3.24)$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_m * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} \quad (3.25)$$

Am Rand liegende Schrauben  $\alpha_b = \min \left\{ \frac{e_1}{d_0}; 3 * \frac{f_{ub}}{f_u}; 3,0 \right\} \quad (3.26)$

Innen liegende Schrauben  $\alpha_b = \min \left\{ \frac{p_1}{d_0} - \frac{1}{2}; 3 * \frac{f_{ub}}{f_u}; 3,0 \right\} \quad (3.27)$

$F_{v,Ed}$	Vorhandene Abscherkraft je Schraube und je Bauteil [N]
$F_{b,Rd}$	Grenzlochleibungskraft je Schraube und je Bauteil [N]
$\alpha_b$	Parameter zur Berücksichtigung der Schraubenlage und Kraftrichtung [-]
$f_{ub}$	Zugfestigkeit des Schraubenwerkstoffes [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_u$	Zugfestigkeit der Stahlsorte [N/mm <sup>2</sup> ]
$d$	Schaftdurchmesser der Schraube [mm]
$t$	Bauteildicke [mm]
$d_0$	Lochdurchmesser für eine Schraube [mm]
$e_1 / p_1$	Rand- und Innenabstand der Schrauben innerhalb eines Schraubenanschlusses [mm]
$k_m$	Werkstoffbezogener Anminderungsbeiwert [-]

Der werkstoffbezogene Abminderungsbeiwert  $k_m$  ist bei Stahlsorten von S 235 bis S420 gleich 1. Bei den Stahlsorten, die größer oder gleich S460 sind, wird die Lochleibungsfestigkeit mit einem Beiwert von 0,9 abgemindert. [13] Der Beiwert  $\alpha_b$  bezieht den Abstand der Schrauben zueinander und den Abstand zu Rändern in die Berechnung mit ein. Der Beiwert kann maximal einen Wert von 3 erreichen. Vorausgesetzt wird, dass die Abstände den Regeln nach Kapitel 5.6 der prEN 1993-1-8 [13] entsprechen und kein Zugversagen im Nettoquerschnitt oder kein Blockversagen auftritt. [56]

Der Lochleibungswiderstand für Randschrauben sollte nach [13] für normale Bleche die Größe nach 5.26 nicht überschreiten. Diese Gleichungen 3.28 und 3.29 sind zudem für spezielle Fälle, wie Exzentrizität von Anschlüssen oder Winkeln gültig.

## Mit einer Schraube

$$N_{u,Rd} = \frac{2,0 * (e_2 - 0,5 * d_0) * t * f_u}{\gamma_{M2}} \quad (3.28)$$

## Mit mehreren Schrauben

$$N_{u,Rd} = \min \left( \frac{0,75 * A_{net} * f_u}{\gamma_{M2}}; V_{eff,1,Rd} \right) \quad (3.29)$$

$N_{u,Rd}$	Tragfähigkeit einseitig angeschlossener Winkel oder unsymmetrischer Bauteile unter Zugbeanspruchung [N]
$e_2$	Randabstand der Schrauben innerhalb eines Schraubenanschlusses [mm]
$d_0$	Lochdurchmesser für eine Schraube [mm]
$t$	Bauteildicke [mm]
$f_u$	Zugfestigkeit der Stahlsorte [N/mm <sup>2</sup> ]
$A_{net}$	Netto-Querschnittsfläche des Winkels oder angeschlossenen asymmetrischen Bauteils [mm <sup>2</sup> ]
$V_{eff,1,Rd}$	Widerstand gegen Blockversagen [N]

Nach prEN 1993-1-8 [13] können für den Entwurf von geschraubten Stahlverbindungen nun zwei Regeln verwendet werden, zum einen die Regel der Duktilität und zum anderen die Regel der Lochleibungsverformungen. [56]

Wenn die Duktilität, also die plastische Verformbarkeit, eines Stahlbauanschlusses von der Lochleibungsverformung abhängt, soll von einer Lochleibungstragfähigkeit von 80 Prozent ausgegangen werden. Dies ist notwendig, da ab einer 0,8-fachen Lochleibungsfestigkeit das Fließen fortschreitet und das Stahlblech am Schraubenrand plastifiziert. Die Duktilität der geschraubten Stahlverbindung ist dann sichergestellt, wenn der Abschertragfähigkeit der Schraube größer als der 80%ige Lochleibungswiderstand ist. Dies ist besonders bei der Verwendung von hochfesten Stählen zu beachten, da diese eine geringere Duktilität als normalfeste Stähle aufweisen. [13, 56]

Die zweite Regel ist die Begrenzung von Lochleibungsverformungen. Sollte eine Begrenzung notwendig sein, um z.B. eine Verbindung für eine Wiederverwendung auszulegen, kann der Beiwert  $\alpha_b$  mit dem Beiwert  $\alpha_{b,red}$  ersetzt werden. [13]

$$\alpha_{b,red} = \min(0,8 * \alpha_b; 2,0) \quad (3.30)$$

Zuletzt regelt die prEN 1993-1-8 [13] auch den Umgang mit resultierenden Kräften auf Schrauben, die weder parallel noch rechtwinklig zum Blechrand wirken.

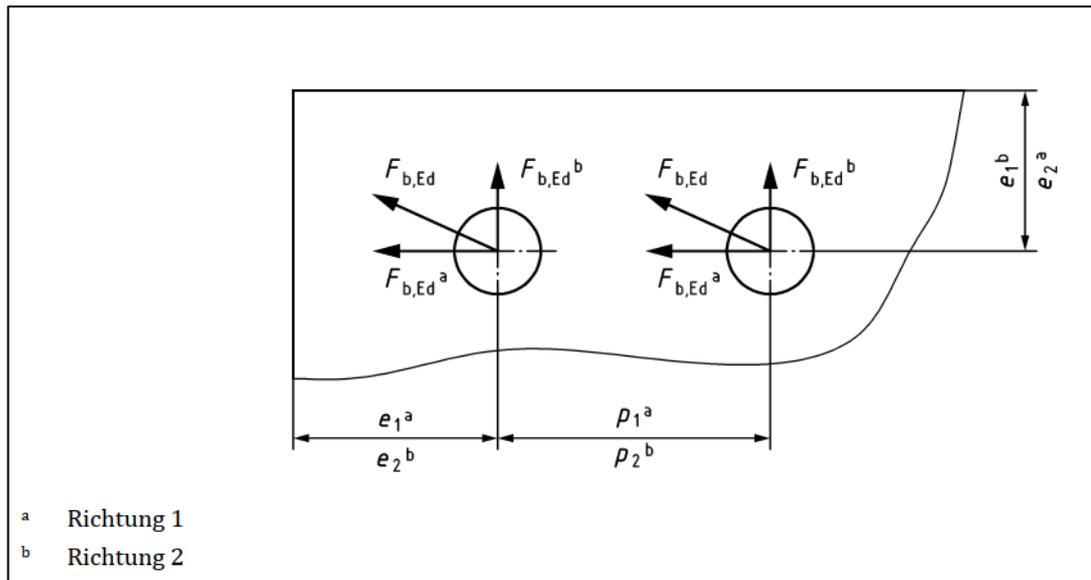


Abbildung 3-9: Einwirkende Lochleibungskraft in zwei Richtungen ([13], S. 50)

Die Kraft wird, wie in Abbildung 3-9 dargestellt, in orthogonale Anteile aufgeteilt und die Lochleibungstragfähigkeit muss die Gleichung 3.31 nach [13] erfüllen. In der Abbildung sind mit a und b die jeweilige Richtung der angreifenden Kräfte gekennzeichnet. Dabei steht a für die horizontal wirkende Kraft und die Richtung 1 und b für die vertikal wirkende Kraft und die Richtung 2. Greifen die Kräfte horizontal an, sind unter den Schraubenlöchern die Abstände  $e_1$  und  $p_1$  angegeben und links von den Schrauben der Abstand  $e_2$ . Für die vertikal angreifenden Kräfte sind unten die Abstände  $e_2$  und  $p_2$  und links der Randabstand  $e_1$  eingezeichnet. [13]

$$\left[ \frac{F_{b,Ed}^{(1)}}{F_{b,Rd}^{(1)}} \right]^2 + \left[ \frac{F_{b,Ed}^{(2)}}{F_{b,Rd}^{(2)}} \right]^2 \leq 1,0 \quad (3.31)$$

In der Gleichung 3.31 wird zwischen den Lochleibungswiderständen  $F_{b,Rd}^{(1)}$  und  $F_{b,Rd}^{(2)}$  unterschieden. Die Zahlen stehen für die oben gekennzeichneten Richtungen 1 und 2. Für beide Richtungen wird jeweils der Lochleibungswiderstand nach Gleichung 3.25 berechnet. Die einwirkenden Abscherkräfte  $F_{b,Ed}^{(1)}$  und  $F_{b,Ed}^{(2)}$  werden ebenfalls für die Richtungen 1 und 2 separat angegeben. [13]

### 3.2.3 Zug und Durchstanzen

Die Gleichungen für den Nachweis auf Zug ändern sich nicht zu den Gleichungen 3.10 und 3.11 dieser Arbeit. Jedoch wird eine zusätzliche Anmerkung zu den Senkschrauben gegeben. Sollten die Senkschrauben den maßgebenden Normen entsprechen, muss die Zugtragfähigkeit für diese nicht mit einem  $k_2$  Beiwert von 0,63 abgemindert werden, sondern kann, wie bei den normalen Schrauben mit 0,9 angenommen werden. [13]

Bei dem Nachweis auf Durchstanzen wurde hingegen eine zusätzliche Formel für Senkschrauben eingeführt. Die Gleichung für diese lautet nach [13] wie folgt:

$$B_{p,Rd} = \frac{0,3 * \pi * (d_0 + t_p) * t_p * f_u}{\gamma_{M2}} \quad (3.32)$$

$B_{p,Rd}$	Grenzdurchstanzkraft [N]
$d_0$	Lochdurchmesser für eine Schraube [mm]
$f_u$	Zugfestigkeit der Stahlsorte [N/mm <sup>2</sup> ]
$t_p$	Blechdicke unter dem Schraubenkopf [mm]
$\gamma_{M2}$	Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchung von Querschnitten bei Bruchversagen infolge von Zugspannungen [-], $\gamma_{M2} = 1,25$

Für alle anderen Schrauben sind die Gleichungen 3.12 und 3.13 weiterhin gültig.

### 3.2.4 Kombination von Scher-/Lochleibung und Zug

Für den Nachweis der Kombination von Scher-/Lochleibung und Zug ist weiterhin die Gleichung 3.14 maßgebend. In der prEN 1993-1-8 [13] wurde jedoch eine Einschränkung hinzugefügt. Demnach ist die Gleichung 3.14, der Nachweis auf Scher- und Lochleibung und Zug, nur dann gültig, wenn Gleichung 3.10, der Nachweis auf Zug, ebenfalls erfüllt ist. [13]

### 3.2.5 Blockversagen von Schraubengruppen

Der Nachweis des Blockversagens von Schraubengruppen wird nach prEN 1993-1-8 [13] im Folgenden beschrieben.

$$N_{Ed} \leq V_{eff,1,Rd} \quad (3.33)$$

Schraubengruppe mit gleichmäßigen zugbeanspruchten Bereichen

$$V_{eff,1,Rd} = \left[ A_{nt} * f_u + \min \left( \frac{A_{gv} * f_y}{\sqrt{3}}; \frac{A_{nv} * f_u}{\sqrt{3}} \right) \right] / \gamma_{M2} \quad (3.34)$$

$$V_{Ed} \leq V_{eff,2,Rd} \quad (3.35)$$

Schraubengruppe mit ungleichmäßigen zugbeanspruchten Bereichen

$$V_{eff,2,Rd} = \left[ 0,5 * A_{nt} * f_u + \min \left( \frac{A_{gv} * f_y}{\sqrt{3}}; \frac{A_{nv} * f_u}{\sqrt{3}} \right) \right] / \gamma_{M2} \quad (3.36)$$

$V_{eff,i,Rd}$	Widerstand gegen Blockversagen [N]
$N_{Ed}$	Vorhandene Zugbeanspruchung [N]
$V_{Ed}$	Vorhandene Schubbeanspruchung [N]
$f_u$	Zugfestigkeit der Stahlsorte [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_y$	Fließfestigkeit der Stahlsorte [N/mm <sup>2</sup> ]
$A_{nt}$	Zugbeanspruchte Nettoquerschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]
$A_{gv}$	Schubbeanspruchte Bruttoquerschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]
$A_{nv}$	Schubbeanspruchte Nettoquerschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]
$\gamma_{M2}$	Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchung von Querschnitten bei Bruchversagen infolge von Zugspannungen [-]

Auch in diesem Nachweis wird zwischen den zwei Beanspruchungsarten einer Schraubengruppe unterschieden. Dabei wird zum einen die gleichmäßige Zugbeanspruchung der Schraubengruppe betrachtet und zum anderen die ungleichmäßige Beanspruchung. Es wird auch hier zwischen den beiden Beanspruchungsarten unterschieden, weil je nach Beanspruchungsart unterschiedliche Querschnittsflächen für das Blockversagen angesetzt werden, bzw. versagen. [13] In den folgenden Abbildungen sind beide Beanspruchungen mit Beispielen dargestellt.

In der Abbildung 3-10 ist die gleichmäßige Zugbeanspruchung der Schraubengruppen dargestellt. Dabei wird sowohl die Belastung aus Zug, aber auch aus Schub dargestellt. Die Belastung ist konstant zwischen den einzelnen Schrauben. Bei den Querschnittsflächen wird zwischen der zugbeanspruchten und der schubbeanspruchten Netto-Querschnittsfläche differenziert. Zudem wird ein Vergleich zwischen warmgewalzten und geschweißten Querschnitten gemacht. [13]

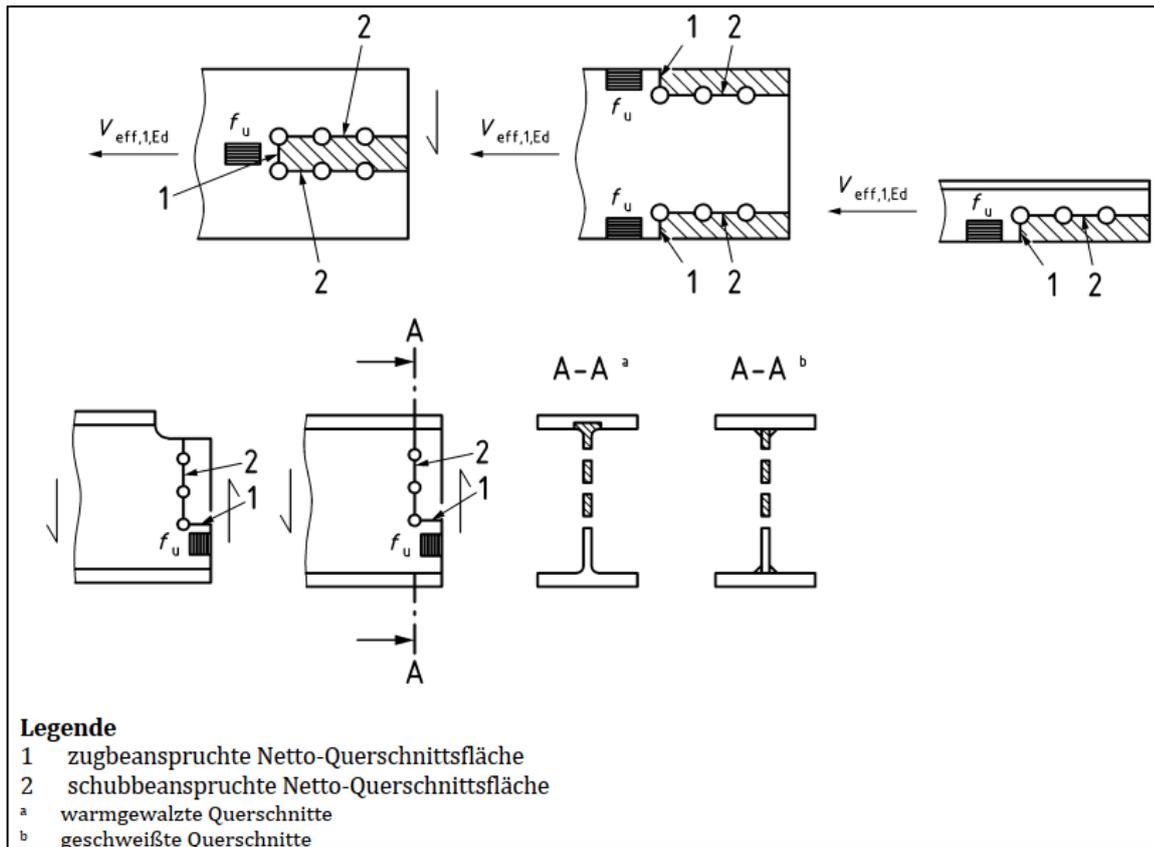


Abbildung 3-10: Blockversagen bei gleichmäßigen zugbeanspruchten Bereichen ([13],56)

Bei der Abbildung 3-11 wird das Blockversagen von Schraubengruppen mit ungleichmäßigen zugbeanspruchten Bereichen dargestellt. Hier verläuft die Beanspruchung nicht konstant, sondern steigt linear von Schraube zu Schraube an. Es wird auch zwischen den zugbeanspruchten und schubbeanspruchten Netto-Querschnittsflächen unterschieden. Mit 1 werden die zugbeanspruchten und mit 2 die schubbeanspruchten Querschnittsflächen gekennzeichnet. Zudem wird zwischen warmgewalzten Querschnitten, mit a markiert, und geschweißten Querschnitten, mit b markiert, differenziert. Die ungleichmäßige Schraubenbeanspruchung ergibt sich hier durch unsymmetrische Querschnitte und ungleichmäßige Rand- oder Schraubenabstände, die z.B. teilweise nur am oberen Bereich eines Trägers angeordnet sind. [13]

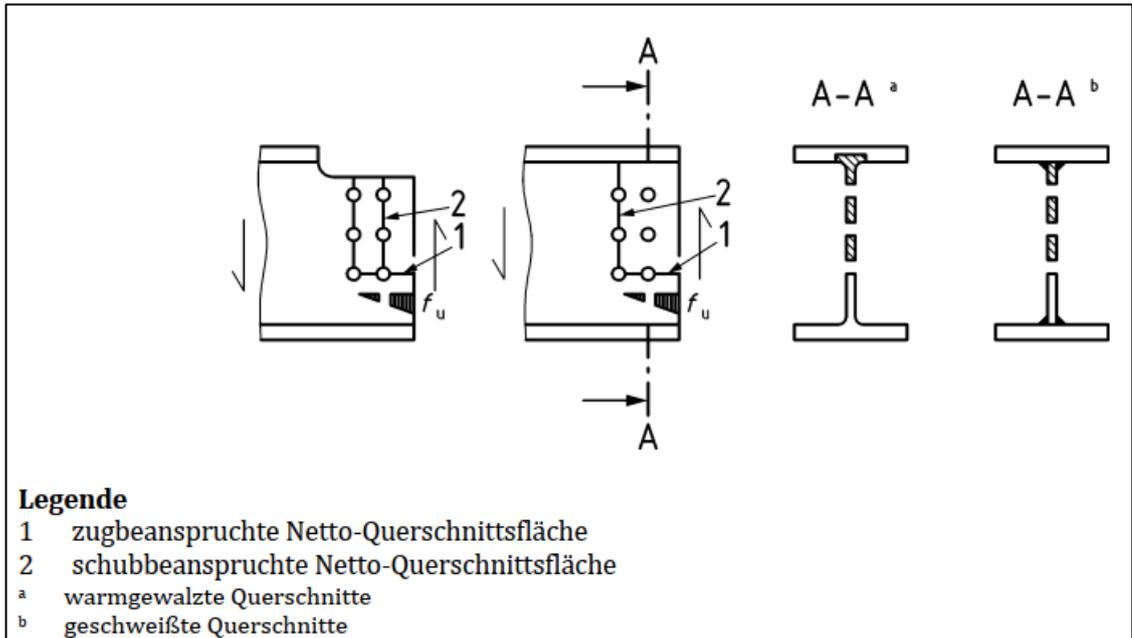


Abbildung 3-11: Blockversagen bei ungleichmäßigen zugbeanspruchten Bereichen ([13],56)

### 3.3 Vergleich Bemessungskonzepte

Der erste große Unterschied zwischen der DIN EN 1993-1-8 [18] und dem Entwurf prEN 1993-1-8 [23] liegt in der Erweiterung der Stahlsorten auf die hochfesten Stahlsorten S500, S550, S600, S620, S650, S690 und S700. Die DIN EN 1993-1-8 [18] wurde zwar durch die DIN EN 1993-1-12 [17] auf hochfeste Stähle ergänzt, jedoch wurden hier lediglich die Angabe gemacht, dass hochfeste Stahlsorten nur für Anschlüsse der Kategorie C verwendet werden sollen. [17] Durch die Erweiterung der Verwendung von hochfeste Stahlsorten auf alle Anschlusskategorien, wird vor allem die Bemessung von Hochhäusern, Brücken und Bauteilen mit großen Spannweiten, bei denen oft hochfeste Stähle verwendet werden, einfacher. Für sie gelten mit der Einführung der prEN 1993-1-1 [23] und prEN 1993-1-8 [13] ebenfalls allgemeine Bemessungsregeln und die Verwendung muss nicht über Zulassungen im Einzelfall geregelt werden. Die hochfesten Stähle sind eine gute Alternative gegenüber den normalfesten Stählen, da sie z.B. bei Zugbeanspruchung mit deutlich kleineren Querschnitten und somit geringerem Gewicht auf die gleichen Widerstände kommen. Durch diese Änderung wird den ausführenden Ingenieuren die Bemessung solcher Stähle vereinfacht, da so der Einsatz und die Verwendung von den hochfesten Stählen für sie einfacher wird und es keine Genehmigung im Einzelfall mehr benötigt. [64, 13, 23]

Neben der Stahlgüte ist im Allgemeinen festzuhalten, dass die Einordnung von Schraubverbindungen und die Angaben der zugehörigen Nachweise teilweise geändert wurden. Für einzelne Anschlusskategorien sind Nachweise entfallen, da diese nicht maßgebend werden oder gar nicht auftreten. Dies betrifft besonders die Schrauben nach Kategorie C, bei denen die Nachweise auf Abscheren der Schraube und Lochleibung des Stahlbleches entfallen. [13] Auch hier wurde die Absicht verfolgt die Nachweise einfacher zu gestalten, um die Berechnung und Bemessung von den Stahlanschlüssen schneller und einfacher zu machen.

Betrachtet man neben den allgemeinen Regelungen für Stahlverbindungen die einzelnen Nachweise, ist festzuhalten, dass es bei den Nachweisen auf Abscheren, Zug, Durchstanzen und bei der Kombination aus Abscheren und Zug nur geringe Abweichungen gibt. Die neue Fassung wurde vielmehr dazu genutzt, um mögliche Missverständnisse und Unklarheiten, die bei der aktuell gültigen DIN EN 1993-1-8 [18] auftreten, auszuräumen. So wurden bei dem Nachweis auf Abscheren geometrische Kenngrößen genauer erläutert und geregelt, für welche Schraubverbindungen dieser Nachweis zulässig ist. Bei den zugbeanspruchten Verbindungen wurden sowohl bei dem Nachweis auf Zug als auch bei dem Nachweis des Durchstanzens der Sonderfall der Senkschrauben genauer erläutert und separate Nachweise und Kenngrößen eingeführt. Bei jedem dieser drei Nachweise bleiben die ursprünglichen Formeln jedoch bestehen. [13]

Dem gegenüber stehen jedoch der Nachweis auf Lochleibung und der Nachweis auf Blockversagen von Schraubengruppen.

Um eine bessere Übersicht über den Nachweis auf Lochleibung und die Unterschiede zu geben, werden die einzelnen Formeln für den Lochleibungsnachweis in der Tabelle Tab. 3-4 gegenübergestellt.

Tab. 3-4: Gegenüberstellung Nachweis Lochleibung DIN EN 1993-1-8 [18] und prEN 1993-1-8 [13]

	DIN EN 1993-1-8 [18]	prEN 1993-1-8 [13]
<u>Allgemeine Formel</u>	$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}}$ $\alpha_b = \min \left\{ \alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right\}$	$F_{b,Rd} = \frac{k_m * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}}$ <p>Normalfeste Stahlgüte:  <math>k_m = 1,0</math>  Hochfeste Stahlgüte:  <math>k_m = 0,9</math></p>
<u>Am Rand liegende Schrauben</u>	<p>In Krafrichtung:</p> $\alpha_d = \frac{e_1}{3 * d_0}$ <p>Quer zur Krafrichtung:</p> $k_1 = \min \left\{ 2,8 * \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 1,4 * \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\}$	$\alpha_b = \min \left\{ \frac{e_1}{d_0}; 3 * \frac{f_{ub}}{f_u}; 3,0 \right\}$
<u>Innen liegende Schrauben</u>	<p>In Krafrichtung:</p> $\alpha_d = \frac{p_1}{3 * d_0} - \frac{1}{4}$ <p>Quer zur Krafrichtung:</p> $k_1 = \min \left\{ 1,4 * \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\}$	$\alpha_b = \min \left\{ \frac{p_1}{d_0} - \frac{1}{2}; 3 * \frac{f_{ub}}{f_u}; 3,0 \right\}$

Bei dem Nachweis der Lochleibung ist die größte Änderung, dass nicht mehr zwischen quer zur Krafrichtung und in Krafrichtung unterschieden wird. Die Gleichung für den Lochleibungswiderstand in der neuen Fassung ist lediglich davon abhängig, ob die Schrauben am Rand oder Innen liegen. Der maximal mögliche Faktor, also die Summe aus den Kennwerten  $\alpha_b$  und  $k_1$  bzw.  $k_m$ , der sich über die Schraubenanordnung ergibt und bisher möglich war, wurde von 2,5 auf 3,0 erhöht. Der maximale Widerstand aus Lochleibung erhöht sich somit automatisch im prEN 1993-1-8 [13].

Da die bisher gültigen Formeln des Nachweises auf Lochleibung nicht auf die hochfesten Stahlgüten übertragbar waren, bzw. nur auf die Anschlüsse der Kategorie C, wurde ein zusätzlicher Beiwert  $k_m$  eingeführt, durch den der Widerstand von hochfesten Stählen um ca. 10% verringert wird. [17, 13]

Sowohl in der DIN EN 1993-1-8 [18] als auch im Entwurf prEN 1993-1-8 [13] werden die Sonderfälle für Winkel und exzentrisch belastete Anschlüsse untersucht. Der Unterschied zwischen den beiden Bemessungskonzepten liegt darin, dass im prEN 1993-1-8 [13] die Nachweise mit dem Lochleibungsnachweis für Schrauben die am Rand liegen in Verbindung gebracht wird. Es wird festgelegt, dass Randschrauben maximal den Lochleibungswiderstand nach Gleichung 3.28 besitzen. Dies entspricht der Tragfähigkeit für eine Schraube an einem Winkelprofil oder einem Anschluss mit exzentrischer Belastung. [13]

Eine zusätzliche Änderung stellt die Berücksichtigung von zwei Krafrichtungen auf den Lochleibungsnachweis, mit Gleichung 3.31 in dieser Arbeit dar. Sie regelt den Einfluss von Kräften, die weder parallel noch rechtwinklig zu dem Blechrand wirken. Vorherige Unklarheiten bzgl. der Berechnung des Lochleibungswiderstandes sollen somit beseitigt werden. [13]

Einen sehr großen Unterschied bei der Berechnung der Lochleibung zwischen der DIN EN 1993-1-8 [18] und prEN 1993-1-8 [13] bildet die Berücksichtigung der Lochleibungsverformung des Bleches. Sollte eine Begrenzung der Lochleibungsverformungen notwendig werden, kann der Beiwert  $\alpha_b$  mit dem Beiwert  $\alpha_{b,red}$  getauscht werden. Dieser ist der Gleichung 3.30 dieser Arbeit zu entnehmen. [13]

Durch die Reduktion des Beiwerts  $\alpha_b$  wird die Lochleibungsverformung des Schraubenlochs auf  $u = d/6$  begrenzt. [13] Bei der Berechnung des  $\alpha_{b,red}$ -Beiwertes wurde besonders das plastische Verhalten des Stahlbleches bei der Lochleibung mit berücksichtigt. Dies hängt vorwiegend mit der Einbettung der Schraube in das Blech zusammen, da diese zu einem lokalen Fließen an dem Schraubenloch führt. [56]

Das Prinzip der Lochleibungsverformung ist der Abbildung 3-12 zu entnehmen.

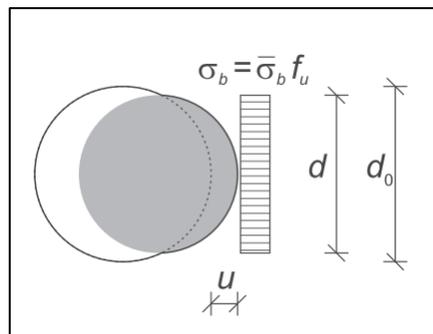


Abbildung 3-12: Prinzip Lochleibungsverformung ([56], S. 3)

Dabei ist  $\bar{\sigma}$  die normierte Lochleibungsspannung bzw. Einbettung der Schraube,  $f_u$  die Werkstofffestigkeit,  $u$  die Deformation des Schraubenlochs,  $d$  der Durchmesser der Schraube und  $d_0$  der Durchmesser des Schraubenlochs. [56] Um das Prinzip der Einbettung einer Schraube genauer zu verstehen, kann zudem Abbildung 3-13 herangezogen werden.

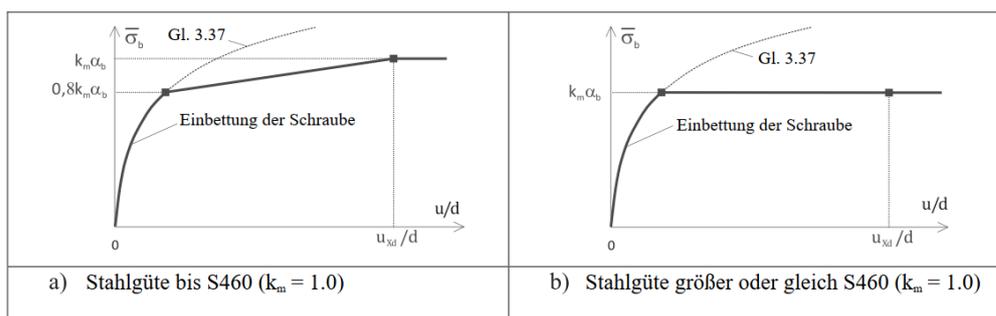


Abbildung 3-13: Lochleibungsverformungen der Stahlwerkstoffe (in Anlehnung an [56], S. 4)

In der Grafik wird die Auswirkung der Einbettung dargestellt. Dabei ist auf der Abszisse das Verhältnis  $u/d$  dargestellt. Hierbei handelt es sich um die normierte Schraubenlochdeformation. Auf der Ordinate ist wieder die normierte Lochleibungsspannung  $\bar{\sigma}$  abgebildet. Mit der Bezeichnung Gleichung 3.37 ist die Funktion der Einbettung gekennzeichnet und mit

der hervorstechenden schwarzen Linie ist das Einbettungsverhalten der Schraube eingezeichnet. [56]

Die Funktion der Einbettung lautet nach [56] wie folgt:

$$\bar{\sigma}_b = \frac{126 * u/d}{(1 + \sqrt{30 * u/d})} \quad (3.37)$$

Diese Funktion beschreibt das Einbettungsverhalten der Schraube bis zu 80% des Lochleibungswiderstandes bei einer Stahlgüte bis zu S460. Ab einer Stahlgüte von S460 oder höher wird der volle Lochleibungswiderstand erreicht. Danach kann davon ausgegangen werden, dass das Material vor der Schraube fließt und ein rein plastisches Verhalten ansetzen werden kann. Das bedeutet, dass es bei den Stahlgüten kleiner als S460 zu einem linearen Deformationsverhalten und großen Verschiebungen kommt, bis der maximale Lochleibungswiderstand erreicht ist. Bei höheren Stahlgüten gibt es nur noch Verformungen, der Widerstand wird dabei jedoch nicht weiter erhöht. [56] Dies lässt sich mit dem  $f_u/f_y$ -Verhältnis der Stahlsorten begründen. Je höher die Stahlgüte, desto geringer wird das Verhältnis zwischen Zugfestigkeit und Fließfestigkeit des Stahls. Liegt das Verhältnis bei der Stahlgüte S235 noch bei einem Wert von 1,53, so hat es bei der Stahlgüte S700 lediglich einen Wert von 1,07. Der Spannungsbereich, in dem der Stahl fließt, wird mit Erhöhung der Stahlgüte immer geringer. [21]

Der Nachweis der Lochleibung wurde somit zum einen vereinfacht, denn Zwischenrechnungen, die den Beiwert  $k_1$  betreffen, entfallen und der Nachweis wird schlanker. Zum anderen wurden bisherige Unklarheiten beseitigt, in dem Sonderfälle eingebaut wurden oder Nachweise generell besser erläutert wurden. Es ist auch hier zu erkennen, dass die Anwendung auch mit diesen Änderungen vereinfacht werden soll.

Der letzte zu führende Nachweis von geschraubten Stahlverbindungen in der DIN EN 1993-1-8 [18] ist der Nachweis des Blockversagens. Ähnlich wie der Nachweis der Lochleibung wurde dieser in dem Entwurf für die neue Fassung deutlich verändert, im Allgemeinen ist der Nachweis deutlich präsenter geworden, als er es in der bisher gültigen Form ist. Dies liegt an der Tatsache, dass der Nachweis auf Blockversagen bei der DIN EN 1993-1-8 [18] erst kurz vor Fertigstellung hinzugefügt worden ist und es keine statistischen Ausarbeitungen gab, wie sich dieser Nachweis mit den anderen Nachweisen einer geschraubten Stahlverbindung verhält. [54]

Dieser Missstand sollte in der zweiten Generation des Eurocodes beseitigt werden. Der Nachweis des Blockversagens wird daher schon in der Übersicht der Anschlusskategorien aufgeführt und bei den Anschlusskategorien A und B als allgemeiner Berechnungsnachweis eingeführt. Zudem wird festgelegt, dass der Widerstand von exzentrischen Anschlüssen oder einseitig angeschlossene Winkel niemals größer als der Widerstand des Blockversagens wird. [13]

Neben der Gewichtung des Nachweises und der Kombination mit anderen Verbindungsmittelnachweisen, hat sich zudem der grundlegende Aufbau des Nachweises geändert.

Es wird weiterhin zwischen symmetrischer Belastung und exzentrischer Belastung unterschieden, der Widerstand für den zugbeanspruchten Bereich bei einer exzentrischen Belastung wird weiterhin um 50 % abgemindert. Der größte Unterschied besteht in den verwendeten Sicherheitsfaktoren. In dem Blockversagensnachweis der aktuellen DIN EN

1993-1-8 [18] wird sowohl der Sicherheitsfaktor  $\gamma_{M0}$  als auch der Sicherheitsfaktor  $\gamma_{M2}$  verwendet. Der Faktor  $\gamma_{M0}$  ist dabei mit der Fließfestigkeit  $f_y$  verbunden und der Faktor  $\gamma_{M2}$  mit der Zugfestigkeit  $f_u$ . In der prEN 1993-1-8 [13] entfällt der  $\gamma$ -Faktor  $\gamma_{M0}$  hingegen und der gesamte Nachweis wird lediglich mit  $\gamma_{M2}$  geführt. Die Fließfestigkeit  $f_y$  wird hier auch mit  $\gamma_{M2}$  verknüpft. Der Nachweis wird somit nicht als normaler Querschnittsnachweis, sondern komplett als Verbindungsmittelnachweis behandelt.

In den letzten Jahrzehnten wurde sehr viel Forschung bzgl. des Blockversagensnachweis getrieben und es wurde erkannt, wie wichtig dieser Nachweis ist und dass er im Zweifel auch oft maßgebend sein kann. Dieses Verständnis wird mit der Handhabung des Blockversagens im Entwurf prEN 1993-1-8 [13] deutlich. [56]

## 4 Grundlagen der statistischen Auswertung

Ziel dieser Arbeit ist es das Bemessungskonzept des Lochleibungsnachweises nach DIN EN 1993-1-8 [18] statistisch auszuwerten. Im Anschluss solle dies mit der statistischen Auswertung des neuen Bemessungskonzepts des Entwurfs prEN 1993-1-8 [13] verglichen werden. Es ist darauf hinzuweisen, dass im Rahmen dieser Arbeit keine Versuche zu dem Lochleibungsnachweis geführt wurden. Als Eingangsdaten und für die Bestimmung des Bemessungsmodells werden Versuchsergebnisse aus der Literatur verwendet. Im Folgenden wird zuerst das statistische Auswerteverfahren erläutert, mit dem beide Bemessungskonzepte ausgewertet werden. Im Anschluss wird in diesem Kapitel die Datengrundlage für die theoretischen und die experimentellen Daten erläutert.

### 4.1 Auswerteverfahren nach DIN EN 1990, Anhang D [15]

Das statistische Auswerteverfahren, welches als Grundlage für die Untersuchung der gegebenen Daten dient, ist die *Versuchsgestützte Bemessung* aus der DIN EN 1990, Anhang D [15].

Das Verfahren wird als standardisiertes Auswerteverfahren in der DIN EN 1990 [15] bezeichnet, es wird zwischen den Methoden a) und b) unterschieden. Die Methode a) ermittelt die Bemessungswerte über die Bestimmung von charakteristischen Werten, welche dann im Anschluss durch einen Teilsicherheitsbeiwert zu dividieren sind. Bei der Methode b) werden Bemessungswerte über die Berücksichtigung von Übertragungsfunktionen und der erforderlichen Zuverlässigkeit ermittelt. [15]

Für die Datensätze in dieser Arbeit wird das Auswerteverfahren nach Methode a) gewählt. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte dieses Verfahrens genauer erläutert.

Die statistischen Kenngrößen die in diesem Auswerteverfahren verwendet werden, werden entweder in den folgenden Schritten erläutert oder können dem Kapitel 2.2.1 entnommen werden.

#### 4.1.1 Schritt 1: Entwicklung einer Widerstandsfunktion

Nach der DIN EN 1990 [15] „[...] ist ein Bemessungsmodell in Form der theoretischen Widerstandsfunktion  $r_t$  für ein Bauteil oder eine Konstruktion zu entwickeln [...]“ ([15], S.107) Die Funktion  $r_t$  wird dort wie folgt definiert.

$$r_t = g_{rt}(\underline{X}) \quad (4.1)$$

Dabei sind  $\underline{X}$  alle maßgebenden Basisvariablen und  $g_{rt}$  ist die Widerstandsfunktion der Basisvariablen, die das jeweilige Bemessungsmodell darstellt. [15, 39]

#### 4.1.2 Schritt 2: Vergleich der experimentellen und theoretischen Werte

„Durch Einsetzen der wirklichen gemessenen Eigenschaften in die Widerstandsfunktion sind die theoretischen Werte  $r_{ti}$  zu bestimmen, mit denen der Vergleich mit den experimentellen Werten  $r_{ei}$  durchgeführt wird.“ ([15], S.107) Es werden in diesem Schritt demnach für jeden einzelnen Versuch die theoretischen Bemessungswerte der Tragfähigkeit  $r_{ti}$  berechnet und den experimentellen Werten gegenübergestellt. Für die theoretischen Ergebnisse

werden dabei die gemessenen geometrischen Abmessungen und die tatsächlichen Materialkennwerte verwendet. [3] Um die theoretischen und experimentellen Werte zu vergleichen, wird ein Regressionsdiagramm erstellt. Dabei werden die Wertepaare  $r_{ti}$  und  $r_{ei}$  als Punkte dargestellt. Dies ist beispielhaft in Abbildung 4-1 dargestellt.

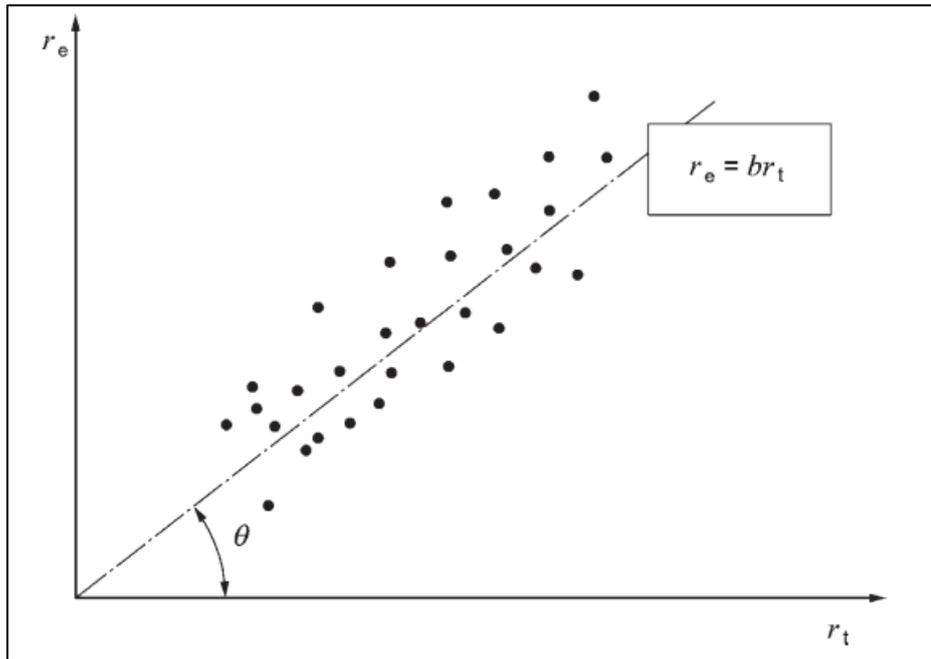


Abbildung 4-1: Regressionsdiagramm ([15] S. 107)

#### 4.1.3 Schritt 3: Abschätzung der Mittelwertkorrektur b

Nach der DIN EN 1990, Anhang D [15] ergibt sich die probabilistische Widerstandsfunktion nach der folgenden Gleichung.

$$r = b * r_t * \delta \quad (4.2)$$

Dabei stellt b die Mittelwertabweichung dar und  $\delta$  das Streumaß. Die Mittelwertabweichung b ergibt sich aus der Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeit und den theoretischen Bemessungswerten nach Gleichung 4.3. [15]

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n r_{ei} * r_{ti}}{\sum_{i=1}^n (r_{ti})^2} \quad (4.3)$$

Wenn man die Widerstandsfunktion grafisch darstellen lässt, dann ergibt sie eine Ausgleichsgerade. Diese ist ebenfalls in Abbildung 4-1 dargestellt. Wenn die theoretischen und experimentellen Werte exakt übereinstimmen würden, würde sich für den Mittelwertkorrekturbeiwert b ein Wert von 1 einstellen. Da es bei den experimentellen Tragfähigkeiten  $r_{ei}$  und den Basisvariablen X jedoch Streuungen gibt, wird der Wert b immer ungleich 1,0 sein. Der Mittelwertkorrekturfaktor sollte jedoch immer zwischen 0,85 und 1,15 liegen. [15, 3]

#### 4.1.4 Schritt 4: Abschätzung des Variationskoeffizienten des Streumaßes $\delta$

Bei dem Streumaß  $\delta$  handelt es sich um einen Kennwert, der die Modellunsicherheit eines Bemessungskonzeptes beschreibt. Dieser Kennwert soll für jeden verwendeten Versuchswert nach Gleichung 4.4 bestimmt werden. [15]

$$\delta = r_{ei}/b * r_{ti} \quad (4.4)$$

Für  $\delta$  wird eine logarithmische Normalverteilung angenommen. Mit den daraus resultierenden Streugrößen  $\Delta_i$  kann dann der Schätzwert  $\bar{\Delta}$  für den jeweiligen Mittelwert  $E(\Delta)$  berechnet werden. Beide Kennwerte werden mit den folgenden Gleichungen gegeben. [15]

$$\Delta_i = \ln(\delta_i) \quad (4.5)$$

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \Delta_i \quad (4.6)$$

Damit die Differenz zwischen dem Schätzwert und dem tatsächlichen Mittelwert so gering wie möglich gehalten wird, muss eine hohe Anzahl  $n$  an Werten berücksichtigt werden. [39]

Neben dem Schätzwert für einen Mittelwert wird auch ein Schätzwert  $s_{\Delta}^2$  für die quadrierte Standardabweichung  $\sigma_{\Delta}^2$  in dem vierten Schritt der statistischen Auswertung gebildet. Dies erfolgt nach [15] mit der folgenden Gleichung.

$$s_{\Delta}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2 \quad (4.7)$$

Als letzter Schritt kann dann der Variationskoeffizient  $V_{\delta}$  für die Streugröße  $\delta$  ermittelt werden.

$$V_{\delta} = \sqrt{\exp(s_{\Delta}^2) - 1} \quad (4.8)$$

Der Variationskoeffizient  $V_{\delta}$  kann dann als vorläufiges Maß zur Qualitätsbeurteilung der Widerstandsfunktion verwendet werden. Sollte  $V_{\delta}$  größer als 10% sein, sollte die Widerstandsfunktion angepasst werden. Mit diesem Verfahren soll vermieden werden, dass es am Ende zu große Abminderungen durch Teilsicherheitsbeiwerte gibt. [3]

#### 4.1.5 Schritt 5: Verträglichkeitsprüfung

Wenn die Streuung der Werte  $r_{ei}$  und  $r_{fi}$  so groß wird, was bedeutet, dass keine wirtschaftlichen Widerstandsfunktionen vorliegen, ist eine Verträglichkeitsprüfung des Bemessungsmodells erforderlich. In der Prüfung werden die Annahmen, welche zum Aufstellen der Widerstandsfunktion genutzt wurden, mit den theoretischen Versuchsergebnissen überprüft. [15, 3]

Um die Streuungen zwischen den theoretischen und experimentellen Werten zu verkleinern ist in [15] ein Vorschlag für die Herangehensweise entwickelt worden. Er sieht eine Verbesserung der Bemessungsfunktion durch das zusätzliche Einbringen von Parametern vor. Damit der Einfluss von diesen zusätzlichen Parametern konstant bleibt, sollen die Versuchsergebnisse in geeignete Untergruppen eingeteilt werden. So ist es möglich, eine Optimierung des Mittelkorrekturwertes  $b$  und des Variationskoeffizienten  $V_\delta$  zu erlangen. Nachteilig ist an dieser Methode jedoch, dass es durch die kleineren Versuchszahlen bei den einzelnen Auswertungen zu statistischen Unsicherheiten kommt. [15, 3]

#### 4.1.6 Schritt 6: Bestimmung der Variationskoeffizienten der Basisvariablen

Nach DIN EN 1990 [15] sieht der sechste Schritt die Bestimmung von Variationskoeffizienten  $V_{xi}$  der Basisvariablen aus den Versuchsdaten vor. Dafür muss nachgewiesen werden, dass die Versuche repräsentativ die tatsächlichen Streuungsverhältnisse abbilden. In der Regel trifft dieses jedoch nicht zu, weswegen die Variationskoeffizienten  $V_{xi}$  durch Vorinformationen bestimmt werden.

Wenn also eine ausreichend große Anzahl an Versuchsergebnissen vorliegt, kann der Variationskoeffizient  $V_{xi}$  mit Hilfe von diesen Ergebnissen bestimmt werden. Sollten jedoch nicht ausreichend viele Ergebnisse vorliegen, ist eine Ermittlung von  $V_{xi}$  aus den Messwerten nicht möglich und er muss der Literatur entnommen werden oder sinnvoll abgeschätzt werden. [3]

#### 4.1.7 Schritt 7: Bestimmung des charakteristischen Wertes $r_k$ der Widerstandsfunktion

Mit Hilfe der Variationskoeffizienten von Basisvariablen kann im Anschluss der charakteristische Wert  $r_k$  der Widerstandsfunktion ermittelt werden. Es ist dabei zu bestimmen, in welcher Form die Widerstandsfunktion  $r$  vorliegt. [15]

Liegt die Widerstandsfunktion in Produktform mit den Basisvariablen  $X_1$  bis  $X_J$  vor, wie sie in Gleichung 4.9 dargestellt ist, kann der Mittelwert  $E(r)$  nach Gleichung 4.10 und der Variationskoeffizient nach Gleichung 4.11 bestimmt werden. [15]

$$r = b * r_t = b\{X_1 \times X_2 \dots X_j\}\delta \quad (4.9)$$

$$E(r) = b\{E(X_1) \times E(X_2) \dots E(X_j)\} = b * g_{rt}(\underline{X}_m) \quad (4.10)$$

$$V_r^2 = (V_\delta^2 + 1) \left[ \prod_{i=1}^j (V_{X_i}^2 + 1) \right] - 1 \quad (4.11)$$

Der Variationskoeffizient setzt sich somit aus dem Schätzwert für den Variationskoeffizienten  $V_\delta$  für die Streugröße  $\delta$  und dem Variationskoeffizienten  $V_{X_i}$  für die Basisvariablen zusammen. Wenn die beiden Variationskoeffizienten sehr gering sind, also unter 30% liegen, kann für die Gleichung 4.11 auch die folgende Näherung nach [15] verwendet werden. [50]

$$V_r^2 = V_\delta^2 + V_{rt}^2 \quad (4.12)$$

mit

$$V_{rt}^2 = \sum_{i=1}^j V_{X_i}^2 \quad (4.13)$$

Handelt es sich bei der Widerstandfunktion  $r$  um eine komplexe Funktion in der Form nach Gleichung 4.14 kann der Mittelwert nach Gleichung 4.15 ermittelt werden und der Variationskoeffizient  $V_{rt}$  nach der Gleichung 4.16. [15]

$$r = b * r_t * \delta = b * g_{rt}\{X_1 \times X_2 \dots X_j\}\delta \quad (4.14)$$

$$E(r) = b * g_{rt}\{E(X_1) \times E(X_2) \dots E(X_j)\} = b * g_{rt}(\underline{X}_m) \quad (4.15)$$

$$V_{rt}^2 = \frac{VAR[g_{rt}(\underline{X})]}{g_{rt}^2(\underline{X}_m)} = \frac{1}{g_{rt}^2(\underline{X}_m)} \times \sum_{i=1}^j \left( \frac{\delta g_{rt}}{\delta X_i} \times \sigma_i \right)^2 \quad (4.16)$$

Der Variationskoeffizient setzt sich somit zu einem Teil aus der quadrierten partiellen Ableitung nach den Basisvariablen  $X_i$  mit der jeweiligen Standardabweichung  $\sigma_i$  zusammen, zum anderen Teil aus der Berechnung des Widerstandsmodells  $g_{rt}^2(\underline{X}_m)$ . Für dies werden die jeweiligen Mittelwerte der Basisvariablen  $X_i$  verwendet. [3]

Um die endgültigen charakteristischen Werte  $r_k$  der Widerstandfunktion zu bestimmen, werden ebenfalls zwei Fälle unterschieden. Der erste Fall geht von einer Versuchsanzahl  $n < 100$  aus. In diesem Fall lautet die Funktion für  $r_k$  nach [15] wie folgt.

$$r_k = b * g_{rt}(\underline{X}_m) \exp(-k_\infty * \alpha_{rt} * Q_{rt} - k_n * \alpha_\delta * Q_\delta - 0,5 * Q^2) \quad (4.17)$$

Der zweite Fall behandelt eine Versuchsanzahl von  $n > 100$ . Nach [15] lautet die Funktion für  $r_k$  dann.

$$r_k = b * g_{rt}(\underline{X}_m) \exp(-k_\infty * Q - 0,5 * Q^2) \quad (4.18)$$

Die für die beiden Gleichungen benötigten Standardabweichungen werden in den folgenden Gleichungen beschrieben. Dabei ist  $Q_\delta$  die Standardabweichung der Streugröße,  $Q_{rt}$  die Standardabweichung der Basisvariablen und  $Q$  die Standardabweichung der gesamten Widerstandsfunktion. Alle drei Gleichungen können ebenfalls der DIN EN 1990, Anhang D [15] entnommen werden und werden durch Angaben aus [3] ergänzt.

$$Q_{rt} = \sqrt{\ln(V_{rt}^2 + 1)} \quad (4.19)$$

$$Q_\delta = \sqrt{\ln(V_\delta^2 + 1)} \quad (4.20)$$

$$Q = \sqrt{\ln(V_r^2 + 1)} = \sqrt{\ln(V_{rt}^2 + V_\delta^2 + 1)} \quad (4.21)$$

Die zusätzlichen Kennwerte für die Gleichungen werden ebenfalls definiert. [15]

- $\alpha_{rt}$  Wichtungsfaktor für  $Q_{rt}$  [-],  $\alpha_{rt} = Q_{rt}/Q$
- $\alpha_\delta$  Wichtungsfaktor für  $Q_\delta$  [-],  $\alpha_\delta = Q_\delta/Q$
- $k_n$  Fraktilwert für den charakteristischen Wert aus Tab. 4-1 für den Fall „ $V_x$  unbekannt“ [-]
- $k_\infty$  Fraktilfaktor für  $n \rightarrow \infty$  [-],  $k_\infty = 1,64$

Die Werte für den Fraktilfaktor  $k_n$  für charakteristische Werte der 5%-Fraktile, werden aus der DIN EN 1990, Anhang D [15] entnommen und in der Tabelle festgehalten. Sie gibt Aufschluss über den jeweiligen Fraktilwert pro Versuchsanzahl. Es wird dabei unterschieden, ob der Variationskoeffizient  $V_x$  bekannt oder unbekannt ist.

Tab. 4-1: Werte  $k_n$  für charakteristischen Wert (5%-Fraktile) ([15], S.102)

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	$\infty$
$V_x$ bekannt	2,31	2,01	1,89	1,83	1,8	1,77	1,74	1,72	1,38	1,67	1,64
$V_x$ unbekannt	-	-	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

Der charakteristische Widerstandswert  $r_k$  wird für jeden einzelnen Versuch  $n$  ermittelt. So ergibt sich am Ende eine Anzahl  $n$  an Werten. [3]

#### 4.1.8 Schritt 8: Bestimmung des Bemessungswertes der Widerstandsfunktion

Nachdem der charakteristische Widerstandswert  $r_k$  ermittelt wurde, kann der Bemessungswert der Widerstandsfunktion berechnet werden. Wie bereits im vorherigen Schritt wird dabei erneut zwischen der Versuchsanzahl größer als 100 und kleiner, bzw. gleich 100 unterschieden. Siehe dazu auch die Gleichungen 4.22 und 4.23 [15]

$$n \leq 100 \quad r_d = b * g_{rt}(\underline{X}_m) \exp(-k_{d,\infty} * \alpha_{rt} * Q_{rt} - k_{d,n} * \alpha_\delta * Q_\delta - 0,5 * Q^2) \quad (4.22)$$

$$n > 100 \quad r_d = b * g_{rt}(\underline{X}_m) \exp(-k_{d,\infty} * Q - 0,5 * Q^2) \quad (4.23)$$

$k_n$  Fraktilwert für den charakteristischen Wert aus Tab. 4-2 den Fall „ $V_x$  unbekannt“ [-]

$k_\infty$  Fraktilfaktor für  $n \rightarrow \infty$  [-],  $k_\infty = 1,64$

Die einzelnen Werte für den Fraktilfaktor  $k_{d,n}$  für den Bemessungswert für Tragfähigkeitsnachweise, werden aus der DIN EN 1990, Anhang D [15] entnommen und in der folgenden Tabelle festgehalten.

Tab. 4-2: Werte  $k_n$  für charakteristischen Wert (5%-Fraktile) ([15], S.102)

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	$\infty$
$V_x$ bekannt	4,36	3,77	3,56	3,44	3,7	3,33	3,27	3,23	3,16	3,13	3,04
$V_x$ unbekannt	-	-	-	11,4	7,85	6,36	5,07	4,51	3,64	3,44	3,04

#### 4.1.9 Schritt 9: Bestimmung eines Teilsicherheitsbeiwertes

Für die Bestimmung des globalen Teilsicherheitsbeiwertes  $\gamma_M$ , wird die Differenz zwischen dem charakteristischen Wert der Widerstandsfunktion nach Kapitel 4.1.7 und dem Wert des Bemessungswiderstands nach Kapitel 4.1.8 gebildet. Die Berechnung des Teilsicherheitsbeiwertes kann Gleichung 4.24 entnommen werden. [54]

$$\gamma_M = \frac{r_k}{r_d} = \frac{\exp(-k_\infty * \alpha_{rt} * Q_{rt} - k_n * \alpha_\delta * Q_\delta - 0,5 * Q^2)}{\exp(-k_{d,\infty} * \alpha_{rt} * Q_{rt} - k_{d,n} * \alpha_\delta * Q_\delta - 0,5 * Q^2)} \quad (4.24)$$

#### 4.1.10 Schritt 10: Korrigierter Teilsicherheitsfaktor

Da die Streuungen der Materialparameter variieren, wird ein Korrekturfaktor  $k_c$  eingeführt, der den Variationskoeffizienten der Materialfestigkeit berücksichtigt. Der vorher bestimmte Teilsicherheitsbeiwert soll so an die gegebenen Verteilungen angepasst werden. In dieser Arbeit bedeutet das, dass der Variationskoeffizient von der Zugfestigkeit des Bleches berücksichtigt wird. Die Zugfestigkeit der Schrauben muss nicht näher betrachtet werden, da der Parameter in der Formel nur sicherstellen soll, dass die Zugfestigkeit des Bleches mindestens so groß wie die Zugfestigkeit der Schraube sein muss. Nach [54] werden der Korrekturfaktor  $k_c$  und der korrigierte Teilsicherheitsbeiwert wie folgt berechnet.

$$k_c = \frac{r_n}{r_k} = \frac{\exp(-2 * V_{fu} - 0,8 * V_{fu}^2)}{\exp(-k_\infty * \alpha_{rt} * Q_{rt} - k_n * \alpha_\delta * Q_\delta - 0,5 * Q^2)} \quad (4.25)$$

$$\gamma_M^* = k_c * \frac{\gamma_M}{b} \quad (4.26)$$

Neben dem Korrekturfaktor geht in den korrigierten Teilsicherheitsbeiwert auch der Mittelkorrekturbeiwert  $b$  ein. So werden nicht nur die Streuungen und die Abweichungen der Zugfestigkeit des Stahlbleches mit in den Sicherheitsfaktor eingebracht, sondern auch die Differenz zwischen den theoretischen und den experimentell ermittelten Werten. [54]

Mit dem ermittelten Teilsicherheitsbeiwert kann überprüft werden, ob ein Widerstandsmodell als sicher gilt. Liegt er unter dem in dem Berechnungsmodell gültigen Teilsicherheitsbeiwert, gilt es als sicher, liegt er oberhalb, als unsicher. Im Fall des Lochleibungsnachweises ist der verwendete Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M2} = 1,25$ , dieser gilt daher in dieser Auswertung als Zielwert. [54, 18]

## 4.2 Datengrundlage

In diesem Unterkapitel werden sowohl die theoretische Datengrundlagen für die Ermittlung des Bemessungsmodells geliefert als auch die experimentellen Datenreihen aus der Literatur vorgestellt.

### 4.2.1 Theoretische Eingangsdaten

Die theoretische Datengrundlage wird durch die Formel der Lochleibungsfestigkeit nach DIN EN 1993-1-8 [18] erstellt. Für die zweite Auswertung wird die Widerstandformel aus dem Entwurf prEN 1993-1-8 [13] verwendet. Bei beiden theoretischen Datengrundlagen werden die Eingangsdaten von den experimentellen Versuchsergebnissen verwendet, um diese anschließend vergleichen zu können. Der Vollständigkeit halber werden die Gleichungen hier erneut dargestellt. Die genauen Erläuterungen sind jedoch Kapitel 3 zu entnehmen. Zuerst folgen die Formeln der DIN EN 1993-1-8 [18]:

$$F_{b,Ed} \leq F_{b,Rd} \quad (3.3)$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} \quad (3.4)$$

$$\alpha_b = \min \left\{ \alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right\} \quad (3.5)$$

Für am Rand liegende Schrauben in Kraft-  
richtung  $\alpha_d = \frac{e_1}{3 * d_0} \quad (3.6)$

Für innen liegende Schrauben in Krafrich-  
tung  $\alpha_d = \frac{p_1}{3 * d_0} - \frac{1}{4} \quad (3.7)$

Für am Rand liegende Schrauben quer zur  
Krafrichtung  $k_1 = \min \left\{ 2,8 * \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 1,4 * \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\} \quad (3.8)$

Für innen liegende Schrauben quer zur  
Krafrichtung  $k_1 = \min \left\{ 1,4 * \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\} \quad (3.9)$

Des Weiteren folgen die Widerstandsformeln der Lochleibung nach prEN 1993-1-8 [13]:

$$F_{b,Ed} \leq F_{b,Rd} \quad (3.24)$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_m * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} \quad (3.25)$$

Am Rand liegende Schrauben  $\alpha_b = \min \left\{ \frac{e_1}{d_0}; 3 * \frac{f_{ub}}{f_u}; 3,0 \right\} \quad (3.26)$

Innen liegende Schrauben  $\alpha_b = \min \left\{ \frac{p_1}{d_0} - \frac{1}{2}; 3 * \frac{f_{ub}}{f_u}; 3,0 \right\} \quad (3.27)$

Es ist zu erwähnen, dass weder bei der Berechnung der theoretischen Werte in dieser Arbeit durch die Formeln der DIN EN 1993-1-8 [18], noch bei der Berechnung nach prEN 1993-1-8 [13] der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M2}$  mit einberechnet wird. Bei den theoretischen Eingangswerten handelt es sich rein um die charakteristischen Widerstände  $F_{b,Rk}$ .

Nachfolgend werden die theoretischen Basisgrößen, also jene Basisvariablen, die in dem Bemessungsmodell der DIN EN 1993-1-8 [18] berücksichtigt wurden, aufgeführt.

### Geometrische Basisvariablen

Die geometrischen Basisvariablen bestehen aus den Abmessungen der Stahlbleche in einer geschraubten Stahlverbindung. Die zu berücksichtigenden Werte können der Abbildung 4-2 entnommen werden.

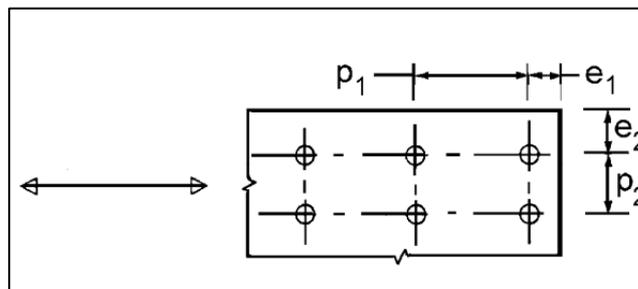


Abbildung 4-2: Bezeichnung der Lochabstände eines Stahlbleches ([18], S. 28)

Es wird zwischen den Randabständen  $e_1$  und  $e_2$  und den Lochabständen  $p_1$  und  $p_2$  unterschieden. Die tiefgestellte Eins bezeichnet dabei immer die Krafrichtung und die tiefgestellte Zwei die Richtung, die quer zur Kraft verläuft. [18]

Neben den Abständen gibt es die zusätzliche geometrische Basisvariable für den tatsächlichen Lochdurchmesser in dem Stahlblech  $d_0$ , den Schraubendurchmesser  $d$  und die Blechdicke  $t$ . [18]

Da in den meisten Versuchsergebnissen die geometrischen Kenngrößen keinen normativen Werten zugeordnet wurden, werden die geometrischen Kenngrößen nicht als Basisvariablen behandelt.

### Materielle Basisvariablen

Bei den materiellen Basisgrößen wird sowohl die Basisgröße für die Zugfestigkeit der jeweiligen Stahlsorte  $f_u$  als auch die Zugfestigkeit des Stahlwerkstoffes  $f_{ub}$ , betrachtet.

Für die statistische Auswertung werden die Kennwerte Mittelwert, Standardabweichung und Variationskoeffizient benötigt.

Die Kennwerte der Stahlsorten können der Tab. 4-3 entnommen werden, die Daten stammen aus einer Datensammlung des Instituts für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart [35]. Die unter Normativ festgehaltenen Kenngrößen entsprechen den Werten der DIN EN 1993-1-1 [18] bzw. prEN 1993-1-8 [13].

Tab. 4-3: Statistische Kenngrößen der Zugfestigkeit  $f_u$  der Stahlsorten [35]

Stahlsorte	S235	S355	S420	S460	S690	S700
Normativ [N/mm <sup>2</sup> ]	360,0	490,0	510,0	540,0	770,0	750,0
Mittelwert [N/mm <sup>2</sup> ]	424,7	538,9	569,3	607,41	845,8	863,8
Standardabweichung [N/mm <sup>2</sup> ]	17,4	35,9	15,5	36,9	32,2	59,8
Variationskoeffizient [%]	4,09	6,68	2,72	6,08	3,81	6,92
Anzahl [-]	21	203	38	120	438	60

In der Abbildung 4-3 sind die Kenngrößen aus der vorausgegangenen Tabelle, sowie die nominellen Mindestwerte nach der jeweiligen Produktnorm grafisch dargestellt.

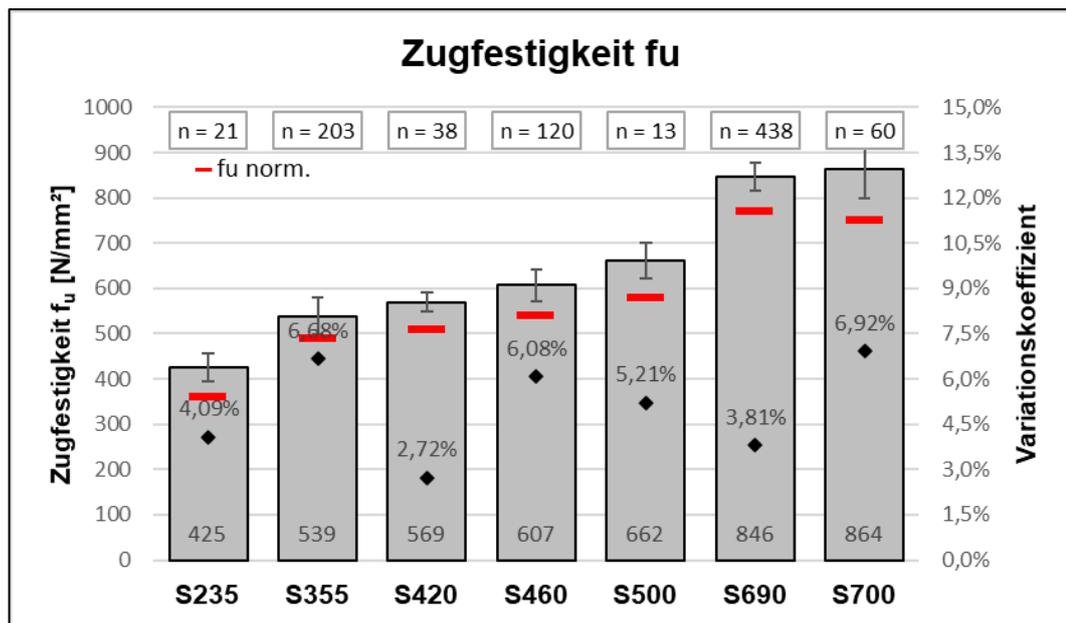


Abbildung 4-3: Statistische Verteilung der Zugfestigkeit  $f_u$  der Stahlsorten [35]

In der Grafik ist auf der Primärachse die Zugfestigkeit  $f_u$  abgebildet und auf der Abszisse sind die unterschiedlichen Stahlgüten dargestellt. Zugehörig zu der Primärachse stellen die grauen Säulen den Mittelwert inklusive ihrer Standardabweichung zu der jeweiligen Stahlgüte dar. Mit der roten Linie ist die nominelle Zugfestigkeit nach der jeweiligen Produktnorm angegeben. Auf der Sekundärachse ist der Variationskoeffizient abgebildet, welcher in dem

Säulendiagramm mit einer schwarzen Raute und dem jeweiligen Kennwert ebenfalls angegeben ist. Es ist zu erkennen, dass der Variationskoeffizient zwischen 2,72% und 6,90% schwankt. Für die weitere statistische Auswertung wird daher von einem Variationskoeffizienten von  $V_{f_u} = 0,04$  für die Zugfestigkeit der Stahlwerkstoffe ausgegangen, da dieser Wert auch in der Literatur zu finden ist. [38] Da in den Grundwerkstoffdaten die Stahlgüte S550 nicht berücksichtigt wurde und für die Berechnung der Mittelwert berücksichtigt werden muss, wird nach [64] ein Mittelwert für die Zugfestigkeit von  $f_u = 757 \text{ N/mm}^2$  angesetzt. Der normativ festgelegte Wert für  $f_u$  liegt bei  $f_u = 600 \text{ N/mm}^2$ . [23]

Die zweite materielle Basisvariable stellt die Schraubenzugfestigkeit  $f_{ub}$  dar. Die Kennwerte, wurden in der Tabelle Tab. 4-4 festgehalten und entstammen ebenfalls der Datensammlung des Instituts für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart [36]. Die unter Normativ aufgelisteten Werte entsprechen den Kenngrößen nach DIN EN 1993-1-8 [18] bzw. prEN 1993-1-8 [13].

Tab. 4-4: Statistische Kenngrößen der Zugfestigkeit  $f_{ub}$  des Schraubenwerkstoffes [36]

Schraubenfestigkeitsklasse	4.6	5.6	8.8	10.9
Normativ [ $\text{N/mm}^2$ ]	400,0	500,0	800,0	1000,0
Mittelwert [ $\text{Nmm}^2$ ]	491,0	560,0	907,4	1092,5
Standardabweichung [ $\text{N/mm}^2$ ]	42,9	51,2	50,3	63,9
Variationskoeffizient [%]	8,7	9,1	5,5	5,9
Anzahl [-]	149	22	42	90

In der Abbildung 4-4 sind die Kenngrößen aus der vorausgegangenen Tabelle sowie die nominellen Mindestwerte nach der jeweiligen Produktnorm grafisch dargestellt.

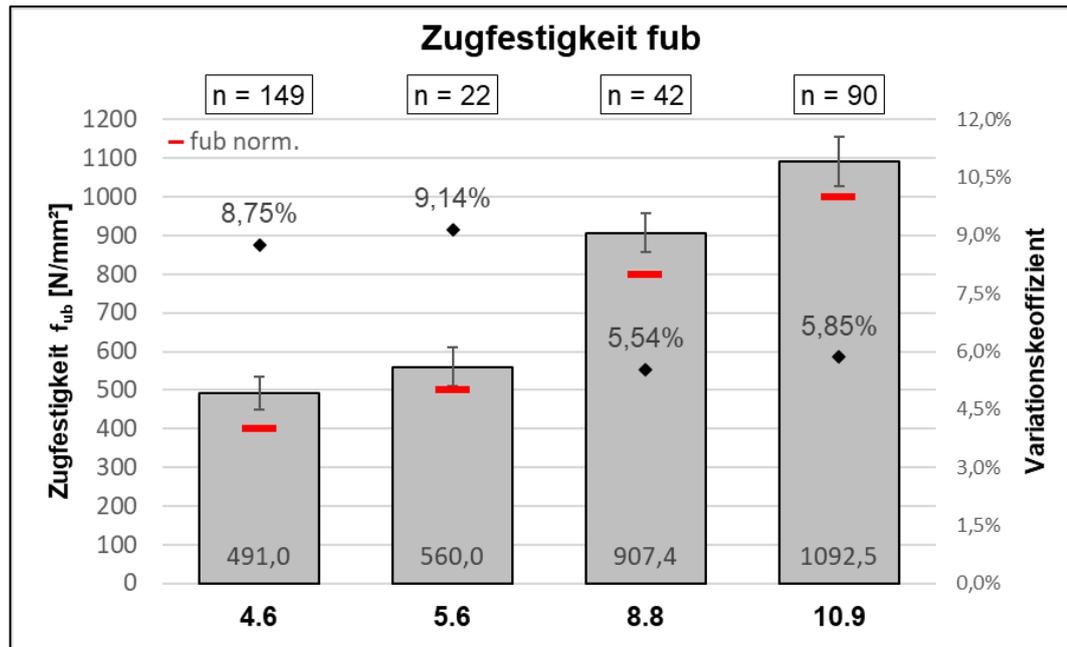


Abbildung 4-4: Statistische Verteilung der Zugfestigkeit  $f_{ub}$  des Schraubenwerkstoffes [36]

Auf der Primärachse ist die Zug- bzw. Bruchfestigkeit  $f_{ub}$  und auf der Abszisse sind die unterschiedlichen Festigkeiten von Schraubwerkstoffen dargestellt. Zugehörig zu der Primärachse stellen die grauen Säulen den Mittelwert inklusive ihrer Standardabweichung der Bruchfestigkeit zu der jeweiligen Festigkeit dar. Mit der roten Linie ist die nominelle Zugfestigkeit nach der jeweiligen Produktnorm angegeben. Auf der Sekundärachse ist der Variationskoeffizient abgebildet, welcher in dem Säulendiagramm mit einem Kreuz und dem jeweiligen Kennwert ebenfalls angegeben ist. Es ist zu erkennen, dass der Variationskoeffizient zwischen 5,5% und 9,1% schwankt. Für die weitere statistische Auswertung wird von einem Variationskoeffizienten von  $V_{f_{ub}} = 0,09$  für die Zugfestigkeit von Schraubenwerkstoffen ausgegangen, da dieser Wert auch in der Literatur verwendet wird. [4]

#### 4.2.2 Experimentelle Eingangsdaten

Für die Ermittlung eines Widerstandmodells werden Versuchsergebnisse aus der Literatur verwendet. In diesem Unterkapitel werden die verwendeten Datensätze aufgelistet und jeweils kurz erläutert.

##### Background Document EC3 [25]

Für die Erstellung des Eurocode 3 wurde im Juni 1988 eine Zusammenschrift veröffentlicht, die sowohl die Vorschläge für die Stahlbaunachweise enthält als auch die theoretischen Grundlagen, die hinter diesen Formeln stehen. Zu diesen theoretischen Grundlagen gehören, neben eigenen statistischen Auswertungen, die Ergebnisse von 16 unabhängig voneinander durchgeführten Versuchen. Das Hauptaugenmerk lag bei den Versuchen auf dem Abscheren von Schrauben und der Lochleibung von Stahlblechen. [25]

Für diese Arbeit wurden aus dem BGD [25] fünf Datensätze verwendet, da es sich bei diesen um Versuchsergebnisse zu dem Versagen auf Lochleibung handelt und bei diesen alle notwendigen Kennwerte für einen theoretischen Vergleich angegeben worden sind. Zum einen ist das der sogenannte „Report Delft 4“, bei dem es sich um Versuchsergebnisse von der „Technische Hogeschool Delft“ aus dem Jahr 1966 handelt. [43] Hier wurden 76 Stahlverbindungen, bestehend aus drei Blechen mit zwei oder vier Verbindungsmitteln, getestet. [25] Der Datensatz, der zu diesem Versuch veröffentlicht wurde, kann dem Anhang 1 dieser Arbeit entnommen werden.

Der zweite Datensatz aus dem BGD [25], der für diese statistische Auswertung verwendet wurde, ist der sogenannte „Report EDF 11“. Diese Versuchsergebnisse wurde von der „Electricité de France“ im Jahr 1979 aufgestellt. [49] Bei den Versuchen handelt es sich um ein Winkelblech, welches auf zwei Seiten mit Stahlplatten mit ein bis vier Schrauben verbunden wird. Insgesamt enthält der Report 408 Versuchsergebnisse. [25] Die Daten dieses Versuches können dem Anhang 2 dieser Arbeit entnommen werden.

Der dritte Datensatz wird „Report Cigre 12“ genannt und wurde von dem „Cigre Study Committee 22“ zur Verfügung gestellt. Der Versuchsaufbau entspricht dem des „Report EDF 11“ und enthält die Daten für Verbindungen mit einer Schraube, die nicht in dem „Report EDF 11“ bereits veröffentlicht wurden. Es handelt sich dabei um 42 Versuchsergebnisse, welche dem Anhang 3 entnommen werden können. [25]

Der vierte Datensatz ist der „Report Braunschweig 23“ und wurde von der Technischen Universität Braunschweig im Jahr 1985 veröffentlicht. [40] Der Versuch besteht aus einem Stahlblech, welches über eine Schraube mit zwei Laschen verbunden wird. [25] Die 163 Versuchsergebnisse können Anhang 4 dieser Arbeit entnommen werden.

Der letzte Datensatz, der für diese statistische Analyse aus dem BGD verwendet wurde, ist der „Report London 43“. Dieser Datensatz wurde von dem „Imperial College London“ aus dem Jahr 1976 zur Verfügung gestellt und in ihm wurden Lochleibungsnachweise für eine Verbindung mit einer Schraube durchgeführt. [25, 31] Die zehn Versuchsergebnisse dieser Experimente können Anhang 5 entnommen werden.

P. Moze und D. Beg [55]

Neben dem BGD [25] wurden für die statistische Analyse des Lochleibungsnachweises auch die Versuchsdaten von P. Moze und D. Beg verwendet. Diese haben Lochleibungsversuche mit ein und zwei Schrauben in einer Verbindung durchgeführt. Die 38 Versuchsdaten wurden aus dem Artikel „A complete study of bearing stress in single bolt connections“ [55] entnommen und in Anhang 6 zusammengefasst.

Y. Wang, Y. Lyu et al [64]

Y. Wang et al haben das Lochleibungsverhalten von Stahlblechen mit einer hochfesten Stahlgüte untersucht. Die zusammengefassten Daten der Schraubenverbindungen mit einem Verbindungsmittel sind in dem Anhang 7 festgehalten. Die 24 Versuchsergebnisse sind aus dem Artikel „Behaviour of single bolt bearing on high strength steel plate“ [64] entnommen worden.

In der folgenden Tabelle werden die Versuchsergebnisse nach der Stahlgüte und der Anzahl an Verbindungsmitteln aufgelistet. Aus den vorher aufgezählten Datenquellen wurden dabei jedoch nur die Versuchsdaten genommen, bei denen die Versagensart Lochleibung war und bei denen die geometrischen Anforderungen aus der DIN EN 1993-1-8 [18], wie Randabstände oder Schraubenabstände erfüllt wurden.

Tab. 4-5: Übersicht und Gliederung der experimentellen Datensätze

Stahlgüte	Verbindungsmittel	Gesamtanzahl n	Datenquelle	Anzahl n
S235	1	145	Rep. 4	28
			Rep. 11	34
			Rep. 12	6
			Rep. 23	66
			Moze, Beg	8
	2	76	Rep. 4	1
			Rep. 11	69
			Moze, Beg	6
	>2	39	Rep. 11	39
S275	1	20	Rep. 12	20
S355	1	20	Rep. 11	3
			Rep. 12	7
			Rep. 23	10
	2	39	Rep. 11	39
	>2	28	Rep. 11	28
S460	1	4	Rep. 23	4
S550	1	5	Wang	5
S690	1	10	Rep. 23	5
			Wang	5

Teil dieser Untersuchungen sind somit 386 Versuchsergebnisse aus sechs unterschiedlichen Stahlgüten.

## 5 Statistische Auswertung der Berechnungsmethoden

### 5.1 Allgemeines

In diesem Kapitel soll untersucht werden, wie sich die experimentell ermittelten Versuchsergebnisse zum einen zu der in der DIN EN 1993-1-8 [18] festgehaltenen normativen Tragfähigkeit für den Lochleibungsnachweis verhalten. Zum anderen wird diese mit den Ergebnissen der Lochleibungsnachweise der prEN 1993-1-8 [13] verglichen. Ziel ist es festzustellen, ob es Unzulänglichkeiten in den Widerstandsfunktionen gibt und welches Sicherheitsniveau in den Nachweisen der Lochleibung nach der DIN EN 1993-1-8 [18] und der prEN 1993-1-8 [13] herrscht.

Um das im Kapitel 4.1 beschriebene Auswerteverfahren anwenden zu können, werden im Vorhinein folgende Annahmen nach [15] getroffen:

- Die Widerstandsfunktion ist eine Funktion, die aus zueinander unabhängigen Variablen besteht
- Eine ausreichend hohe Anzahl an Versuchsergebnissen steht zur Verfügung
- Alle relevanten Größen, die verwendet werden, sind gemessene Werte
- Zwischen den Variablen der Widerstandsfunktion besteht keine Korrelation
- Alle Variablen der Widerstandsfunktion genügen einer Normalverteilung oder einer Log-Normalverteilung

Für die Auswertung wurde die Datenbasis wie in der Tabelle Tab. 4-5 in Stahlgüte und Verbindungsmittellanzahl gegliedert und eine statistische Auswertung durchgeführt. Im Weiteren werden somit zehn Untergruppen betrachtet.

Es ist zu beachten, dass in den Versuchsergebnissen, die für diese Arbeit genutzt wurden, in den meisten Fällen keine Angaben zu den Schraubenfestigkeiten gemacht wurden. Im BGD [25] wurde jedoch die Anmerkung gemacht, dass die Schraubenfestigkeit immer größer als die Zugfestigkeit des Stahlwerkstoffes sein muss. [25] In der statistischen Auswertung dieser Arbeit ist für die Berechnung des theoretischen Widerstands  $r_t$  daher immer eine Schraubenfestigkeit  $f_{ub}$  angesetzt, die größer als die jeweilige Zugfestigkeit des Stahlwerkstoffes  $f_u$  ist.

Im ersten Schritt des Auswerteverfahrens der DIN EN 1900, Anhang D [15] wird die theoretische Widerstandsfunktion festgelegt. [15] Dabei handelt es sich um die Gleichung des Lochleibungsnachweises nach DIN EN 1993-1-8 [18] bzw. den Nachweis nach prEN 1993-1-8 [13]. Diese können dem Kapitel 4.2.1 entnommen werden. Da es in jedem der Berechnungsmethoden unterschiedliche Einschränkungen und Anmerkungen bzgl. der Lochleibungswiderstände gibt, werden zuerst die reinen Lochleibungsnachweise betrachtet und im Anschluss die zu beachtenden Einschränkungen und Bedingungen, die jeweils für den Lochleibungsnachweis zu beachten sind, in die Auswertungen mit einbezogen.

Bei den Auswertungen wird ausschließlich die Tragfähigkeit von Stahlblechen bzw. der Lochleibungswiderstand untersucht. Die Gebrauchstauglichkeit von Anschlüssen, die sich z.B. durch Verformungen von Stahlblechen bei der Kraftübertragung äußert, wird erst in dem nächsten Kapitel untersucht.

Im zweiten Schritt wird hier ein Vergleich zwischen den theoretischen Werten nach Schritt eins und den experimentell ermittelten Werten gezogen. Um diesen Vergleich möglichst

genau führen zu können, werden sechs Untergruppen gebildet. Dabei wird jeweils zwischen den unterschiedlichen Stahlgüten unterschieden. Diese Untergruppen werden in den folgenden Unterkapiteln einzeln betrachtet. Der Vergleich der experimentellen und theoretischen Werte, sowie die Schritte drei bis zehn werden im Folgenden für jede der Untergruppen einzeln betrachtet und berechnet.

## 5.2 Auswertung Stahlgüte S235

In diesem Unterkapitel erfolgt die statistische Auswertung des jetzigen Lochleibungsnachweises nach [18] für die Stahlgüte S235 mit einem, zwei und mehr als zwei Verbindungsmitteln. In der Abbildung 5-1 ist der Vergleich zwischen den theoretisch ermittelten Werten und den experimentell ermittelten Lochleibungswiderständen nach Schritt 2 des Auswerteverfahrens dargestellt.

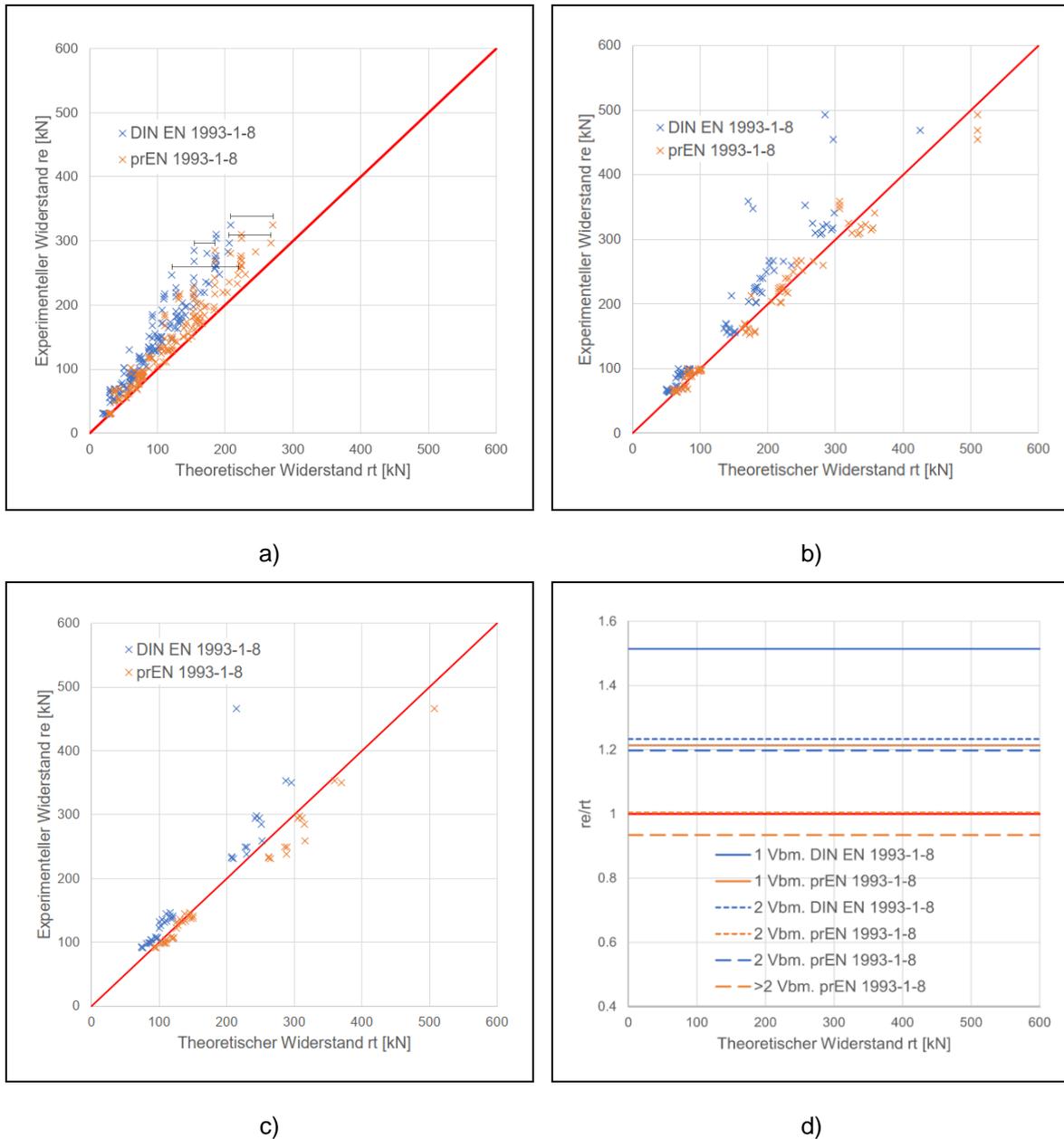


Abbildung 5-1: Vergleich rechnerischer und experimenteller Widerstände für die Stahlgüte S235; a) 1 Verbindungsmittel mit Abstand der Widerstandsergebnisse (schwarz); b) 2 Verbindungsmittel; c) mehr als 2 Verbindungsmittel; d) normativer Vergleich

In der vorangegangenen Abbildung 5-1 ist in a), b) und c) jeweils auf der Abszisse der rechnerisch ermittelte Widerstand  $r_t$  in kN und auf der Ordinate der experimentelle Lochleibungs-

widerstand  $r_e$  in kN dargestellt. In Rot wird die Winkelhalbierende präsentiert. In der Abbildung d) ist auf der Abszisse ebenfalls der theoretische Lochleibungswiderstand dargestellt, wohingegen auf der Ordinate das Verhältnis zwischen den experimentellen Werten  $r_e$  und den theoretischen Werten  $r_t$  abgebildet ist.

In den Grafiken a), b) und c) ist in Blau der Unterschied zwischen den experimentellen und theoretischen Werten nach der DIN EN 1993-1-8 [18] und in Orange der Unterschied zu den theoretischen Werten nach prEN 1993-1-8 [13] dargestellt. Diese Farbuweisung wird auch in den noch kommenden Abbildungen beibehalten. In dieser Grafik a) ist zudem in Schwarz eingezeichnet, wie sich die theoretischen Werte der unterschiedlichen Berechnungsarten zueinander verhalten.

In der Abbildung 5-1 d) ist eine Übersicht über alle Verhältniswerte zwischen den experimentellen und theoretischen Werten gegeben. Dabei wurde für jede Auswertungsgruppe der Stahlgüte S235 der jeweilige Mittelwert der Streuungen angegeben. Zudem wurde zwischen den Ergebnissen der DIN EN 1993-1-8 [18] und der prEN 1993-1-8 [13] unterschieden. Bei der aktuellen Norm liegt der Mittelwert für ein Verbindungsmittel bei 1,51, für zwei Verbindungsmittel bei 1,23 und für mehr als zwei Verbindungsmittel bei 1,19. Bei dem Entwurf liegt der Mittelwert bei 1,21 für ein Verbindungsmittel, bei 1,00 für zwei Verbindungsmittel und bei 0,93 bei mehr als zwei Verbindungsmitteln.

Bei diesen Auswertungen handelt es sich lediglich um die Ergebnisse des allgemeinen Lochleibungsnachweises und mögliche Einschränkungen und Sonderfälle wurden noch nicht betrachtet. Daher sollen die Abbildungen nur einen Überblick über die Verteilungen geben, werden aber nicht genauer erläutert. Der tatsächliche Vergleich zwischen den theoretischen und experimentellen Werten wird erst unter Berücksichtigung aller Randbedingungen der beiden Lochleibungsnachweise geführt.

Die nächsten Schritte in der statistischen Auswertung stellen die Berechnung des Mittelkorrekturbeiwertes  $b$ , des Variationskoeffizienten für das Streumaß  $\delta$  sowie die Ermittlung des charakteristischen Wertes und des Bemessungswertes der Widerstandsfunktion dar. Diese Ermittlung erfolgt für die Berechnung mit einem Verbindungsmittel ausführlich in der Tab. 5-1. Hier sind die Werte für jede statistische Kenngröße angegeben. Da die Variationskoeffizienten von  $V_\delta^2$  und  $V_{x_i}^2$  sehr gering sind, kann die Berechnung von  $V_r^2$  nach Gleichung 6.12 erfolgen. Die Werte für  $k_\infty$  und  $k_{d,\infty}$  wurden der Tab. 4-1 und Tab. 4-2 entnommen und es wird eine Widerstandsfunktion für  $n > 100$  angesetzt. Insgesamt werden 149 Versuchsergebnisse für die Auswertung herangezogen.

Tab. 5-1: Ergebnisse der Auswertung Stahlbleche der Güte S235 mit einem Verbindungsmittel nach DIN EN 1993-1-8 [18] und prEN 1993-1-8 [13]

Anzahl der Versuche	149	
	DIN EN 1993-1-8	prEN 1993-1-8
Mittelkorrekturfaktor b		
$b = \sum_{i=1}^n r_{ei} * r_{ti} / \sum_{i=1}^n (r_{ti})^2$	1,473	1,198
Variationskoeffizienten der Streugröße $\delta$		
$\delta = r_{ei} / b * r_{ti}$	-	-
$\Delta_i = \ln(\delta_i)$	-	-
$\bar{\Delta} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \Delta_i$	0,018	0,004
$s_{\Delta}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_i * \bar{\Delta})^2$	0,019	0,020
$V_{\delta} = \sqrt{\exp(s_{\Delta}^2) - 1}$	0,140	0,141
Bestimmung des charakteristischen Wertes $r_k$ der Widerstandsfunktion		
$V_r^2 = V_{\delta}^2 + V_{rt}^2$	0,15	0,15
$V_{rt}^2 = \sum_{i=1}^j V_{Xi}^2$	0,01	0,01
$Q_{rt} = \sqrt{\ln(V_{rt}^2 + 1)}$	0,096	0,096
$Q_{\delta} = \sqrt{\ln(V_{\delta}^2 + 1)}$	0,139	0,140
$Q = \sqrt{\ln(V_r^2 + 1)} = \sqrt{\ln(V_{rt}^2 + V_{\delta}^2 + 1)}$	0,169	0,169
$r_k = b * g_{rt}(X_m) \exp(-k_{\infty} * Q - 0,5 * Q^2)$	0,748 * b * grt(Xm)	0,747 * b * grt(Xm)
$k_{\infty}$	1,64	1,64
Bestimmung des Bemessungswertes der Widerstandsfunktion		
$r_d = b * g_{rt}(X_m) \exp(-k_{d,\infty} * Q - 0,5 * Q^2)$	0,591 * b * grt(Xm)	0,589 * b * grt(Xm)
$k_{d,\infty}$	3,04	3,04

Bestimmung eines Teilsicherheitsbeiwerts

$$\gamma_M = \frac{r_k}{r_d} \quad 1,27 \quad 1,27$$

Korrekturfaktor und korrigierter Teilsicherheitsbeiwert

$$k_c = \frac{r_n}{r_k} \quad 1,231 \quad 1,233$$

$$\gamma_M^* = k_c * \frac{\gamma_M}{b} \quad 1,058 \quad 1,304$$

In der Tab. 5-1 sind die statistischen Kennwerte aus der Berechnung mit der DIN EN 1993-1-8 [18] und für den Entwurf prEN 1993-1-8 [13] gegenübergestellt. Mit der Tabelle soll im ersten Schritt ein Überblick über die Berechnungsschritte gegeben werden. Im weiteren Verlauf werden die Ergebnisse der statistischen Auswertung in kompakter Tabellenform angegeben.

Auch hier handelt es sich um die Ergebnisse ohne Berücksichtigung der Randbedingungen. Ein Vergleich zwischen den Ergebnissen nach Norm und den Ergebnissen nach dem Entwurf wird hier noch nicht geführt.

In der folgenden Tabelle Tab. 5-2 wurden die wichtigsten statistischen Kennwerte erneut für die Auswertung mit einem Verbindungsmittel, zusammen mit den Auswertungen für zwei und mehr als zwei Verbindungsmitteln zusammengefasst.

Tab. 5-2: Ergebnisse der Auswertung Stahlbleche der Güte S235 nach DIN EN 1993-1-8 [18] (grau) und prEN 1993-1-8 [13] (weiß)

Auswertungsgruppe	Anzahl	b	V <sub>δ</sub>	V <sub>r</sub> <sup>2</sup>	r <sub>k</sub>	r <sub>d</sub>	γ <sub>M</sub>	k <sub>c</sub>	γ <sub>M</sub> <sup>*</sup>
S235, 1 Vbm.	149	1,473	0,140	0,149	0,748	0,747	1,266	1,231	1,058
		1,198	0,141	0,150	0,747	0,589	1,268	1,233	1,304
S235, 2 Vbm.	76	1,340	0,129	0,138	0,759	0,607	1,251	1,212	1,132
		0,979	0,082	0,091	0,807	0,676	1,193	1,141	1,390
S235, >2 Vbm.	40	1,488	0,140	0,150	0,746	0,587	1,171	1,234	0,971
		0,921	0,059	0,068	0,826	0,705	1,171	1,115	1,418

In Grau wurden dabei die Ergebnisse mit den theoretischen Werten aus der DIN EN 1993-1-8 [18] hinterlegt und in Weiß die aus dem Entwurf prEN 1993-1-8 [13]. Die Farbeinordnung wird auch in den weiteren Auswertungen fortgeführt. Hier sind der Mittelkorrekturbeiwert b, der Variationskoeffizient V<sub>δ</sub> und V<sub>r</sub><sup>2</sup>, der Faktor der charakteristischen Bemessungsgleichung und der Bemessungsgleichung r<sub>k</sub> und r<sub>d</sub>, der Teilsicherheitsbeiwert γ<sub>M</sub>, der Korrekturwert k<sub>c</sub> und der tatsächliche Teilsicherheitsbeiwert γ<sub>M</sub><sup>\*</sup>. Die Kennwerte V<sub>r</sub><sup>2</sup>, r<sub>k</sub>, r<sub>d</sub>, γ<sub>M</sub> und k<sub>c</sub> dienen dazu die Berechnungen besser nachvollziehen zu können.

Eine ausführliche Bewertung der Ergebnisse soll auch hier nicht geführt werde. Jedoch ist festzuhalten, dass die Grenzwerte für den Mittelkorrekturbeiwert b von 1,15 und für den Variationskoeffizienten der Streuungen V<sub>δ</sub> mit 10% bzw. 0,1 teilweise nicht eingehalten werden. Die Streuungen der Versuchsergebnisse sind somit zu groß und die theoretischen Widerstände werden durch die Lochleibungsnachweise unterschätzt. Dies trifft auch auf

den Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_m^*$  zu, da auch hier der Zielwert von  $\gamma_{M2}=1,25$  teilweise überschritten wird. Diese Auswertungsgruppen müssen theoretisch als unsicher angesehen werden.

Im nächsten Schritt wird untersucht, wie sich die Ergebnisse der Auswertung verhalten, wenn die Streuungen der Verteilungen verringert werden. Um dies zu erreichen, werden die vorliegenden Versuchsergebnisse genauer betrachtet. Zusätzlich werden die Randbedingungen, die bei den beiden Lochleibungsnachweisen gelten, mit in der statistischen Auswertung berücksichtigt.

Es fällt auf, dass bei den Ergebnissen aus dem „Report Delf 4“ [43] oft der gleiche Versuch mit identischen geometrischen Randbedingungen wiederholt wurde und so mehrere Widerstände ermittelt wurden.

Rep No	Pu	b	t	d	n	e2	e1	p	R	d1	St	V	C
4 59	69.0	53.0	5.0	12.00	1	26.50	24.00	0.00	40.40	13.00	37	6	3
4 60	51.0	53.0	5.0	12.00	1	26.50	24.00	0.00	40.40	13.00	37	6	4
4 61	67.0	66.0	4.0	12.00	1	33.00	24.00	0.00	41.00	13.00	37	6	3
4 62	64.0	66.0	4.0	12.00	1	33.00	24.00	0.00	41.00	13.00	37	6	3
4 63	68.0	66.0	4.0	12.00	1	33.00	24.00	0.00	41.00	13.00	37	6	3
4 64	63.0	66.0	4.0	12.00	1	33.00	24.00	0.00	41.00	13.00	37	6	3
4 65	48.0	66.0	4.0	12.00	1	33.00	24.00	0.00	41.00	13.00	37	6	4
4 66	757.0	141.0	15.0	24.00	2	70.50	48.00	72.00	41.80	25.00	37	9	3
4 67	581.0	110.0	15.0	24.00	2	55.00	48.00	72.00	41.80	25.00	37	9	3

Abbildung 5-2: Auszug BGD „Report Delf 4“ ([25], S. 147)

Man erkennt in Abbildung 5-2, dass sowohl Blechbreite  $b$ , Blechdicke  $t$ , Schraubendurchmesser  $d$ , die Randabstände  $e_1$  und  $e_2$ , die Zugfestigkeit des Stahls  $R$  und der Lochdurchmesser  $d_1$  identisch bei den Versuchsnummern 61 bis 65 sind. Da der theoretisch ermittelte Lochleibungswiderstand kleiner als alle experimentell ermittelten Versuchsergebnisse sein sollte, ist es ausreichend, wenn nur der Versuch mit dem kleinsten ermittelten Widerstand  $P_u$ , also die 48 kN in der Auswertung berücksichtigt wird.

Zusätzlich muss für die Berechnung nach dem Entwurf berücksichtigt werden, dass hier der Lochleibungswiderstand nach Gleichung 3.28 begrenzt wird. [18] Da es sich bei den Versuchsergebnissen aus der „Report EDF 11“ [49] um Winkelbleche handelt, muss zusätzlich überprüft werden, ob die maximale Tragfähigkeit nach Gleichungen 3.28 und 3.29 für Winkel hier maßgebend wird. Siehe hierzu auch Kapitel 3.2.2 dieser Arbeit.

Bei der Auswertungsgruppe mit mehr als zwei Verbindungsmitteln wird für eine gleichmäßigere Verteilung der Versuch mit einem  $r_e$  von 466 kN aus der Auswertung herausgenommen. Der experimentell ermittelte Widerstand liegt weit über dem theoretisch berechneten Wert von 214 kN. Da dieser Wert mit einem so geringen theoretischen Widerstand als sicher angesehen werden kann, ist es kein Problem ihn in der statistischen Auswertung zu vernachlässigen.

Die Auswertung für alle Auswertungsgruppen der Stahlgüte S235 erfolgt nun erneut unter Berücksichtigung der aufgeführten Randbedingungen und wird grafisch in Abbildung 5-3 dargestellt.

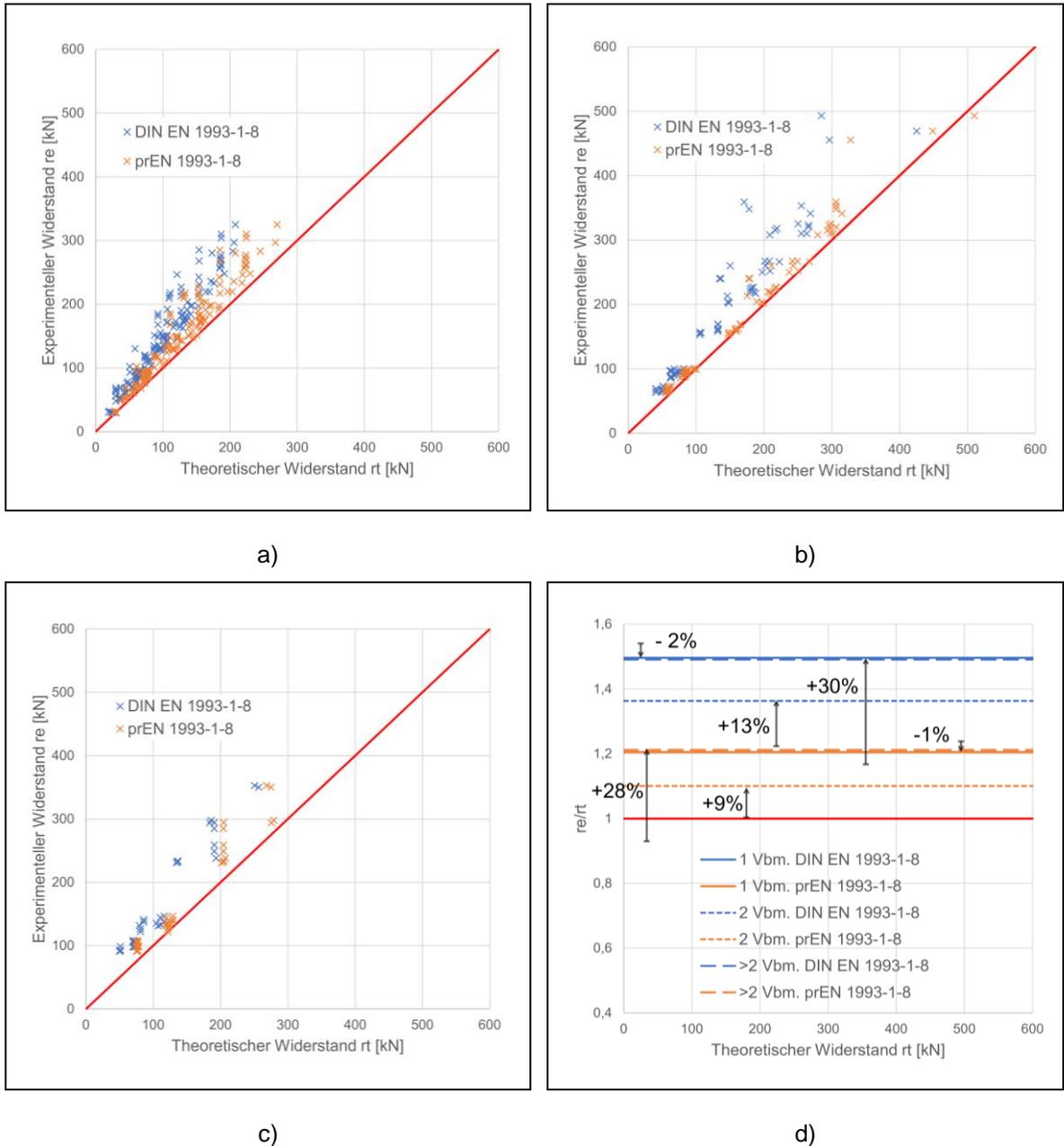


Abbildung 5-3: Neuer Vergleich rechnerischer und experimenteller Widerstände für die Stahlgüte S235; a) 1 Verbindungsmittel; b) 2 Verbindungsmittel; c) mehr als 2 Verbindungsmittel; d) nomineller Vergleich

In der Abbildung 5-3 ist erneut in a), b) und c) jeweils auf der Abszisse der rechnerisch ermittelte Widerstand  $r_t$  in kN und auf der Ordinate der experimentelle Lochleibungswiderstand  $r_e$  in kN dargestellt. In Rot wird die Winkelhalbierende präsentiert. In der Abbildung d) ist auf der Abszisse ebenfalls der theoretische Lochleibungswiderstand dargestellt, wohingegen auf der Ordinate das Verhältnis zwischen den experimentellen Werten  $r_e$  und den theoretischen Werten  $r_t$  abgebildet ist.

In der Abbildung 5-3 a) ist abermals in Blau der Unterschied zwischen den experimentellen und theoretischen Werten nach der DIN EN 1993-1-8 [18] und in Orange der Unterschied

zu den theoretischen Werten nach prEN 1993-1-8 [13] dargestellt. Beide Verteilungen liegen größtenteils oberhalb der Winkelhalbierenden, die theoretisch ermittelten Werte sind somit größer als die experimentellen Versuchsergebnisse. Es ist zu erkennen, dass die orangenen Kreuze deutlich näher an die Winkelhalbierende rücken, der Abstand zwischen den Verteilungen jedoch nicht konstant ist, sondern teilweise größer und kleiner ist. Dies liegt bei den Ergebnissen mit einem Verbindungsmittel zum einen daran, dass bei der DIN EN 1993-1-8 [18] mit der Multiplikation von  $k_1$  und  $\alpha_b$  maximal ein Wert von 2,5 erreicht werden konnte. Bei dem Entwurf prEN 1993-1-8 [13] ist der maximale Wert hingegen 3. Der Widerstand ist somit automatisch um einen Faktor von ca. 1,2 höher bei der prEN 1993-1-8 [13]. Zum anderen geht der Randabstand  $e_2$  nur in der jetzt gültigen EN 1993-1-8 mit ein und entfällt bei dem Entwurf. Dies führt dazu, dass die Widerstände nach der DIN EN 1993-1-8 [18] teilweise deutlich kleiner sind als die der prEN 1993-1-8 [13]. Ebenfalls zu erwähnen ist, dass die orangenen Kreuze im Gegensatz zu den blauen auch teilweise auf der Winkelhalbierenden liegen.

In der Abbildung 5-3 b) sind wieder beide Wertepaare eingetragen, jedoch wird hier die Stahlgüte S235 mit zwei Verbindungsmitteln untersucht. Es ist erneut zu beobachten, dass die orangenen Kreuze näher an der Winkelhalbierenden liegen als die blauen. Der Abstand zwischen den blauen und orangenen Kreuzen ist in dieser Auswertungsgruppe nicht nur durch den Faktor von 1,2 zwischen den Formeln und den Randabständen  $e_2$  zu begründen, sondern auch durch den Schraubenabstand  $p_2$ , der bei zwei Verbindungsmitteln automatisch mit angesetzt ist. Dieser Schraubenabstand geht bei der DIN EN 1993-1-8 [18] ebenfalls mit in den Lochleibungsnachweis ein, weswegen der Widerstand auch durch ihn beeinflusst wird. Der Abstand zwischen den Kreuzen ist daher noch weniger ausgeglichen als in a).

In der Abbildung 5-3 c) sind beide Auswertungen für die Stahlgüte S235 mit mehr als zwei Verbindungsmitteln dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass die blauen Kreuze teilweise deutlich oberhalb von der Winkelhalbierenden liegen. Auch die orangenen Kreuze verteilen sich hier nicht so gut um die Winkelhalbierende wie bei den vorherigen Verteilungen, jedoch ist erneut festzustellen, dass sich die orangenen Kreuze näher an der Halbierenden befinden. Anders als bei den Grafiken a) oder b) ist der Abstand zwischen den blauen und orangenen Kreuzen konstanter und nicht so groß.

In der d) ist eine Übersicht über alle Verhältnismerte zwischen den experimentellen und theoretischen Werten gegeben. Dabei wurde für jede Auswertungsgruppe der Stahlgüte S235 der jeweilige Mittelwert der Streuungen angegeben. Zudem wurde zwischen den Ergebnissen der DIN EN 1993-1-8 [18] und der prEN 1993-1-8 [13] unterschieden. In Rot ist der Wert Eins markiert.

Der Mittelwert für ein Verbindungsmittel liegt für die Berechnung nach der DIN EN 1993-1-8 [18] bei 1,50 und bei der Berechnung nach prEN 1993-1-8 [13] bei 1,21. Für zwei Verbindungsmittel liegt der Wert für die gültige Norm bei 1,36 und für den Entwurf bei 1,10. Bei mehr als zwei Verbindungsmitteln ergibt sich ein Wert von 1,49 für die Ermittlung nach DIN EN 1993-1-8 [18] und für 1,21 für die Ermittlung nach prEN 1993-1-8 [13]. Die Differenzen schwanken somit zwischen 20 und 25%. Es ist jedoch gut zu erkennen, dass alle Verteilungen oberhalb von 1 liegen. Es lässt sich somit ablesen, dass bei allen Auswertungsgruppen die theoretischen Widerstände größer als die experimentellen sind.

Um die Unterschiede in den einzelnen Auswertungsgruppen zu den vorherigen Auswertungen ohne Randbedingungen zu verdeutlichen, wurden in d) die neuen Mittelwerte des Verhältnisses zwischen den experimentellen und theoretischen Ergebnissen mit Angabe der prozentualen Änderung im Vergleich zu den Angaben aus Abbildung 5-1 d) dargestellt. Betrachtet man die Änderungen bei dem Berechnungsverfahren nach DIN EN 1993-1-8 [18], so erkennt man, dass diese für ein Verbindungsmittel nur bei einer Verringerung von 2% liegen, für zwei und mehr als zwei Verbindungsmittel hingegen bei 13% und 30%. Dies liegt besonders daran, dass für die Ergebnisse der Winkelanschlüsse der beiden Auswertungsgruppen die maximale Tragfähigkeit für einseitig angeschlossene Winkel maßgebend wird und nicht der maximale Lochleibungswiderstand. Somit werden die theoretischen Widerstände noch einmal verringert, denn obwohl die Versuche auf Lochleibung versagen, wird laut DIN EN 1993-1-8 [18] die Tragfähigkeit  $N_{u,Rd}$  maßgebend.

Bei der Berechnung mit einem Verbindungsmittel nach prEN 1993-1-8 [13] liegt nur eine Änderung von 1% vor. Hier wurden lediglich einzelne Werte aus der Verteilung gelöscht, da entweder die Randbedingungen nicht erfüllt sind oder ein anderer Nachweis maßgebend wird. Da die Versuchsanzahl jedoch so groß ist, fallen die gelöschten Versuche nicht groß ins Gewicht, sodass sich der Mittelwert nur leicht ändert. Dies stellt sich anders bei den Auswertungsgruppen für zwei und mehr als zwei Verbindungsmitteln nach prEN 1993-1-8 [13] dar. Hier wurden nicht nur Versuche aus der Auswertung genommen, sondern auch der maximale Lochleibungswiderstand begrenzt. Diese Begrenzung setzt sich bei mehreren Schrauben aus dem 75% Nettoquerschnittswiderstand und dem Lochleibungswiderstand zusammen. Für nahezu alle Versuchsergebnisse wurde dabei das Blockversagen maßgebend. Der Unterschied zwischen den Mittelwerten liegt daher bei zwei Verbindungsmitteln bei einer 9%-Steigerung und bei mehr als zwei Verbindungsmitteln bei einer 28%-Steigerung. Alle Mittelwerte liegen nun oberhalb von Eins, womit die theoretischen Widerstände alle kleiner als die experimentell ermittelten Werte sind.

Mit diesen neuen Versuchsergebnissen wurde erneut das Auswerteverfahren nach DIN EN 1990, Anhang D [15] durchgeführt. Eine Zusammenfassung für diese Stahlgüte ist in dieser Arbeit in Tabelle Tab. 5-3 festgehalten.

Tab. 5-3: Neue Ergebnisse der Auswertung Stahlbleche der Güte S235 nach DIN EN 1993-1-8 [18] (grau) und prEN 1993-1-8 [13] (weiß)

Auswertungsgruppe	Anzahl	b	$V_\delta$	$V_r^2$	$r_k$	$r_d$	$\gamma_M$	kc	$\gamma_M^*$
S235, 1 Vbm.	145	1,472	0,127	0,136	0,762 *b * grt(Xm)	0,610 *b * grt(Xm)	1,248	1,209	1,025
		1,200	0,119	0,128	0,770 *b * grt(Xm)	0,622 *b * grt(Xm)	1,238	1,196	1,233
S235, 2 Vbm.	76	1,340	0,129	0,138	0,759 *b * grt(Xm)	0,607 *b * grt(Xm)	1,251	1,212	1,132
		1,081	0,072	0,081	0,816 *b * grt(Xm)	0,690 *b * grt(Xm)	1,183	1,128	1,235
S235, >2 Vbm.	39	1,440	0,128	0,137	0,759 *b * grt(Xm)	0,607 *b * grt(Xm)	1,165	1,212	0,981
		1,195	0,102	0,111	0,787 *b * grt(Xm)	0,647 *b * grt(Xm)	1,217	1,169	1,191

Betrachtet man die Mittelkorrekturwerte ist zu erkennen, dass die Grenzwerte von 0,85 und 1,15 lediglich bei den Auswertungsgruppen mit zwei oder mehr als zwei Verbindungsmitteln nach prEN 1993-1-8 [13] erreicht wird. Das gleiche gilt auch für den Variationskoeffizienten der Streuungen  $V_\delta$ . Der Grenzwert von 10% wird ebenfalls nur von diesen beiden Gruppen eingehalten. Jedoch sind die anderen Variationskoeffizienten mit 11% und 12% sehr nah an dem einzuhaltenden Grenzwert. Generell ist zu erkennen, dass Versuchswerte für b und  $V_\delta$  bei dem neuen Entwurf näher an den Grenzwerten.

An den errechneten Teilsicherheitsbeiwerte ist zu erkennen, dass alle Werte unter dem Zielwert von  $\gamma_{M2} = 1,25$  liegen. Die Berechnungsmethoden nach der DIN EN 1993-1-8 [18] und nach prEN 1993-1-8 [13] sind somit als sicher einzustufen. Es fällt jedoch auf, dass die Teilsicherheitsbeiwerte nach der DIN insgesamt geringer als die nach prEN 1993-1-8 [13] sind und mit einem Durchschnittswert von 1,05 ca. 20% unter dem Zielwert liegen. Dieser Durchschnittswert ergibt sich aus den Teilsicherheitsbeiwerten und der jeweiligen Versuchsanzahl. Der Lochleibungswiderstand wird durch diese Berechnungsmethode somit deutlich unterschätzt. Bei der Berechnungsmethode nach prEN 1993-1-8 [13] liegt der Durchschnittswert des Teilsicherheitsbeiwerts bei 1,227, der Unterschied zu  $\gamma_{M2}$  liegt somit nur bei 2%. Die Berechnungsmethode passt somit sehr gut zu den experimentell ermittelten Werten und es liegt für die ausgewertete Stahlsorte ein wirtschaftlicher Nachweis vor.

### 5.3 Auswertung Stahlgüte S275

Dieses Unterkapitel befasst sich mit der statistischen Auswertung des Lochleibungsnachweises nach DIN EN 1993-1-8 [18] und nach prEN 1993-1-8 [13] für die Stahlgüte S275. Aufgrund von mangelnden Versuchsanzahlen wird für diese Stahlgüte lediglich der Fall mit einem Verbindungsmittel betrachtet.

Insgesamt werden 21 Versuchsergebnisse genutzt, um diese Untersuchung durchzuführen. Für die Auswertung werden wieder die Schritte des Auswerteverfahrens nach DIN EN 1990, Anhang D [15] angewandt.

In der folgenden Abbildung 5-4 werden der theoretische Widerstand der DIN EN 1993-1-8 [18] (blau) und der theoretische Widerstand des Entwurfes prEN 1993-1-8 [13] (orange), jeweils auf die experimentell ermittelten Daten abgetragen.

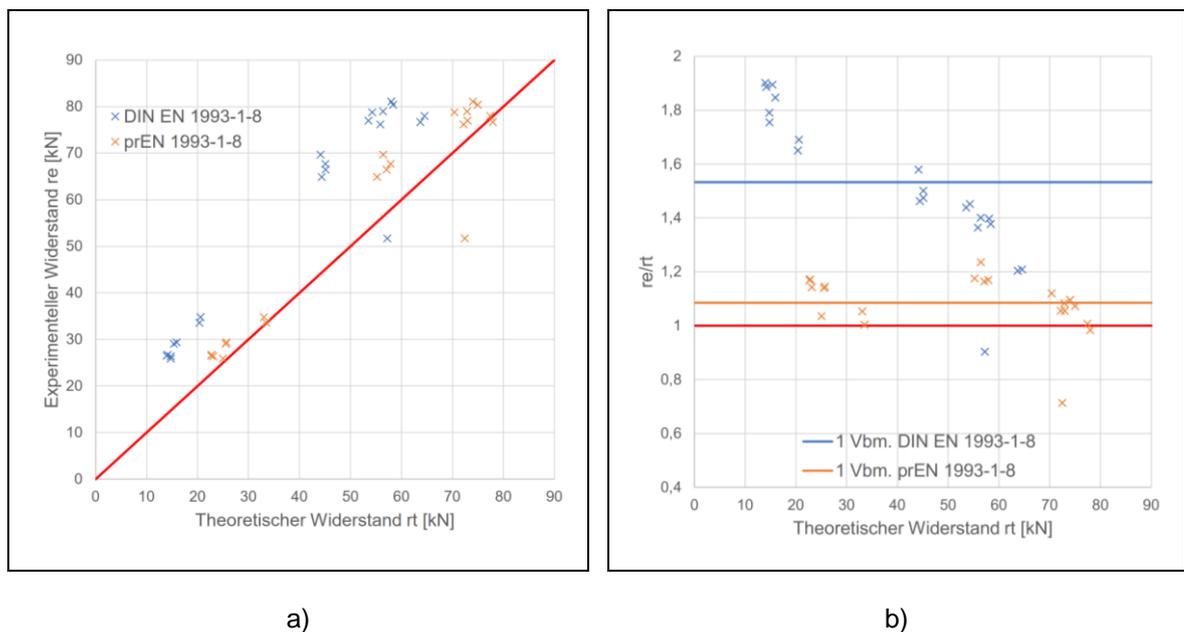


Abbildung 5-4: Vergleich rechnerischer und experimenteller Widerstände für die Stahlgüte S275; a) Vergleich  $r_t$  und  $r_e$ ; b) normativer Vergleich

In a) ist auf der Abszisse dabei wie im vorherigen Kapitel der theoretische Widerstand  $r_t$  zu sehen und auf der Ordinate der experimentell ermittelte Widerstand  $r_e$ . Die Winkelhalbierende wird hier erneut in Rot dargestellt. In b) ist auf der Abszisse ebenfalls der theoretische Widerstand  $r_t$  und auf der Ordinate das Verhältnis zwischen dem experimentellen Widerstand  $r_e$  und dem theoretischen Widerstand  $r_t$  abgebildet. Rot markiert den Verhältnisswert von Eins.

Bis auf eine Ausnahme liegen in a) die blauen Kreuze weit oberhalb der Winkelhalbierenden. Diese Ausnahme bei einem  $r_e$  von ca. 50 kN lässt sich nicht mit den Berechnungen erklären. Da jedoch bei ähnlichen geometrischen Parametern deutlich höhere Lochleibungswiderstände ermittelt wurden, liegt hier womöglich ein Fehler bei der Versuchsdurchführung vor.

In b) sind die Mittelwerte der  $r_e/r_t$ -Verhältnisse für die prEN 1993-1-8 [13] in Orange und für die DIN EN 1993-1-8 [18] in Blau dargestellt. Der Mittelwert liegt bei den Berechnungen nach der aktuellen Norm bei 1,53 und bei dem Entwurf bei 1,09.

Die beiden Grafiken sollen lediglich als Übersicht dienen, daher werden sie nicht genauer beschrieben. Der tatsächliche Vergleich der Ergebnisse erfolgt erst unter Berücksichtigung aller Randbedingungen der beiden Lochleibungsnachweise.

Nachfolgend sind die Schritte drei bis zehn der Auswertung zusammengefasst dargestellt in der Tabelle Tab. 5-4. Hier sind der Mittelkorrekturbeiwert  $b$ , der Variationskoeffizient  $V_\delta$  und  $V_r^2$ , der Faktor der charakteristischen Bemessungsgleichung und der Bemessungsgleichung  $r_k$  und  $r_d$ , der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$ , der Korrekturwert  $k_c$  und der tatsächliche Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M^*$ . Die Kennwerte  $V_r^2$ ,  $r_k$ ,  $r_d$ ,  $\gamma_M$  und  $k_c$  dienen auch hier dazu die Berechnungen besser nachvollziehen zu können.

Tab. 5-4: Ergebnisse der Auswertung Stahlbleche der Güte S275 nach DIN EN 1993-1-8 [18] (grau) und prEN 1993-1-8 [13] (weiß)

Auswertungsgruppe	Anzahl	b	$V_\delta$	$V_r^2$	$r_k$	$r_d$	$\gamma_M$	$k_c$	$\gamma_M^*$
S275, 1 Vbm.	21	1,363	0,184	0,194	0,698 *b * grt(Xm)	0,523 *b * grt(Xm)	1,334	1,318	1,290
		1,058	0,113	0,123	0,776 *b * grt(Xm)	0,631 *b * grt(Xm)	1,230	1,186	1,380

Eine ausführliche Bewertung der Ergebnisse soll auch hier nicht geführt werden. Es ist dennoch festzuhalten, dass die Grenzwerte für den Mittelkorrekturbeiwert  $b$  von 1,15 und für den Variationskoeffizienten der Streuungen  $V_\delta$  mit 10% bzw. 0,1 weder durch die Auswertung nach DIN EN 1993-1-8 [18] noch prEN 1993-1-8 [13] eingehalten werden. Die theoretischen Widerstände werden durch die Lochleibungsnachweise unterschätzt und die Streuungen der Versuchsergebnisse sind zu groß. Dies trifft auch auf den Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_m^*$  zu, da auch hier der Zielwert von  $\gamma_{M2}=1,25$  überschritten wird.

Um den Variationskoeffizienten der Streuungen weiter an den Grenzwert von 10% anzupassen, wird das bereits erwähnte Versuchsergebnis bei einem  $r_e$  von ca. 50kN aus der Auswertung entfernt. Zusätzliche Randbedingungen aus der DIN EN 1993-1-8 [18] oder der prEN 1993-1-8 [13] haben bei diesen Versuchsergebnissen keinen Einfluss auf die berechneten Widerstände.

In der Abbildung 5-5 ist die neue Verteilung grafisch dargestellt. Das Farbschema kann den Erläuterungen zu der Abbildung 5-4 entnommen werden.

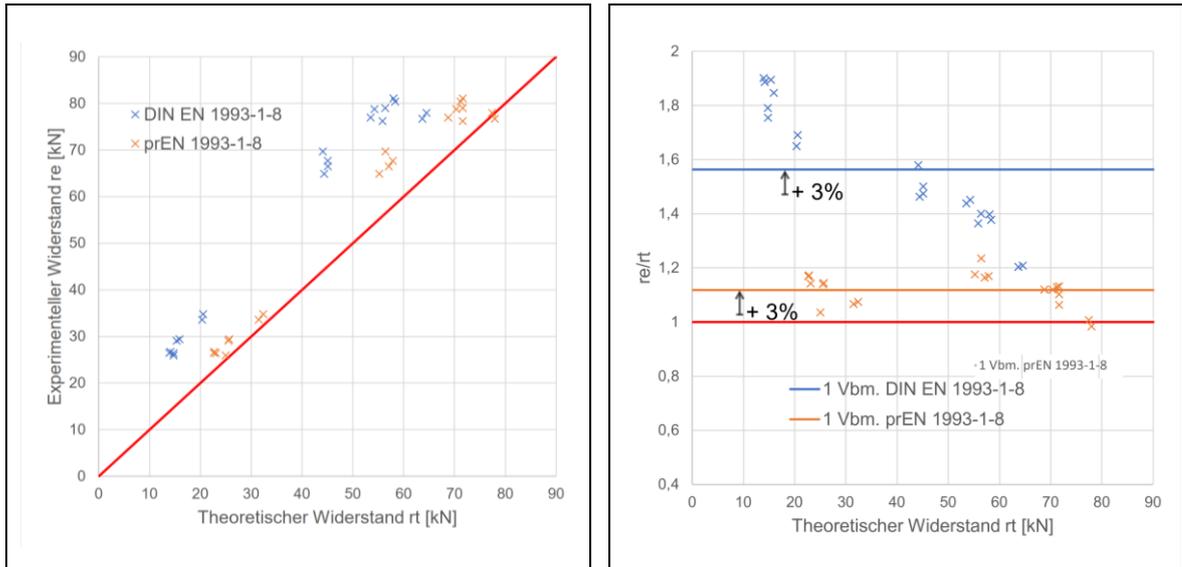


Abbildung 5-5: Neuer Vergleich rechnerischer und experimenteller Widerstände für die Stahlgüte S275; a) Vergleich  $r_t$  und  $r_e$ ; b) nomineller Vergleich

In Abbildung 5-5 a) ist nun zu erkennen, dass durch den gelöschten Versuchswert alle blauen Kreuze oberhalb der Winkelhalbierenden liegen, und auch die orangen Kreuze korrelieren besser mit der Halbierenden. Unverkennbar ist der Abstand zwischen den orangen und blauen Kreuzen. Die orangen Kreuze sind horizontal deutlich weiter nach rechts in Richtung Winkelhalbierende gerutscht. Sie liegen teilweise sogar genau auf der Halbierenden und korrelieren somit sehr gut mit dieser.

In b) sind neben den neuen Mittelwerten auch die prozentualen Änderungen zu den vorherigen Ergebnissen eingetragen. Mit einem Mittelwert von 1,564 bei der Berechnung nach DIN EN 1993-1-8 [18] und mit einem neuen Mittelwert von 1,118 bei der Berechnung nach dem Entwurf, steigen die Mittelwerte beide um 3%.

Mit diesen neuen Versuchsergebnissen wird die Auswertung erneut nach DIN EN 1990, Anhang D [15] ausgeführt. Die Zusammenfassung ist in Tabelle Tab. 5-5 festgehalten.

Tab. 5-5: Neue Ergebnisse der Auswertung Stahlbleche der Güte S275 nach DIN EN 1993-1-8 [18] (grau) und prEN 1993-1-8 [13] (weiß)

Auswertungsgruppe	Anzahl	b	$V_\delta$	$V_r^2$	$r_k$	$r_d$	$\gamma_M$	kc	$\gamma_M^*$
S275, 1 Vbm.	20	1,403	0,145	0,154	0,742	0,583	1,273	1,240	1,124
		1,087	0,063	0,072	0,823	0,700	1,175	1,119	1,209

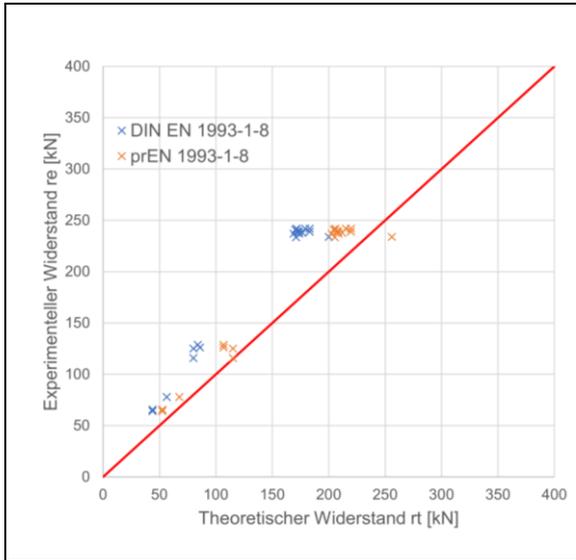
Das Verhältnis zwischen den theoretischen und den experimentellen Werten ist in der ersten Zeile, also mit der Berechnung nach der DIN EN 1993-1-8 [18], mit 1,403 deutlich größer als bei der Berechnung nach prEN 1993-1-8 [13] mit 1,087. Das Bemessungskonzept nach der prEN 1993-1-8 [13] stimmt somit besser mit den Versuchsergebnissen überein als das Modell aus der aktuell gültigen Norm. Mit einem Variationskoeffizienten der Streuungen von 14,5% liegt die Verteilung nach der aktuellen Norm über dem Grenzwert von 10%, die Überschreitung von 4,5% sind jedoch noch in einem annehmbaren Bereich.

Betrachtet man den Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M^*$  ist zu erkennen, dass bei beiden Auswertungen der Zielwert von 1,25 eingehalten ist. Beide Berechnungsmethoden sind somit als sicher anzusehen. Mit einer Abweichung zu dem Zielwert des Teilsicherheitsbeiwertes von ca.13% unterschätzt die DIN EN 1993-1-8 [18] den Lochleibungswiderstand jedoch erneut. Wohingegen eine Abweichung von 4% bei der Berechnung nach prEN 1993-1-8 [13] bedeutet, dass die Berechnungsmethode sehr gut zu den experimentell ermittelten Versuchsergebnissen passt und das Bemessungskonzept sinnvoll ist.

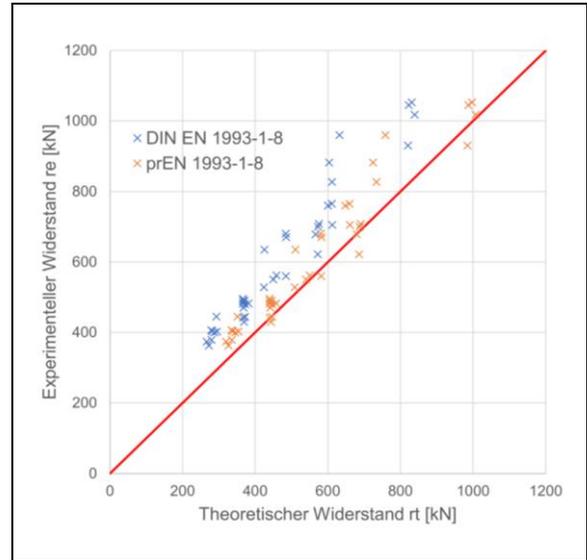
### 5.4 Auswertung Stahlgüte S355

Das folgende Kapitel befasst sich mit der statistischen Auswertung des Lochleibungswiderstands nach DIN EN 1990, Anhang D [15] für die Stahlgüte S355. Es wird zwischen einem Verbindungsmittel, zwei Verbindungsmitteln und mehr als zwei Verbindungsmitteln unterschieden.

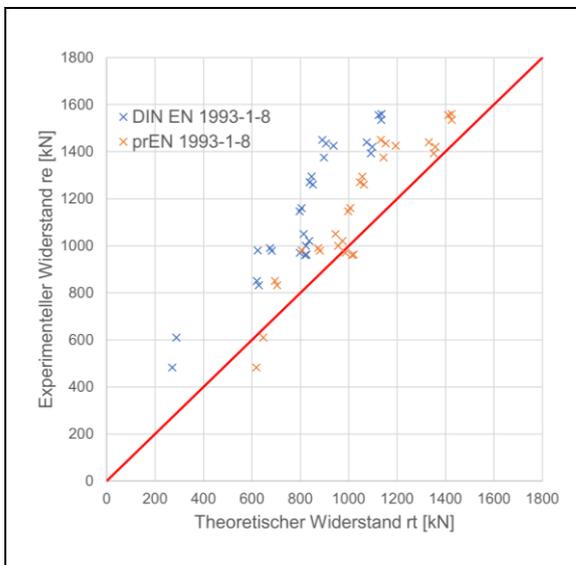
In Abbildung 5-6 werden die rechnerischen und experimentellen Widerstände erneut für die bereits erläuterten Berechnungsmethoden dargestellt.



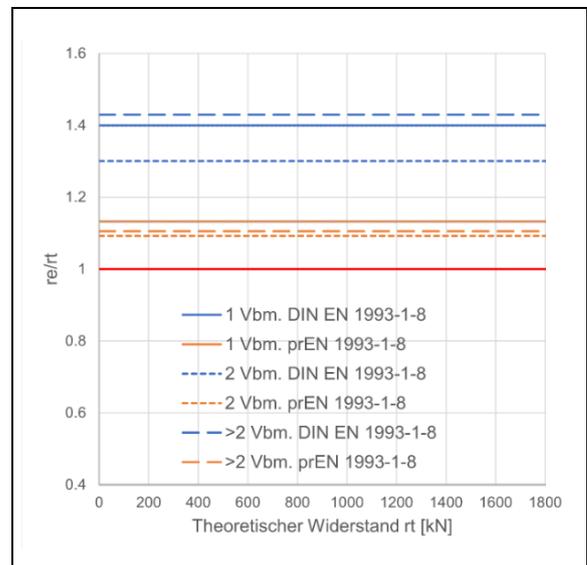
a)



b)



c)



d)

Abbildung 5-6: Vergleich rechnerischer und experimenteller Widerstände für die Stahlgüte S355; a) 1 Verbindungsmittel; b) 2 Verbindungsmittel; c) mehr als 2 Verbindungsmittel; d) normativer Vergleich

In a) wird der Vergleich für ein Verbindungsmittel, in b) für zwei Verbindungsmittel und in c) für mehr als zwei Verbindungsmittel dargestellt. Wie auch in den vorherigen Auswertungen ist der theoretische Widerstand aus der DIN EN 1993-1-8 [18] in Blau eingezeichnet und der theoretische Widerstand aus dem prEN 1993-1-8 [13] in Orange. Auf der Abszisse sind jeweils die theoretischen Werte  $r_t$  in kN und auf der Ordinate die experimentellen Werte  $r_e$  in der Einheit kN dargestellt. In d) ist ebenfalls auf der Abszisse der theoretische Widerstand  $r_t$  in kN angegeben, auf der Ordinate hingegen das Verhältnis zwischen den experimentellen Werten  $r_e$  und theoretischen Ergebnissen  $r_t$ .

In d) sind die jeweiligen Mittelwerte der  $r_e/r_t$ -Verhältnisse dargestellt. Die Mittelwerte bei den Auswertungen der DIN EN 1993-1-8 [18] liegen bei einem Verbindungsmittel bei 1,40, bei zwei Verbindungsmitteln bei 1,30 und bei mehr als zwei Verbindungsmitteln bei 1,43. Bei der Auswertung der prEN 1993-1-8 [13] ergibt sich für ein Verbindungsmittel ein Wert von 1,13, bei zwei Verbindungsmitteln von 1,09 und bei mehr als zwei ein Wert von 1,11.

Es handelt sich bei diesen Auswertungen erneut nur um die Ergebnisse des allgemeinen Lochleibungsnachweises ohne die geltenden Randbedingungen. Der tatsächliche Vergleich und die Auswertung der Ergebnisse, werden erst unter Berücksichtigung aller Randbedingungen der beiden Lochleibungsnachweise geführt.

Die nächsten Schritte der Auswertung, die nach dem Verfahren der DIN EN 1990, Anhang D [15] berechnet wurden, erfolgen in der Tabelle Tab. 5-6. Hier werden die bereits erläuterten statistischen Kennwerte der Auswertungen zusammengefasst.

Tab. 5-6: Ergebnisse der Auswertung Stahlbleche der Güte S355 nach DIN EN 1993-1-8 [18] (grau) und prEN 1993-1-8 [13] (weiß)

Auswertungsgruppe	Anzahl	b	$V_\delta$	$V_r^2$	$r_k$	$r_d$	$\gamma_M$	kc	$\gamma_M^*$
S355, 1 Vbm.	20	1,361	0,064	0,073	0,820 *b * grt(Xm)	0,676 *b * grt(Xm)	1,213	1,122	1,000
		1,116	0,066	0,076	0,818 *b * grt(Xm)	0,671 *b * grt(Xm)	1,218	1,125	1,228
S355, 2 Vbm.	39	1,315	0,084	0,093	0,804 *b * grt(Xm)	0,672 *b * grt(Xm)	1,196	1,145	1,042
		1,096	0,083	0,092	0,805 *b * grt(Xm)	0,673 *b * grt(Xm)	1,195	1,143	1,247
S355, >2 Vbm.	28	1,483	0,106	0,115	0,777 *b * grt(Xm)	0,620 *b * grt(Xm)	1,254	1,185	1,001
		1,187	0,101	0,110	0,782 *b * grt(Xm)	0,628 *b * grt(Xm)	1,245	1,176	1,234

Die Tabelle dient nur als Übersicht, wird hier jedoch nicht ausgiebig erläutert. Es kann jedoch festgehalten werden, dass der Grenzwert des Mittelkorrekturbeiwertes  $b$  bei der Auswertung der DIN EN 1993-1-8 [18] nicht eingehalten wird, die  $b$ -Werte bei den Auswertungen der prEN 1993-1-8 [13] unter 1,15 liegen. Der Grenzwert des Variationskoeffizienten der Streuung wird bei allen Auswertungen eingehalten und alle Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M^*$  liegen unter dem Zielwert  $\gamma_{M2} = 1,25$ .

Für die Auswertungsgruppen soll jetzt jedoch noch untersucht werden, wie sich die Verteilungen verhalten, wenn der in prEN 1993-1-8 [13] festgelegte maximale Lochleibungswiderstand nach Gleichung 3.28 dieser Arbeit mit einberechnet wird. Zudem muss für die Versuche aus der Datenbasis „Report EDF 11“ [49] die maximale Tragfähigkeit von einseitig angeschlossenen Winkeln berücksichtigt werden. Dies kann den Gleichungen 3.19 bis 3.21 und 3.28 und 3.29 dieser Arbeit entnommen werden.

Die Auswertung für alle Auswertungsgruppen der Stahlgüte SS355 erfolgt nun erneut unter Berücksichtigung der aufgeführten Randbedingung und wird grafisch in Abbildung 5-7 dargestellt.

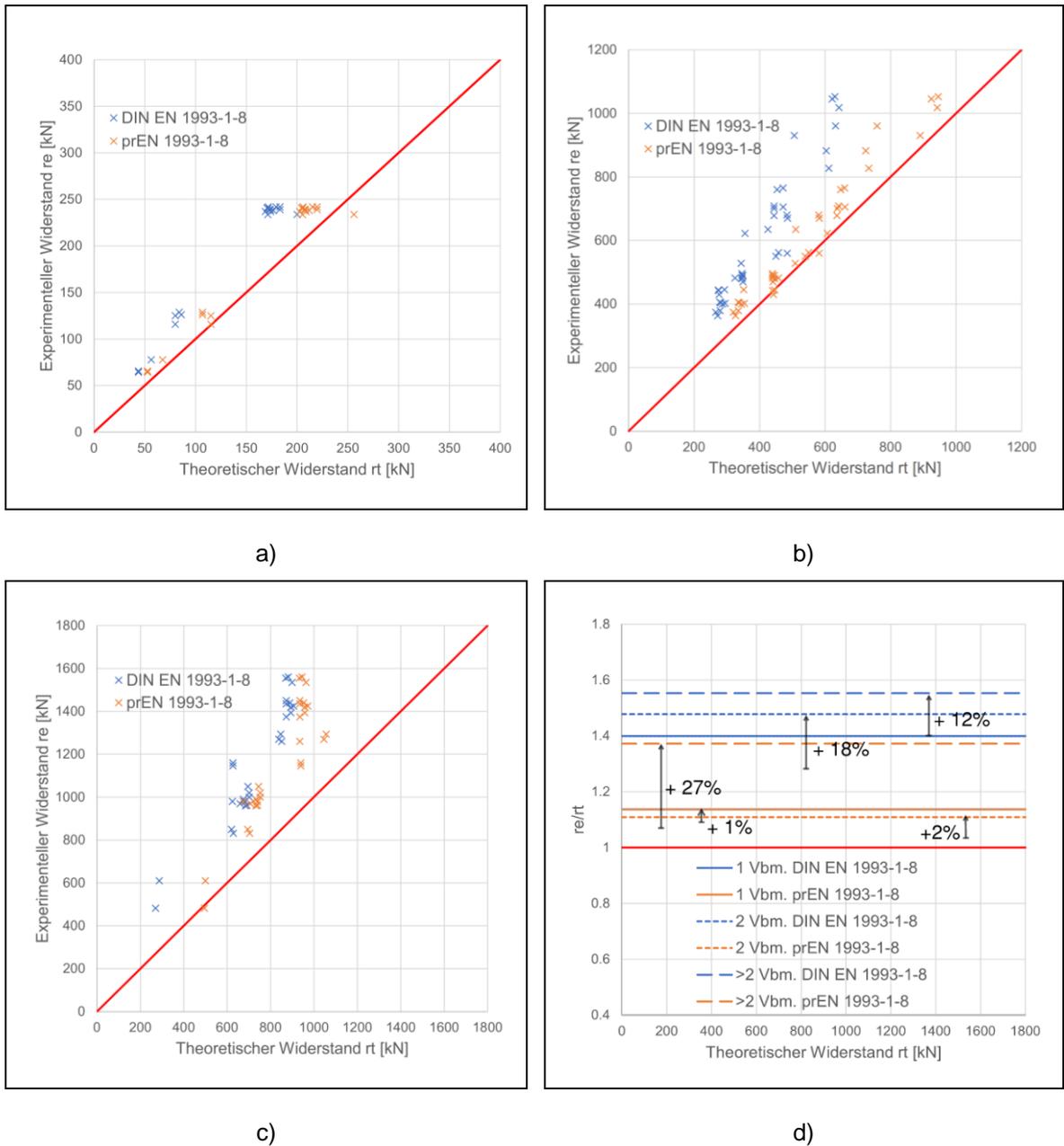


Abbildung 5-7: Neuer Vergleich rechnerischer und experimenteller Widerstände für die Stahlgüte S355; a) 1 Verbindungsmittel; b) 2 Verbindungsmittel; c) mehr als 2 Verbindungsmittel; d) nomineller Vergleich

In Abbildung 5-7 a) ist zu erkennen, dass die orangenen Kreuze deutlich näher an der Winkelhalbierenden in Rot liegen. Die theoretischen Werte stimmen hier sehr gut mit den experimentell ermittelten Werten überein. Die blauen Kreuze liegen im Gegenzug dazu weiter von der Winkelhalbierenden entfernt. Bei beiden Verteilungen ist jedoch zu erkennen, dass sich die Kreuze von der Winkelhalbierenden mehr entfernen, je größer der Widerstand wird.

Die Formeln beider theoretischen Werte scheinen daher für die geringeren Werte besser mit den experimentellen Ergebnissen übereinzustimmen.

Bei b) ist die Verteilung beider Berechnungsergebnisse ebenfalls sehr ausgeglichen. Bei den blauen Kreuzen gibt es keinen Wert, der erheblich von den anderen abweicht, jedoch ist der Abstand zur Winkelhalbierenden erneut größer als der Abstand der orangenen Kreuze zu ihr. Bei den orangenen Ergebnissen, also den Ergebnissen mit der Berechnung nach prEN 1993-1-8 [13], liegen mehrere Werte unterhalb der roten Halbierenden. Die theoretisch ermittelten Werte sind hier somit höher als die experimentellen Versuchsergebnisse. An den horizontalen Abständen zwischen den blauen und orangenen Kreuzen kann hier zudem wieder sehr gut der Einfluss der bereits genannten Faktoren, wie das Vernachlässigen von  $e_2$  in den Formeln des Entwurfs oder der generell höhere maximale Wert bei den orangenen Kreuzen mit einem Faktor von ca. 1,2, erkannt werden.

In der Abbildung 5-7 c) wird deutlich, dass solch enge und recht lineare Verteilungen jedoch nicht bei allen Auswertungen der Stahlgüte üblich sind. Hier sind die Streuungen sowohl bei den blauen als auch bei den orangenen Kreuzen deutlich größer. Dies sollte sich im nächsten Schritt auch durch den Variationskoeffizienten der Streuungen bei dieser Auswertungsgruppe erkennen lassen. Auch hier entfernen sich die Kreuze mit steigendem theoretischem und experimentellem Widerstand von der Winkelhalbierenden. Der Abstand zu der Winkelhalbierenden ist hier bei den orangenen Kreuzen jedoch wieder geringer als bei den blauen, sodass festgehalten werden kann, dass diese besser mit der Halbierenden korrelieren, jedoch auch nicht sonderlich gut.

Um den Unterschied zwischen der alten und der neuen Auswertung zu verifizieren wird die Abbildung 5-7 d) betrachtet. Hier ist neben den neu ermittelten Mittelwerten des Verhältnisses der experimentellen und theoretischen Widerstände auch in Schwarz eingetragen, wie sich die Mittelwerte zur vorherigen Berechnung verändert haben. Obwohl ein paar der Kreuze unterhalb der Winkelhalbierenden liegen, sind die Mittelwerte alle größer als Eins (rot). Die theoretischen Lochleibungswiderstände sind somit im Mittel kleiner als die experimentell ermittelten Ergebnisse.

Bei den Auswertungsgruppen der DIN EN 1993-1-8 [18] gibt es bei einem Verbindungsmittel keine Änderungen durch die maximale Tragfähigkeit von einseitig angeschlossenen Winkeln. Bei zwei Verbindungsmitteln erhöht sich der Mittelwert jedoch auf 1,48, was eine Steigerung von 18% bedeutet. Die theoretischen Widerstände werden durch die Begrenzung somit deutlich geringer. Bei der Untersuchung von mehr als zwei Verbindungsmitteln liegt die Änderung durch Berücksichtigung der maximalen Tragfähigkeit von einseitig angeschlossenen Winkeln bei 12%, da der neue Mittelwert bei 1,55 liegt. Auch hier suggeriert die Norm teilweise, dass Lochleibung nicht maßgebend wird, obwohl dies das Versagen ist, was bei den Versuchsergebnissen aufgetreten ist.

Es ist zu erkennen, dass die Begrenzung des Widerstandes und die Berücksichtigung der maximalen Tragfähigkeit von einseitig angeschlossenen Winkeln auf die Auswertungsgruppen der prEN 1993-1-8 [13] mit einem und mit zwei Verbindungsmitteln keinen allzu großen Einfluss hat, da hier der Mittelwert nur um 1% bis 2% steigt. Der neue Mittelwert für ein Verbindungsmittel liegt nun bei 1,137 und für zwei Verbindungsmittel bei 1,11. Den größten Einfluss hat diese Begrenzung auf die Auswertung mit mehr als zwei Verbindungsmitteln.

Hier steigt der Mittelwert um mehr als 27% von 1,11 auf 1,37. Bei den Widerständen nach prEN 1993-1-8 [13] wird für die einseitig angeschlossenen Winkel hauptsächlich  $V_{\text{eff},1,Rk}$  und somit Blockversagen maßgebend.

Mit diesen neuen Versuchsergebnissen wurde erneut das Auswerteverfahren nach DIN EN 1990, Anhang D [15] durchgeführt. Eine Zusammenfassung für diese Stahlgüte ist in dieser Arbeit in Tabelle Tab. 5-7 festgehalten.

Tab. 5-7: Neue Ergebnisse der Auswertung Stahlbleche der Güte S355 nach DIN EN 1993-1-8 [18] (grau) und prEN 1993-1-8 [13] (weiß)

Auswertungsgruppe	Anzahl	b	$V_\delta$	$V_r^2$	$r_k$		$r_d$		$\gamma_M$	kc	$\gamma_M^*$
S355, 1 Vbm.	20	1,361	0,064	0,073	1,640	*b * grt(Xm)	0,676	*b * grt(Xm)	1,213	1,122	1,000
		1,117	0,068	0,078	0,816	*b * grt(Xm)	0,668	*b * grt(Xm)	1,223	1,128	1,234
S355, 2 Vbm.	39	1,432	0,099	0,108	0,790	*b * grt(Xm)	0,651	*b * grt(Xm)	1,213	1,165	0,987
		1,096	0,070	0,079	0,817	*b * grt(Xm)	0,692	*b * grt(Xm)	1,181	1,126	1,214
S355, >2 Vbm.	28	1,561	0,092	0,102	0,791	*b * grt(Xm)	0,643	*b * grt(Xm)	1,231	1,163	0,917
		1,345	0,105	0,114	0,778	*b * grt(Xm)	0,622	*b * grt(Xm)	1,251	1,182	1,100

Bei allen Auswertungsgruppen ist zu erkennen, dass die Mittelkorrekturbeiwerte b bei der Berechnung nach der DIN EN 1993-1-8 [18] deutlich höher als die nach prEN 1993-1-8 [13] sind und bis auf eine Ausnahme liegen alle b-Werte über den Zielwert von 1,15. Es wird somit weiterhin bestätigt, dass die theoretischen Werte des Entwurfs deutlich mehr den experimentellen Ergebnissen entsprechen als die der Berechnungsmethode der jetzigen Norm. Alle Verteilungen liegen mit einem Variationskoeffizienten der Streuung  $V_\delta$  unter dem Grenzwert von 10% bzw. nur sehr knapp drüber mit Werten von 6,4% bis 10,5%.

Untersucht man nun die Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M^*$ , so ist ablesbar, dass alle Werte kleiner als der Zielfaktor von 1,25 sind. Alle Auswertungsgruppen gelten somit als sicher. Bildet man den durchschnittlichen Teilsicherheitsbeiwert der Berechnungen der sich aus den Teilsicherheitsbeiwerten und der Versuchsanzahl ergibt, nach DIN EN 1993-1-8 [18], so liegt er mit 0,97 ca. 25% unter dem anzustrebenden Zielwert. Der Lochleibungswiderstand wird hier somit stark unterschätzt. Bei dem durchschnittlichen Teilsicherheitsbeiwert von 1,18 bei den Berechnungen nach prEN 1993-1-8 [13] ist der Unterschied zum Zielwert mit 7% deutlich geringer, jedoch wird der Lochleibungswiderstand hier auch etwas unterschätzt, kann dennoch als sinnvoller betrachtet werden.

## 5.5 Auswertung Stahlgüte S460

In dem folgenden Unterkapitel erfolgt die Zusammenfassung und die Auswertung des Lochleibungsnachweises für die Stahlgüte S460 mit einem Verbindungsmittel nach dem Auswerteverfahren aus dem Kapitel 4.1 dieser Arbeit. Die Auswertung erfolgt für eine Anzahl von vier experimentell ermittelten Versuchsergebnissen, die aus einer Versuchsserie stammen.

Die Gegenüberstellung der theoretischen und experimentellen Werte erfolgt in der Abbildung 5-8.

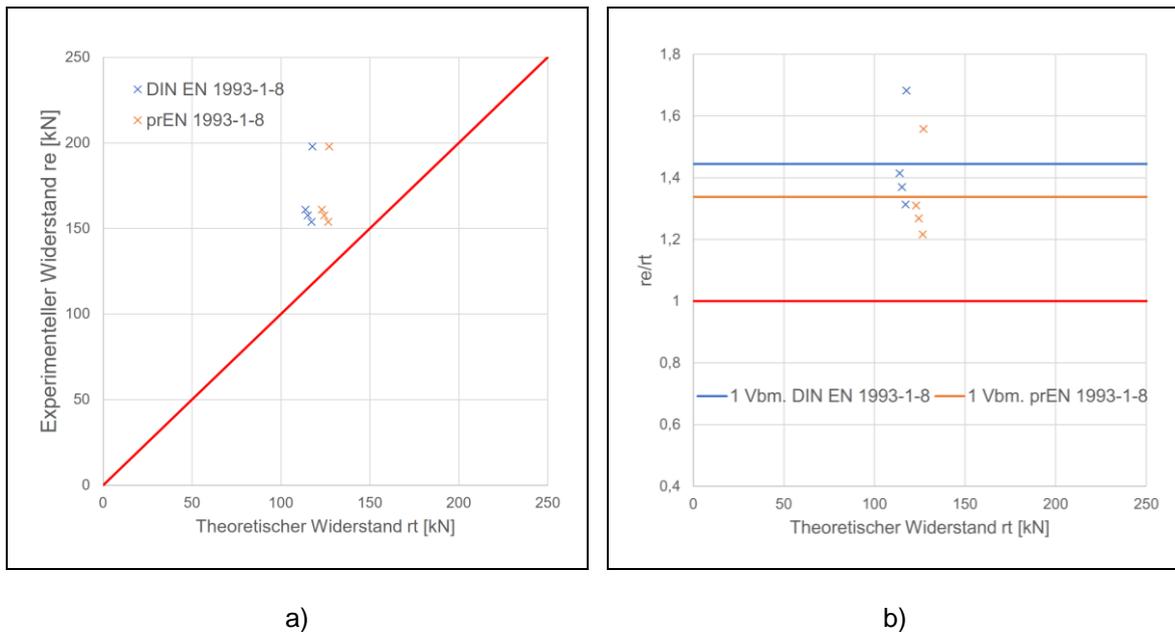


Abbildung 5-8: Vergleich rechnerischer und experimenteller Widerstände für die Stahlgüte S460; a) Vergleich für ein Verbindungsmittel; b) normativer Vergleich

Es wurde in der Abbildung a) dasselbe Farbschema benutzt wie in den vorherigen, Blau steht daher für den Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit den theoretischen Werten aus der DIN EN 1993-1-8 [18] und Orange für den Vergleich mit den Ergebnissen aus der prEN 1993-1-8 [13]. Wie in den vorherigen Abbildungen befinden sich auf der Abszisse die theoretischen Ergebnisse  $r_t$  in der Einheit kN und auf der Ordinate die experimentell ermittelten Werte  $r_e$  ebenfalls in der Einheit kN. In b) ist auf der Abszisse ebenfalls der theoretische Widerstand  $r_t$  aufgetragen, wohingegen auf der Ordinate das Verhältnis zwischen  $r_e$  und  $r_t$  dargestellt ist.

Anders als bei den vorherigen Auswertungsgruppen liegen in a) sowohl die blauen als auch die orangenen Verteilungen weit von der Winkelhalbierenden entfernt. Es fällt zusätzlich auf, dass der horizontale Abstand zwischen den orangenen und blauen Kreuzen sehr gering ist, da ab einer Stahlgüte von S460 der Lochleibungswiderstand nach der Berechnung der prEN 1993-1-8 [13] mit einem Faktor von 0,9 abgemindert wird. Diese Abminderung erfolgt, da das Verhältnis zwischen der Zugfestigkeit und Fließfestigkeit mit Erhöhung der Stahlgüte abnimmt und der Bereich, in dem die Stahlbleche fließen können, somit immer geringer wird. Durch diese Anpassung in dem Entwurf der neuen DIN wird der bisher geltende Ab-

standsfaktor von 1,2 auf 1,08 verringert. Generell ist hier noch festzuhalten, dass die Streuungen beider Verteilungen sehr groß sind durch die geringe Anzahl an Versuchsergebnissen und es keine Linearität innerhalb der Ergebnisse zu erkennen gibt.

In Abbildung 5-8 b) sind die Mittelwerte der  $r_e/r_t$ -Verhältnisse für die Berechnungsmethoden nach DIN EN 1993-1-8 [18] in Blau und für die Berechnung nach prEN 1993-1-8 [13] in Orange dargestellt. Mit einem Wert von 1,45 für die jetzige Norm und 1,34 für den Entwurf liegen beide Werte über dem in Rot gekennzeichneten Verhältniswert Eins. Um ca. 10% sind die theoretischen ermittelten Widerstände der DIN EN 1993 [18]-1-8 jedoch kleiner als die der prEN 1993-1-8 [13].

Die Auswertung nach den Schritten drei bis zehn des Auswertungsverfahrens der DIN EN 1990, Anhang D [15] sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tab. 5-8: Ergebnisse der Auswertung Stahlbleche der Güte S460 nach DIN EN 1993-1-8 [18] (grau) und prEN 1993-1-8 [13] (weiß)

Auswertungsgruppe	Anzahl	b	$V_\delta$	$V_r^2$	$r_k$	$r_d$	$\gamma_M$	kc	$\gamma_M^*$
S460, 1 Vbm.	4	1,679	0,109	0,118	0,677 *b * grt(Xm)	0,321 *b * grt(Xm)	2,108	1,360	1,983
		1,339	0,109	0,118	0,746 *b * grt(Xm)	0,485 *b * grt(Xm)	1,539	1,234	1,418

In Grau sind in der Tabelle Tab. 5-8 die Ergebnisse nach dem Berechnungsverfahren aus der DIN EN 1993-1-8 [18] und in Weiß die Ergebnisse aus der Berechnung nach prEN 1993-1-8 [13] festgehalten.

Die zuvor getroffenen Beobachtungen aus der Abbildung 5-8 werden durch die Kennwerte erneut unterstrichen. Der hohe Mittelkorrekturbeiwert b von 1,679 in der ersten Zeile spricht von einer großen Abweichung zwischen den experimentell ermittelten und den theoretischen Werten. Beide b-Kennwerte liegen über dem einzuhaltenden Grenzwert von 1,15 und die Formeln beider Berechnungsverfahren bilden die tatsächlich experimentellen Ergebnisse nicht gut ab und unterschätzen die Lochleibungsverbindung. Die Streuungen sind bei beiden Auswertungen gleich groß, dies wird durch den gleichen Variationskoeffizienten der Streuungen  $V_\delta$  deutlich, der bei 10,9% liegt. Durch die geringe Versuchsanzahl sind jedoch weder der Mittelkorrekturbeiwert noch der Variationskoeffizient sehr aussagefähig.

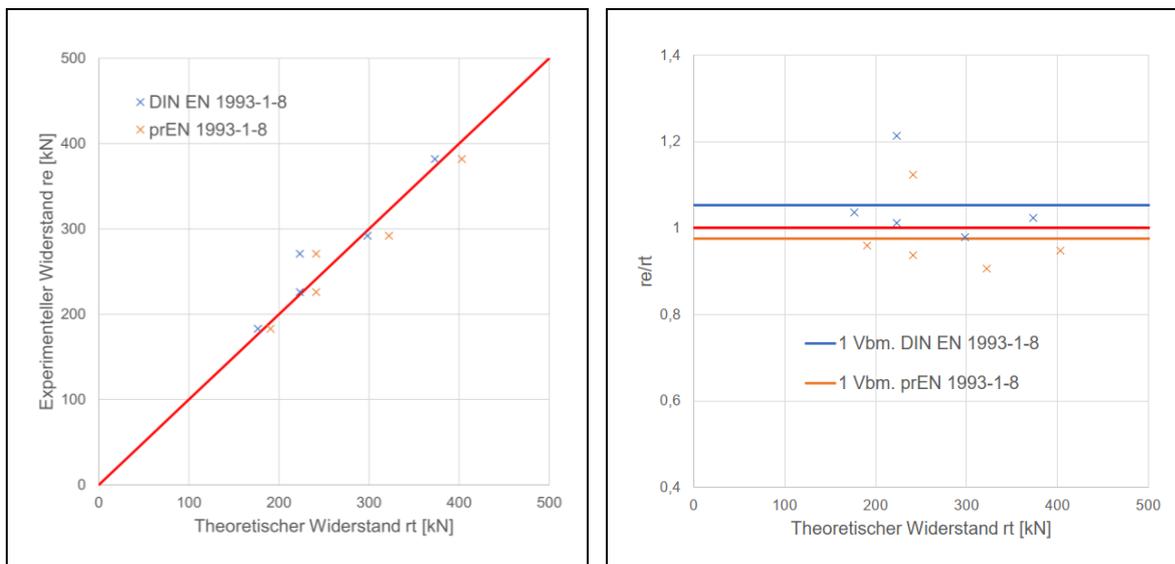
Mit der geringen Versuchsanzahl lassen sich die hohen Teilsicherheitsbeiwerte erklären. Da bei der Auswertung der Ergebnisse nach DIN EN 1993-1-8 [18] ein sehr hoher Mittelkorrekturbeiwert vorliegt, ist es naheliegend, dass ein sehr kleiner Teilsicherheitsbeiwert resultieren. Da die geringe Anzahl an Ergebnissen jedoch zu sehr hohen  $k_n$  und  $k_d$  Werten führt, resultiert automatisch ein hoher  $\gamma_M$ -Wert von 1,983. Mit einem Teilsicherheitsbeiwert von 1,418 bei der Berechnung nach prEN 1993-1-8 [13] ist der Teilsicherheitsbeiwert zwar geringer, liegt jedoch über dem anzustrebenden Zielwert von 1,25. Für beide Berechnungen bedeutet dies, dass keine ausreichende Sicherheit gewährleistet wird. In der späteren Zusammenfassung aller Teilsicherheitsbeiwerte in Kapitel 5.9 werden diese jedoch durch die geringe Versuchsanzahl nicht stark berücksichtigt. Mit einer so geringen Versuchsanzahl ist die statistische Auswertung generell in Frage zu stellen, da das Auswertungsverfahren nach DIN EN 1990, Anhang D [15] für größere Datenmengen gedacht ist. [15]

Die bereits erläuterten Randbedingungen des Lochleibungswiderstandes aus der DIN EN 1993-1-8 [18] oder der prEN 1993-1-8 [13] haben bei diesen Versuchsergebnissen keinen Einfluss, weswegen die Auswertung hier nur einmal durchgeführt wird.

## 5.6 Auswertung Stahlgüte S550

Dieses Unterkapitel dient der statistischen Auswertung des Lochleibungswiderstands nach der DIN EN 1993-1-8 [18] und der prEN 1993-1-8 [13]. Es werden fünf experimentell ermittelte Versuchsergebnisse aus einer Versuchsserie der Stahlgüte S550 mit einem Verbindungsmittel verwendet.

Die Gegenüberstellung der theoretisch berechneten und experimentell ermittelten Ergebnisse erfolgt graphisch in der Abbildung 5-9. In a) sind auf der Ordinate dabei mit  $r_e$  die experimentellen Werte in kN aufgetragen und auf der Abszisse mit  $r_t$  die theoretischen in der Einheit kN. In Orange ist der Vergleich der Ergebnisse nach prEN 1993-1-8 [13] und in Blau der Vergleich nach DIN EN 1993-1-8 [18] eingetragen. In b) ist auf der Abszisse ebenfalls der theoretische Widerstand  $r_t$  abgebildet und auf der Ordinate das Verhältnis zwischen den experimentellen Werten  $r_e$  und theoretischen Werten  $r_t$ .



a)

b)

Abbildung 5-9: Vergleich rechnerischer und experimenteller Widerstände für die Stahlgüte S550; a) Vergleich für ein Verbindungsmittel; b) normativer Vergleich

In der oben dargestellten Grafik a) ist ablesbar, dass sich sowohl die Ergebnisse der Berechnung nach DIN EN 1993-1-8 [18] als auch die Ergebnisse nach prEN 1993-1-8 [13] sehr nah an der Winkelhalbierenden befinden. Zudem gibt es keine Werte, die groß abweichen, und die Verteilung scheint sehr linear zu sein. Betrachtet man den Abstand zwischen den orangenen und blauen Kreuzen horizontal zueinander fällt auf, dass dieser deutlich geringer als bei den Vergleichen der vorherigen Stahlgüten ist. Dies lässt sich mit der bereits erläuterten Verringerung des Lochleibungswiderstands mit dem Faktor 0,9 bei hochfesten Stählen erklären, der in der prEN 1993-1-8 [13] neu eingeführt worden ist. Der Abstand zwischen den maximalen Lochleibungswiderständen liegt durch diesen Unterschied der Berechnungsmethoden infolgedessen nicht mehr bei 1,2 sondern bei 1,08. Bemerkenswert ist, dass besonders die blauen Kreuze so gut mit der Winkelhalbierenden korrelieren. Der theoretische Lochleibungswiderstand nach der Berechnung der DIN EN 1993-1-8 [18] stimmt hier somit gut mit den experimentell ermittelten Versuchsergebnissen überein. Für

die orangen Kreuze gilt hingegen das Gegenteil. Die meisten Werte liegen unter der Winkelhalbierenden, die theoretisch ermittelten Werte sind somit höher als die experimentell ermittelten.

Diese Beobachtungen werden durch die Abbildung 5-9 b) nur unterstützt. Hier ist in Blau der Mittelwert für das  $r_e/r_t$ -Verhältnis nach der Berechnung der DIN EN 1993-1-8 [18] und in Orange für die Berechnung nach prEN 1993-1-8 [13] eingetragen. Mit einem Mittelwert von 1,05 liegen die Werte aus der aktuellen Norm knapp über dem in Rot markierten Wert Eins. Mit dem Wert 0,98 ist der theoretische Widerstand nach der prEN 1993-1-8 [13] knapp unter den experimentell ermittelten Werten. Der Unterschied zwischen beiden Berechnungsarten liegt bei ca. 8%.

Die nächsten Schritte des Auswerteverfahrens sehen die Ermittlung des Mittelkorrekturbeiwertes  $b$  und des Variationskoeffizienten der Streuungen  $V_\delta$ , vor. Anschließend werden der charakteristische Wert  $r_k$  und der Bemessungswert  $r_d$  der Widerstandsfunktion berechnet. [15] Diese Kennwerte wurden in der folgenden Tabelle Tab. 5-9 für diese Auswertung zusammengefasst.

Tab. 5-9: Ergebnisse der Auswertung Stahlbleche der Güte S550 nach DIN EN 1993-1-8 [18] (grau) und prEN 1993-1-8 [13] (weiß)

Auswertungsgruppe	Anzahl	b	$V_\delta$	$V_r^2$	$r_k$	$r_d$	$\gamma_M$	$k_c$	$\gamma_M^*$
S550, 1 Vbm.	5	1,038	0,084	0,093	0,774 *b * grt(Xm)	0,516 *b * grt(Xm)	1,500	1,188	1,717
		0,961	0,084	0,093	0,774 *b * grt(Xm)	0,516 *b * grt(Xm)	1,500	1,188	1,854

Der Abstand der Mittelkorrekturbeiwerte zu Eins liegt bei unter 5% bei beiden Berechnungsmethoden. Dies unterstreicht die zuvor festgehaltenen Erkenntnisse, dass beide theoretischen Berechnungsmethoden gut mit den experimentell ermittelten Ergebnissen korrelieren. Mit einem Wert von 0,961 wird jedoch auch demonstriert, dass der Lochleibungsnachweis nach prEN 1993-1-8 [13] die Tragfähigkeit überschätzt.

Besonders an dem Vergleich der beiden Berechnungsmethoden ist der einheitliche Variationskoeffizient  $V_\delta$ , der bei beiden Auswertungen bei 8,4% liegt. Sowohl bei den  $b$ -Kennwerten als auch bei den Variationskoeffizienten werden die Grenzwerte von 0,85 bis 1,15 bzw. 10% eingehalten.

Durch den gleichen Variationskoeffizienten ergibt sich der gleiche Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  und der gleiche Korrekturfaktor  $k_c$ . Durch die unterschiedlichen Mittelkorrekturbeiwerte  $b$  folgt für die Auswertung nach DIN EN 1993-1-8 [18] ein Wert von 1,717 und für die Betrachtung mit der prEN 1993-1-8 [13] ein Wert von 1,854. Beide Teilsicherheitsbeiwerte liegen somit über dem Zielwert von 1,25, der für Verbindungsmittelanschlüsse laut DIN EN 1993-1-8 [18] vorgesehen ist. Dies liegt zum einen erneut an der geringen Versuchsanzahl, die zu hohen Fraktillfaktoren führt. Zum anderen können auch geringe  $b$ -Kennwerte zu hohen Teilsicherheitsfaktoren. Die möglichen Unsicherheiten, die entstehen, wenn die theoretischen Werte zu genau zu den experimentellen Ergebnissen passen, werden so durch einen höheren Teilsicherheitsfaktor behoben.

Diese Stahlgüte ist die erste, bei der die DIN EN 1993-1-8 [18] nicht mehr für Schraubverbindungen der Kategorien A und B gültig ist. Laut Norm dürfen hochfeste Stahlsorten nur

dann verwendet werden, wenn es sich um gleitfeste Schraubverbindungen handelt. [17] Bei den verwendeten experimentellen Daten handelt es sich jedoch nur um Schraubverbindungen der Kategorie A. Der Lochleibungsnachweis der aktuellen Norm ist somit für diese Stahlsorte nicht gültig und die Sicherheit muss nicht bewertet werden.

Die prEN 1993-1-8 [13] kann für diese Stahlgüte mit den vorliegenden Versuchsergebnissen nicht als sicher angesehen werden. Da jedoch auch wie im vorherigen Kapitel eine sehr geringe Versuchsanzahl vorliegt, wird der hohe Teilsicherheitsbeiwert im gesamten Durchschnitt in Kapitel 5.9 nicht stark berücksichtigt. Auch hier ist das Auswerteverfahren der DIN EN 1990, Anhang D [15] nicht sinnvoll.

Die Randbedingungen des Lochleibungswiderstandes aus der DIN EN 1993-1-8 [18] oder der prEN 1993-1-8 [13] haben bei diesen Versuchsergebnissen ebenfalls keinen Einfluss, somit wird die Auswertung hier nur einmal durchgeführt.

## 5.7 Auswertung Stahlgüte S690

Die nächste statistische Auswertung des Lochleibungsnachweises nach DIN EN 1990, Anhang D [15] befasst sich mit der Stahlgüte S690 und einem Verbindungsmittel. Als Grundlage dienen erneut die ermittelten experimentellen Versuchsergebnisse aus der Literatur, sowie die theoretisch berechneten Widerstände nach der DIN EN 1993-1-8 [18] und der prEN 1993-1-8 [13]. Es werden elf Versuchsergebnisse aus zwei Versuchsserien für diese Auswertung betrachtet.

Wie in den vorherigen Auswertungen erfolgt zuerst der Vergleich der theoretischen  $r_t$  und experimentell ermittelten Widerstände  $r_e$  grafisch in der Abbildung 5-10.

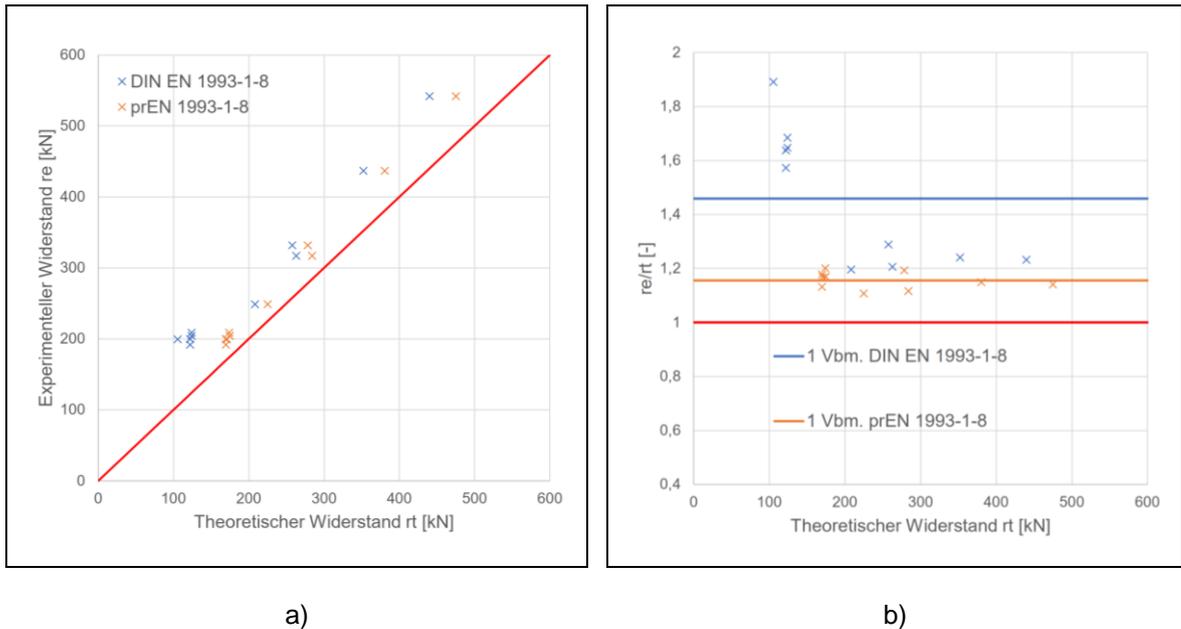


Abbildung 5-10: Vergleich rechnerischer und experimenteller Widerstände für die Stahlgüte S690; a) Vergleich für ein Verbindungsmittel; b) normativer Vergleich

In a) sind in Orange dabei wieder die Ergebnisse von der Berechnung nach prEN 1993-1-8 [13] dargestellt und in Blau die nach DIN EN 1993-1-8 [18]. In Rot ist die Winkelhalbierende eingezeichnet. Auf der Ordinate ist erneut  $r_e$ , also der experimentell ermittelte Widerstand und auf der Abszisse  $r_t$ , der theoretische Widerstand eingetragen. In b) ist das Verhältnis  $r_e/r_t$  auf der Ordinate und erneut  $r_t$  auf der Abszisse abgebildet.

Die orangenen Kreuze sind wie in den vorherigen Auswertungen näher an der Winkelhalbierenden als die blauen. Alle Kreuze befinden sich oberhalb der Halbierenden, die charakteristischen Werte sind somit kleiner als die experimentell ermittelten. Untersucht man den horizontalen Abstand zwischen den blauen und orangenen Kreuzen, so ist zu erkennen, dass bei dieser Auswertungsgruppe die Abstände stark schwanken. Hier hat der Randabstand  $e_2$  erneut einen großen Einfluss auf die Berechnung des Lochleibungswiderstandes nach DIN EN 1993-1-8 [18], da dieser mit seinen geringen Werten zu kleineren  $k_1$ -Werten führt.

Besonders bei der blauen Verteilung ist anzumerken, dass die Widerstandsformel aus der DIN EN 1993-1-8 [18] ebenfalls nicht für eine Berechnung mit der Stahlgüte S690 ausgelegt ist. Dass die theoretischen Werte jedoch trotzdem so viel größer als die experimentellen

Versuchsergebnisse sind, zeigt, dass die Formel des Lochleibungswiderstands womöglich auch für die hochfesten Stahlsorten verwendet werden kann.

Um die Beobachtungen aus a) mit Kenngrößen zu verifizieren wird die Abbildung 5-10 b) genauer betrachtet. Mit einem Mittelwert von 1,46 bei der Berechnung nach der DIN EN 1993-1-8 [18] liegen die theoretisch berechneten Werte ca. 45% unter den experimentell ermittelten, wohingegen die theoretischen Werte nach prEN 1993-1-8 [13] mit einem Mittelwert von 1,16 nur ca. 16% geringer sind. Der Abstand zwischen den beiden Berechnungskonzepten liegt somit in diesem Fall bei ca. 30%.

Die Schritte drei bis zehn des Auswertungsverfahrens aus dem Kapitel 4.1 dieser Arbeit werden für die Auswertungsgruppe in der folgenden Tabelle Tab. 5-10 dargestellt. In Grau sind dabei die Kennwerte der Berechnungsmethode DIN EN 1993-1-8 [18] festgehalten und in Weiß die der prEN 1993-1-8 [13].

Tab. 5-10: Ergebnisse der Auswertung Stahlbleche der Güte S690 nach DIN EN 1993-1-8 [18] (grau) und prEN 1993-1-8 [13] (weiß)

Auswertungsgruppe	Anzahl	b	$V_\delta$	$V_r^2$	$r_k$	$r_d$	$\gamma_M$	kc	$\gamma_M^*$
S690, 1 Vbm.	10	1,291	0,205	0,215	0,642 *b * grt(Xm)	0,381 *b * grt(Xm)	1,686	1,435	1,874
		1,149	0,019	0,029	0,846 *b * grt(Xm)	0,734 *b * grt(Xm)	1,152	1,088	1,091

Der große Abstand zwischen den theoretischen und experimentell ermittelten Ergebnissen lässt sich durch die berechneten Mittelkorrekturbeiwerte b ebenfalls erkennen. Mit 1,291 liegt der Kennwert der DIN EN 1993-1-8 [18] oberhalb des Grenzwertes von 1,15. Mit 1,149 entspricht der Mittelkorrekturbeiwert b nach prEN 1993-1-8 [13] diesem jedoch exakt. Auch der größere Abstand der Berechnungsergebnisse nach der DIN EN 1993-1-8 [18] zu den experimentellen Ergebnissen wird durch den höheren b-Wert in der ersten Zeile deutlich.

Bei den Variationskoeffizienten der Streuungen  $V_\delta$  liegt die Verteilung der DIN EN 1993-1-8 [18] mit 20,5% weit oberhalb des Grenzwertes von 10%. Die zuvor getroffenen Beobachtungen aus der Abbildung 5-10 a) werden somit bestätigt. Mit ca. 2% weist die Verteilung des prEN 1993-1-8 [13] hingegen keine großen Streuungen auf.

Vergleicht man nun die Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M^*$  ist aus der Tabelle Tab. 5-10 ablesbar, dass mit 1,874 der Kennwert der DIN EN 1993-1-8 [18] größer als der  $\gamma_{M2}$ -Wert und anzustrebende Wert von 1,25 ist. Mit einem Teilsicherheitsbeiwert von 1,091 wird dieser Zielwert durch die prEN 1993-1-8 [13] jedoch eingehalten.

Mit dem hohen Teilsicherheitsbeiwert ist die Berechnung nach DIN EN 1993-1-8 [18] theoretisch als nicht sicher anzusehen. Da die Formeln jedoch für eine so hohe Stahlgüte laut DIN EN 1993-1-8 [18] nicht gültig sind, muss keine Aussage über die Sicherheit getroffen werden.

Im Gegenzug ist die prEN 1993-1-8 [13] mit einem Teilsicherheitsbeiwert, der ca. 15% unter dem Zielwert liegt, zwar als sicher anzusehen, jedoch wird der Lochleibungswiderstand hier durch die Formeln unterschätzt.

Die bereits erläuterten Randbedingungen des Lochleibungswiderstandes aus der DIN EN 1993-1-8 [18] oder der prEN 1993-1-8 [13] haben bei diesen Versuchsergebnissen keinen Einfluss, weswegen die Auswertung hier nur einmal durchgeführt wird.

## 5.8 Auswertung gesamte Versuchsergebnisse

Die letzte statistische Auswertung wertet alle verwendeten Versuchsdaten für alle verwendeten Stahlgüten und Verbindungsmittelanzahlen aus. Hier werden nur die Versuchsergebnisse berücksichtigt, die den zuvor festgehaltenen normativen Anforderungen entsprechen. Es werden erneut die Berechnungsmethoden der DIN EN 1993-1-8 [18] und der prEN 1993-1-8 [13] miteinander verglichen.

In Abbildung 5-11 ist in a) auf der Ordinate wie bereits in den vorangegangenen Auswertungen der experimentelle Widerstand  $r_e$  eingetragen und auf der Abszisse der theoretische Lochleibungswiderstand  $r_t$ . In b) ist auf der Abszisse ebenfalls  $r_t$  und auf der Ordinate das Verhältnis zwischen  $r_e$  und  $r_t$  aufgetragen.

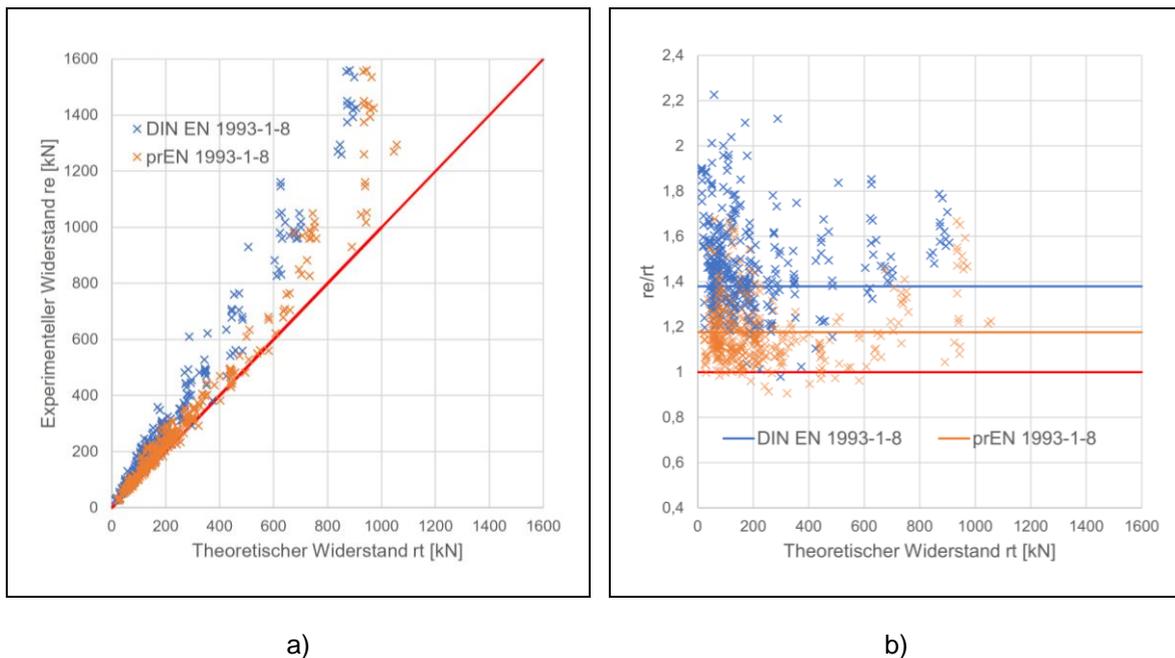


Abbildung 5-11: Vergleich rechnerischer und experimenteller Widerstände für alle Versuchsergebnisse; a) Vergleich  $r_t$  und  $r_e$ ; b) normativer Vergleich

In a) ist in Orange der theoretische Lochleibungswiderstand markiert, der mit den Formeln der prEN 1993-1-8 [13] berechnet wurde. In Blau sind die theoretischen Ergebnisse nach der DIN EN 1993-1-8 [18] eingezeichnet. Die Winkelhalbierende wurde hier mit Rot markiert. Es ist abzulesen, dass die orangenen Kreuze näher an der Winkelhalbierenden liegen als die blauen Kreuze und dass sich ein Großteil der Kreuze mit steigenden theoretischen und experimentellen Widerständen von der Winkelhalbierenden entfernt.

Um dies genauer zu verifizieren, wurde in Abbildung 5-11 b) das  $r_e/r_t$ -Verhältnis der DIN EN 1993-1-8 [18] als Mittelwert aller Ergebnisse in Blau und der prEN 1993-1-8 [13] als Mittelwert aller Ergebnisse in Orange eingetragen. Der Mittelwert liegt bei den Berechnungen nach DIN EN 1993-1-8 [18] bei einem Wert von 1,379 und bei den Berechnungen nach prEN 1993-1-8 [13] bei einem Wert von 1,176. Die theoretischen Widerstände der DIN EN 1993-1-8 [18] sind somit im Durchschnitt ca. 20% größer als die der prEN 1993-1-8 [13]. Da beide Mittelwerte über dem Verhältniswert von Eins liegen, sind die theoretischen Widerstände jedoch bei beiden Berechnungsarten im Durchschnitt kleiner als die experimentell ermittelten Lochleibungswiderstände.

In der Tabelle Tab. 5-11 sind die nächsten Schritte der hier geführten Auswertung nach dem Auswertungsverfahren der DIN EN 1990, Anhang D [15] festgehalten. In der Tabelle sind in der Grau hinterlegten Zeile die Ergebnisse der Auswertungen der DIN EN 1993-1-8 [18] und in Weiß die Ergebnisse der Auswertung der prEN 1993-1-8 [13] zusammengefasst.

Tab. 5-11: Ergebnisse der Auswertung aller Versuchsergebnisse

Auswertungsgruppe	Anzahl	b	$V_\delta$	$V_r^2$	$r_k$		$r_d$		$\gamma_M$	kc	$\gamma_M^*$
Alle Versuche	386	1,515	0,133	0,143	0,755	*b * grt(Xm)	0,600	*b * grt(Xm)	1,257	1,220	1,012
		1,254	0,115	0,124	0,774	*b * grt(Xm)	0,629	*b * grt(Xm)	1,232	1,188	1,168

Die Beobachtung die aus der Abbildung 5-11 getroffen wurde, und die besagt, dass die theoretischen Widerstände der DIN EN 1993-1-8 [18] größer sind als die der prEN 1993-1-8 [13], wird durch den Mittelkorrekturbeiwert b ebenfalls unterstützt. Mit einem Wert von 1,515 ist der Wert der gültigen Norm ca. 26% größer als der Wert des Entwurfs mit 1,254. Beide Kennwerte liegen jedoch über dem anzustrebenden Grenzwert von 1,15. Die Variationskoeffizienten der Streuungen liegen mit 13,3% und 11,5% ebenfalls über dem Grenzwert von 10%, weswegen die Einteilung in die unterschiedlichen Auswertungsgruppen vorgenommen wurde.

Mit den Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma_M^*$  von 1,012 und 1,168 können beide Berechnungsweisen theoretisch als sicher angesehen werden. Die Ergebnisse der Auswertung der DIN EN 1993-1-8 [18] liegen damit ca. 25% von dem Zielwert  $\gamma_{M2}=1,25$  entfernt, wohingegen der Abstand bei der prEN 1993-1-8 [13] bei 8% liegt. Auch in der Auswertung mit allen Versuchsergebnissen wird sichtbar, dass die theoretischen Lochleibungswiderstände, die mit der DIN EN 1993-1-8 [18] berechnet werden, den tatsächlichen Widerstand deutlich unterschätzen, sodass es zu großen Abweichungen zwischen den experimentellen und theoretischen Werten kommt. Für die prEN 1993-1-8 [13] zeigt sich zudem erneut, dass die Bemessungsgleichungen eine wirtschaftlichere Bemessung ermöglichen.

Für die derzeit gültige Norm wurden im BGD [25] die statistischen Auswertungen für die einzelnen Verbindungsnachweise festgehalten. Somit liegen auch für den Lochleibungsnachweis Angaben zu Teilsicherheitsbeiwerten, Mittelkorrekturbeiwerten und Variationskoeffizienten vor. Es wurde dabei ebenfalls zwischen den Stahlgüten S235, S275, S355, S460 und S690 und den verschiedenen Schraubenanzahlen unterschieden. [25]

Die Auswertung für Bleche ist in Abbildung 5-12 dargestellt.

(sub) sample	no. of tests	$k_s$	$k_d$	$\bar{b}$	$V_\delta$	$R_k$	$R_d$	$\gamma_M$	$\Delta K$	$\gamma_M^*$
61.10	167	1.64	3.04	1.524	0.195	0.767	0.619	1.356	0.830	1.124
61.11	137	1.64	3.04	1.561	0.201	0.762	0.610	1.368	0.820	1.119
61.12	7	2.25	4.05	1.324	0.037	0.778	0.639	1.217	0.842	1.024
61.13	10	2.10	3.80	1.387	0.016	0.801	0.673	1.191	0.780	0.929
61.14	6	2.33	4.20	1.413	0.043	0.766	0.622	1.232	0.801	0.987
61.15	7	2.25	4.05	1.295	0.025	0.784	0.648	1.210	0.854	1.033

Abbildung 5-12: Statistische Auswertung BGD Lochleibungsnachweis ([25],6.02 S. I 94)

In der ersten Zeile ist dort die Auswertung für alle Testergebnisse zusammengefasst. Vergleicht man den Mittelkorrekturbeiwert mit dem berechneten Mittelkorrekturwert aus allen Versuchen in dieser Arbeit, liegt die Differenz lediglich bei 1%. Jedoch liegen die Teilsicherheitsbeiwerte von 1,012 aus dieser Arbeit und 1,24 aus dem BGD [25] mit ca. 11% im Vergleich weit auseinander. Dies ist der höheren Versuchsanzahl und größerer Bandbreite an Versuchsserien in dieser Arbeit geschuldet. Zudem liegt auch hier der Kennwert ca. 13% unter dem anzunehmenden Zielwert  $\gamma_{M2} = 1,25$ . Es zeigt sich, dass schon im BGD [25] die Lochleibungswiderstände unterschätzt wurden und schon damals der Lochleibungsnachweis als konservativ angesehen werden konnte. Hier wurde die Formel, die sowohl für Bleche als auch Winkel gültig ist, jedoch nicht noch einmal angepasst, da die statistischen Auswertungen für Winkel einen Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M^*$  von 1,217 ergeben, welcher sehr gut zu dem Zielwert  $\gamma_{M2}=1,25$  passt. [25]

## 5.9 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich zu den geführten Auswertungen sagen, dass zwischen dem Entwurf prEN 1993-1-8 [13] und der DIN EN 1993-1-8 [18] große Unterschiede in Bezug auf die Auswertungsergebnisse liegen.

Um einen gesamten Überblick über die Ergebnisse zu bekommen, wurden in den folgenden beiden Tabellen Tab. 5-12 und Tab. 5-13 die Ergebnisse nach der Berechnungsmethode der DIN EN 1993-1-8 [18] und nach dem Entwurf prEN 1993-1-8 [13] dargestellt. Es wurden sowohl die Anzahl der Versuchsergebnisse, der Mittelkorrekturbeiwert  $b$  und der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M^*$  für die jeweiligen Auswertungsgruppen angegeben. Anschließend wurde für den Mittelkorrekturbeiwert und den Teilsicherheitsfaktor der nach Anzahl gewichtete Durchschnitt aus den Auswertungsgruppen S235 bis S690 für die jeweilige Methode berechnet.

Tab. 5-12: Zusammenfassung der Ergebnisse nach der Berechnung der DIN EN 1993-1-8 [18]

Auswertungsgruppe	Verbindungsmittel	Anzahl	b	$\gamma_M^*$
S235	1	145	1,472	1,025
	2	76	1,340	1,132
	>2	39	1,440	0,981
S275	1	20	1,403	1,124
S355	1	20	1,361	1,000
	2	39	1,432	0,987
	>2	28	1,561	0,917
S460	1	4	1,679	1,983
S550	1	5	1,038	1,717
S690	1	10	1,291	1,874
Durchschnitt			1,428	1,075
Alle Versuche		386	1,515	1,012

An dem Durchschnittswert des Mittelkorrekturbeiwertes  $b$  der sechs Auswertungsgruppen in der Tabelle Tab. 5-12 ist ablesbar, dass die theoretisch berechneten Lochleibungswiderstände deutlich größer sind als die experimentell ermittelten. Mit 1,428 ist dieser Wert ca. 20% größer als der maximal anzustrebende Wert 1,15. Auch an dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M^*$  von 1,012 ist zu erkennen, dass die theoretischen Werte zu gering vorhergesagt werden und der Lochleibungswiderstand durch die Formeln aus der DIN EN 1993-1-8 [18] unterschätzt werden. Der durchschnittliche Mittelkorrekturbeiwert weicht um ca. 9% von dem  $b$ -Wert der Auswertung von allen Versuchen ab.

Der Teilsicherheitsbeiwert ist mit einem Wert von 1,075 um 18% kleiner als der Zielwert  $\gamma_{M2} = 1,25$ , und die Verbindungen, die mit den Nachweisen aus der aktuellen DIN geführt werden, gelten somit zwar als sicher, jedoch ist zu erkennen, dass die Berechnungsform konservativ ist und zu viele Sicherheiten bzw. Abminderungen des Widerstandes eingearbeitet wurden. Selbst bei den hochfesten Stählen, bei denen der Nachweis des Lochleibungswiderstandes nach der DIN EN 1993-1-8 [18] nicht gültig ist, da die untersuchten Schraubverbindungen nicht der Anschlusskategorie C angehören, liegt der Mittelkorrekturbeiwert  $b$

über 1. Die Teilsicherheitsbeiwerte liegen hier zwar über 1,25, jedoch ist dies hauptsächlich der geringen Versuchsanzahl und großen Streuungen der Versuchsergebnisse geschuldet.

Vergleicht man die durchschnittlichen Kennwerte in dieser Arbeit mit den berechneten Ergebnissen aus der Auswertung mit allen Versuchen dieser Arbeit, lässt sich an dem Teilsicherheitsbeiwert erkennen, wie wichtig es ist, Untergruppen für statistische Auswertungen zu bilden. Durch diese Einteilung wurden die Streuungen der Versuchsreihen deutlich verringert und auch der Mittelkorrekturbeiwert sinkt um ca. 9% von 1,515 auf 1,428.

Der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M^*$  hat sich hingegen um ca. 7% von 1,012 auf 1,075 erhöht. Die liegt zum einen an den geringeren Mittelkorrekturbeiwerten zum anderen aber auch an den Auswertungen mit geringer Versuchsanzahl.

Die Beobachtungen über die hochfesten Stähle wurden auch in [64] durch Y. Wang, Y. Lyu et al. getroffen. Sie haben ebenfalls festgestellt, dass die theoretisch berechneten Lochleibungswiderstände der DIN EN 1993-1-8 [18] auch bei hochfesten Stählen geringer sind als die experimentell ermittelten Werte und sie stellen die These auf, dass mit dem Eurocode 3 ebenfalls die Lochleibungswiderstände sehr konservativ für hochfeste Stähle vorhergesagt werden können. [64]

In Kapitel 5.8 wurde bereits ein Vergleich zwischen den Teilsicherheitsbeiwert für alle Versuchsergebnisse und den im BGD [25] festgehaltenen Teilsicherheitsbeiwerten der statistischen Auswertungen geführt. Es hat sich gezeigt, dass schon durch die statistische Auswertung im BGD [25] festgestellt werden konnte, dass das Bemessungskonzept für Stahlbleche als konservativ anzusehen ist.

In der Tabelle Tab. 5-13 sind die Ergebnisse der statistischen Auswertung der prEN 1993-1-8 [13] festgehalten.

Tab. 5-13: Zusammenfassung der Ergebnisse nach der Berechnung des Entwurfs prEN 1993-1-8 [13]

Auswertungsgruppe	Verbindungsmittel	Anzahl	b	$\gamma_M^*$
S235	1	145	1,200	1,233
	2	76	1,081	1,235
	>2	39	1,195	0,965
S275	1	20	1,087	1,209
S355	1	20	1,117	1,234
	2	39	1,096	1,214
	>2	28	1,345	1,100
S460	1	4	1,339	1,418
S550	1	5	0,961	1,854
S690	1	10	1,149	1,091
Durchschnitt			1,163	1,200
Alle Versuche		386	1,254	1,168

Betrachtet man im Gegensatz zu den Auswertungsergebnissen der DIN EN 1993-1-8 [18] die Ergebnisse mit dem Berechnungsmodell aus dem Entwurf prEN 1993-1-8 [13] in Tabelle Tab. 5-13, so werden sofort große Unterschiede deutlich.

Mit dem Mittelkorrekturbeiwert  $b$  von 1,163 befindet sich der Wert nur 1% über dem anzustrebenden Bereich von 0,85 bis 1,15. Die theoretisch ermittelten Lochleibungswiderstände stimmen somit gut mit den experimentell ermittelten Versuchsergebnissen überein. Mit einem berechneten durchschnittlichen Teilsicherheitsbeiwert von 1,188 liegt der Kennwert 5% unter dem anzustrebenden Zielwert  $\gamma_{M2}=1,25$ . Die Berechnungsmethode nach prEN 1993-1-8 [13] ist somit ebenfalls als sicher anzusehen und führt zu wirtschaftlichen Bemessungen.

Auch bei der Auswertung der prEN 1993-1-8 [13] wird deutlich, wie wichtig es ist Untergruppen für statistische Auswertungen zu bilden. Hier weicht der durchschnittliche Mittelkorrekturbeiwert genau wie bei der Betrachtung der DIN EN 1993-1-8 [18] ca. 9% von dem  $b$ -Wert bei der Auswertung aller Versuchsergebnisse ab. Bei den Teilsicherheitsbeiwerten liegt der Unterschied hier lediglich bei ungefähr 3%.

In [54] wurde ebenfalls eine statistische Auswertung zu den Formeln der prEN 1993-1-8 [13] mit Stahlverbindungen der Stahlgüten S235 bis S700 durchgeführt. Hier ist ebenfalls das Ergebnis der Auswertung, dass das Bemessungskonzept für die dort verwendeten Versuchsergebnisse als sinnvoll angesehen werden kann und dass alle Kriterien der Zuverlässigkeit durch das Bemessungskonzept erfüllt werden. [54]

Bei der Auswertung der einzelnen Stahlgüten ist deutlich geworden, welche große Rolle der Nachweis auf Blockversagen bei geschraubten Stahlverbindungen spielt. Wie bereits in dem Kapitel 3.3 erläutert, wurde dem Nachweis auf Blockversagen in dem Entwurf prEN 1993-1-8 [13] deutlich mehr Aufmerksamkeit zugebracht als in der jetzt gültigen Norm, da erkannt wurde, dass dieser nicht so unbedeutend ist, wie bisher angenommen. [54] Diese Tatsache wurde durch die geführte Auswertung nur unterstrichen. Bei fast allen theoretischen Widerständen, die für Verbindungen bei einseitig angeschlossenen Winkeln mit mehreren Schrauben berechnet wurden, ist der Lochleibungswiderstand durch den Widerstand auf Blockversagen begrenzt worden. Der Unterschied zwischen den theoretischen Widerständen lag teilweise bei bis zu 30%, was die Tatsache unterstreicht, wie wichtig der Nachweis auf Blockversagen für die Berechnung und Bewertung eines geschraubten Stahlanschlusses sein kann. Sowohl der Lochleibungsnachweis als auch der Blockversagensnachweis müssen berücksichtigt werden.

Der Unterschied zwischen den beiden Berechnungsmethoden nach der DIN EN 1993-1-8 [18] und der prEN 1993-1-8 [13] ist groß, obwohl beide Methoden als sicher gelten. Der Lochleibungswiderstand wird jedoch durch die Formeln aus der DIN EN 1993-1-8 [18] stark unterschätzt, was dazu führt, dass die Formeln als konservativ anzusehen sind, da eine Unterschätzung des Widerstands dazu führt, dass Stahlbleche dicker und mit höheren Stahlgüten ausgeführt werden, als sie es eigentlich müssten.

Das ist auch der Schluss, der in der Literatur gezogen wurde. In [56] ziehen P. Moze, F. Yang und M. Veljokiv z.B. ebenfalls das Fazit, dass bei ihren untersuchten Lochleibungsversuchen die Widerstände durch die DIN EN 1993-1-8 [18] zwischen 38% bis 58% unterschätzt wurden, wohingegen die Berechnungen nach prEN 1993-1-8 [13] nur eine Abweichung von 6% bis 22% aufwiesen. Sie kommen ebenfalls zu dem Schluss, dass die Formeln des Entwurfs zu realistischen Vorhersagen des Lochleibungswiderstands kommen und die jetzige Norm als konservativ anzusehen ist. [56]

Die beschriebene Differenz zwischen den Berechnungsweisen der DIN EN 1993-1-8 [18] und der prEN 1993-1-8 [13] liegt an mehreren Faktoren, zum einem an dem maximal möglichen Faktor von  $\alpha_b \cdot k_1$  bzw.  $\alpha_b \cdot k_m$ , der in den Formeln der DIN EN 1993-1-8 [18] bei 2,5 liegt und bei dem Entwurf bei 3. Der Lochleibungswiderstand wird somit bereits um 20% erhöht. Zum anderen haben in der aktuellen Norm auch die Randabstände  $e_2$  und  $p_2$  einen Einfluss auf den Widerstand, diese werden in dem prEN 1993-1-8 [13] hingegen komplett vernachlässigt. Die theoretisch ermittelten Ergebnisse nach der DIN EN 1993-1-8 [18] sind durch den Einfluss dieser beiden Randabstände oft deutlich niedriger als die Ergebnisse der neuen Berechnungsmethode.

Um den Einfluss aller Rand- und Lochabstände auf die Widerstandsmodelle genauer zu untersuchen, wird im folgenden Kapitel eine Parameterstudie erstellt, bei der die Ergebnisse beider Berechnungsmethoden an einem Schraubanschluss untersucht werden. Neben dem Einfluss der unterschiedlichen Abstände soll auch der Einfluss der Lochleibungsverformungen untersucht werden.

## 6 Parameterstudie am Beispiel eines Schraubanschlusses

Ziel dieses Kapitels ist die Untersuchung, inwieweit die geometrischen Parameter den Lochleibungswiderstand beeinflussen und wie sich Veränderungen der geometrischen Parameter auf die Widerstände nach den Berechnungsmethoden der DIN EN 1993-1-8 [18] und prEN 1993-1-8 [13] auswirken.

In Kapitel 3.3 wurde bereits beschrieben, dass es während der Kraftübertragung zwischen Schraube und Stahlblech zu einer Einbettung der Schraube in das Stahlblech kommt. [56] Dies führt zu Lochleibungsverformungen am Lochrand. Daher wird zusätzlich untersucht, wie die Lochleibungsverformungen und der Lochleibungswiderstand zusammenhängen und welchen Einfluss die geometrischen Parameter auf diese Verformung haben.

Zuerst wird das System beschrieben, welches in der Parameterstudie untersucht wird. Im Anschluss erfolgt die Bemessung nach den beiden Berechnungsmethoden inklusiver der Betrachtung von Lochleibungsverformungen und anknüpfend werden die Ergebnisse ausgewertet und evaluiert.

### 6.1 System

Damit alle Rand- und Lochabstände untersucht werden können, wird eine Schraubverbindung gewählt, bei der sechs Schrauben angeordnet werden, sodass sowohl in Krafrichtung als auch quer zur Krafrichtung Rand- und Lochabstände vorhanden sind.

Das System der Schraubverbindung ist in Abbildung 6-1 in der Draufsicht und in Abbildung 6-2 in der Ansicht dargestellt.

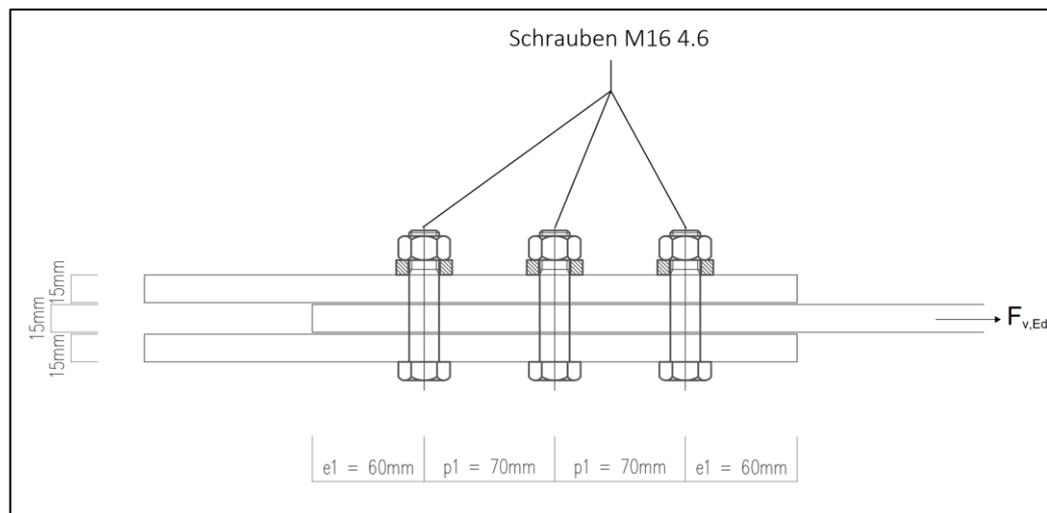


Abbildung 6-1: Schraubverbindung Parameterstudie Draufsicht

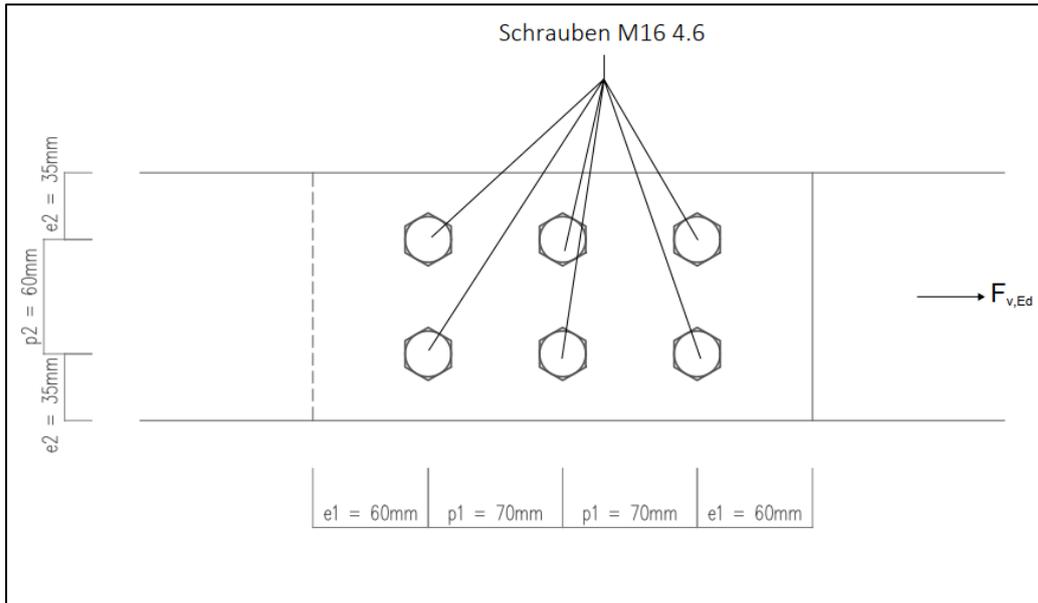


Abbildung 6-2: Schraubverbindung Parameterstudie Ansicht

Die angegebenen Rand- und Lochabstände sind als Ausgangsdaten anzusehen. Sie werden nacheinander jeweils einzeln verändert, damit die Auswirkungen jedes Entwurfsparameters eindeutig sind. Der Randabstand in Krafrichtung  $e_1$  wird mit 60mm, der Schraubenabstand in Krafrichtung  $p_1$  mit 70mm festgelegt. Quer zur Kraft wird der Randabstand  $e_2$  mit 35mm festgelegt und der Schraubenabstand  $p_2$  mit 60mm.

Da sich der Nachweis des Lohleibungswiderstandes nur durch die Parameter  $\alpha_b$  und  $k_1$  bzw.  $k_m$  zwischen der DIN EN 1993-1-8 [18] und der prEN 1993-1-8 [13] unterscheidet, werden die Blechdicke  $t$ , der Schraubendurchmesser  $d$  und der Lochdurchmesser  $d_0$ , sowie die Zugfestigkeit des Stahlbleches  $f_u$  für beide Berechnungen mit den gleichen Parametern angenommen. Die Zugfestigkeit der Schrauben  $f_{ub}$  wird so gewählt, dass die Festigkeit der Schraube größer als die Zugfestigkeit des Bleches ist, damit es nicht zum Abscheren der Schraube kommt und Lochleibungsversagen maßgebend wird.

Tab. 6-1: Festgelegte Parameter

Blechdicke $t$	15mm
Schraubendurchmesser $d$	16mm
Lochdurchmesser $d_0$	18mm
Stahlsorte	S235
Schraubenfestigkeit	4.6
Zugfestigkeit Stahlsorte $f_u$	360 N/mm <sup>2</sup>
Zugfestigkeit Schraubenwerkstoff $f_{ub}$	400 N/mm <sup>2</sup>

In den folgenden zwei Unterkapiteln werden zuerst die Ergebnisse der Lochleibungswiderstände nach DIN EN 1993-1-8 [18] aufgeführt. Danach wird der Anschluss nach dem Entwurf prEN 1993-1-8 [13] bemessen. Bei dem Anschluss besteht die Möglichkeit, dass Blockversagen theoretisch maßgebend werden kann. Da jedoch untersucht werden soll, inwieweit die Anschlussgeometrie einen Einfluss auf die Lochleibung hat, wird der Nachweis auf Blockversagen vernachlässigt.

## 6.2 Bemessung nach DIN EN 1993-1-8 [18]

Für die Bemessung der Schraubverbindung werden die Formeln nach Gleichung 5.3 bis 5.9 dieser Arbeit verwendet. Die Berechnung erfolgt in Tabellenform mit Excel.

$$F_{b,Ed} \leq F_{b,Rd} \quad (3.3)$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} \quad (3.4)$$

$$\alpha_b = \min \left\{ \alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right\} \quad (3.5)$$

Für am Rand liegende Schrauben in Krafrichtung  $\alpha_d = \frac{e_1}{3 * d_0} \quad (3.6)$

Für innen liegende Schrauben in Krafrichtung  $\alpha_d = \frac{p_1}{3 * d_0} - \frac{1}{4} \quad (3.7)$

Für am Rand liegende Schrauben quer zur Krafrichtung  $k_1 = \min \left\{ 2,8 * \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 1,4 * \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\} \quad (3.8)$

Für innen liegende Schrauben quer zur Krafrichtung  $k_1 = \min \left\{ 1,4 * \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\} \quad (3.9)$

Genauere Informationen zu diesen Formeln können dem Kapitel 3.1.2 dieser Arbeit entnommen werden.

Für die Untersuchung der unterschiedlichen Einflüsse der einzelnen Abstände wurde im ersten Schritt der Randabstand in Krafrichtung  $e_1$  variiert. Es wird ein Randabstand von 25mm bis 60mm untersucht. Dieser Abstand hat einen Einfluss auf den Parameter  $\alpha_d$  für am Rand liegende Schrauben und somit einen Einfluss auf  $\alpha_b$ . Mit 22mm wird der minimal notwendige Randabstand, der nach DIN EN 1993-1-8 [18] mit  $1,2 * d_0$  festgelegt ist, eingehalten und der nächstmögliche aufgerundete Millimeterabstand verwendet.

Tab. 6-2: Parameterstudie DIN EN 1993-1-8 [18] Änderungen  $e_1$ 

	Randschrauben		Innenschrauben		Ergebnisse				
	In KR	Quer	In KR	Quer	Rand	Innen	Rand gesamt	Innen gesamt	Fb,Rk [kN] Gesamt
	$\alpha_b$	$k_1$	$\alpha_b$	$k_1$	Fb,Rk [N]	Fb,Rk [N]	Fb,Rk [kN]	Fb,Rk [kN]	
e1 [mm]									
22,0	0,41	2,50	1,00	2,50	88000	216000	352,0	432,0	784,0
23,0	0,43	2,50	1,00	2,50	92000	216000	368,0	432,0	800,0
24,0	0,44	2,50	1,00	2,50	96000	216000	384,0	432,0	816,0
25,0	0,46	2,50	1,00	2,50	100000	216000	400,0	432,0	832,0
26,0	0,48	2,50	1,00	2,50	104000	216000	416,0	432,0	848,0
27,0	0,50	2,50	1,00	2,50	108000	216000	432,0	432,0	864,0
28,0	0,52	2,50	1,00	2,50	112000	216000	448,0	432,0	880,0
29,0	0,54	2,50	1,00	2,50	116000	216000	464,0	432,0	896,0
30,0	0,56	2,50	1,00	2,50	120000	216000	480,0	432,0	912,0
31,0	0,57	2,50	1,00	2,50	124000	216000	496,0	432,0	928,0
32,0	0,59	2,50	1,00	2,50	128000	216000	512,0	432,0	944,0
33,0	0,61	2,50	1,00	2,50	132000	216000	528,0	432,0	960,0
34,0	0,63	2,50	1,00	2,50	136000	216000	544,0	432,0	976,0
35,0	0,65	2,50	1,00	2,50	140000	216000	560,0	432,0	992,0
36,0	0,67	2,50	1,00	2,50	144000	216000	576,0	432,0	1008,0
37,0	0,69	2,50	1,00	2,50	148000	216000	592,0	432,0	1024,0
38,0	0,70	2,50	1,00	2,50	152000	216000	608,0	432,0	1040,0
39,0	0,72	2,50	1,00	2,50	156000	216000	624,0	432,0	1056,0
40,0	0,74	2,50	1,00	2,50	160000	216000	640,0	432,0	1072,0
41,0	0,76	2,50	1,00	2,50	164000	216000	656,0	432,0	1088,0
42,0	0,78	2,50	1,00	2,50	168000	216000	672,0	432,0	1104,0
43,0	0,80	2,50	1,00	2,50	172000	216000	688,0	432,0	1120,0
44,0	0,81	2,50	1,00	2,50	176000	216000	704,0	432,0	1136,0
45,0	0,83	2,50	1,00	2,50	180000	216000	720,0	432,0	1152,0
46,0	0,85	2,50	1,00	2,50	184000	216000	736,0	432,0	1168,0
47,0	0,87	2,50	1,00	2,50	188000	216000	752,0	432,0	1184,0
48,0	0,89	2,50	1,00	2,50	192000	216000	768,0	432,0	1200,0
49,0	0,91	2,50	1,00	2,50	196000	216000	784,0	432,0	1216,0
50,0	0,93	2,50	1,00	2,50	200000	216000	800,0	432,0	1232,0
51,0	0,94	2,50	1,00	2,50	204000	216000	816,0	432,0	1248,0
52,0	0,96	2,50	1,00	2,50	208000	216000	832,0	432,0	1264,0
53,0	0,98	2,50	1,00	2,50	212000	216000	848,0	432,0	1280,0
54,0	1,00	2,50	1,00	2,50	216000	216000	864,0	432,0	1296,0
55,0	1,00	2,50	1,00	2,50	216000	216000	864,0	432,0	1296,0
56,0	1,00	2,50	1,00	2,50	216000	216000	864,0	432,0	1296,0
57,0	1,00	2,50	1,00	2,50	216000	216000	864,0	432,0	1296,0
58,0	1,00	2,50	1,00	2,50	216000	216000	864,0	432,0	1296,0
59,0	1,00	2,50	1,00	2,50	216000	216000	864,0	432,0	1296,0
60,0	1,00	2,50	1,00	2,50	216000	216000	864,0	432,0	1296,0

In der Tabelle Tab. 6-2 ist die Berechnung des Lochleibungswiderstandes zusammengetragen. In den ersten Spalten ist der Randabstand  $e_1$  festgehalten. Die anderen geometrischen Parameter werden nicht geändert und können Kapitel 6.1 entnommen werden. Im Anschluss erfolgt die Berechnung der Parameter  $\alpha_b$  und  $k_1$  für am Rand liegende sowie innen liegende Schrauben. Für jede Schraube wird der jeweilige Lochleibungswiderstand berechnet, um diesen dann mit der jeweiligen Schraubenanzahl zu multiplizieren und am Ende dann in der letzten Spalte einen gesamten Lochleibungswiderstand zu erhalten.

In Gelb ist die Spalte markiert worden, in der der Randabstand  $e_1$  variiert wird. Man erkennt, dass durch die Variation der Parameter  $\alpha_b$  für Randschrauben ebenfalls verändert wird, bis er ab einem Randabstand von 54mm den maximal Wert Eins erreicht. Sowohl  $\alpha_b$  für innen liegende Schrauben als auch die  $k_1$ -Werte bleiben konstant. Mit einem Startwert von

$\alpha_b=0,41$  kommt es durch geringe Randabstände zu einer Verringerung des Lochleibungswiderstandes für eine am Rand liegende Schraube von ca. 60%. Eine visuelle Auswertung dieser Ergebnisse erfolgt im Kapitel 6.5 dieser Arbeit.

Der nächste Abstand, der variiert wird, ist der Randabstand  $e_2$ . Dieser Parameter hat Auswirkungen auf den Kennwert  $k_1$  für am Rand liegende Schrauben. Damit  $e_2$  in der Gleichung 5.9 maßgebend wird, wird der Parameter  $p_2$  so gewählt, dass sein Anteil in der Gleichung bei über 2,5 liegt. Der Parameter  $e_2$  wird somit für  $k_1$  maßgebend. Die Variation von  $e_2$  liegt zwischen 22mm und 35mm und der minimale Lochabstand nach DIN EN 1993-1-8 [18] mit  $1,2 \cdot d_0$  ist damit ebenfalls eingehalten. Mit 22mm wird der nächstmögliche gerundete Millimeterabstand verwendet.

Die Berechnung des Lochleibungswiderstandes kann der Tabelle Tab. 6-3 entnommen werden. Der Aufbau der Tabelle entspricht dabei dem der Tabelle Tab. 6-2, wohingegen hier der Parameter  $e_2$  variiert wird. An dem wechselnden Wert für  $k_1$  bei den am Rand liegenden Schrauben ist der Einfluss des Randabstands  $e_2$  deutlich ablesbar. Der Kennwert  $k_1$  steigt an, bis ab einem  $e_2$ -Wert von 27mm der maximale Wert von 2,5 für  $k_1$  erreicht wird. Der Anfangswert von  $k_1$  liegt bei 1,72, durch die Verringerung des Randabstandes  $e_2$  kann es so zu einer Abminderung des Lochleibungswiderstandes von bis zu 30% kommen. Die visuelle Auswertung für Änderungen von  $e_2$  erfolgt ebenfalls im Kapitel 6.5 dieser Arbeit.

Tab. 6-3: Parameterstudie DIN EN 1993-1-8 [18] Änderungen  $e_2$

	Randschrauben		Innenschrauben		Ergebnisse				Fb,Rk [kN] Gesamt
	In KR	Quer	In KR	Quer	Rand	Innen	Rand gesamt	Innen gesamt	
$e_2$ [mm]	$\alpha_b$	$k_1$	$\alpha_b$	$k_1$	Fb,Rk [N]	Fb,Rk [N]	Fb,Rk [kN]	Fb,Rk [kN]	
22,0	1,00	1,72	1,00	2,50	148800	216000	595,2	432,0	1027,2
23,0	1,00	1,88	1,00	2,50	162240	216000	649,0	432,0	1081,0
24,0	1,00	2,03	1,00	2,50	175680	216000	702,7	432,0	1134,7
25,0	1,00	2,19	1,00	2,50	189120	216000	756,5	432,0	1188,5
26,0	1,00	2,34	1,00	2,50	202560	216000	810,2	432,0	1242,2
27,0	1,00	2,50	1,00	2,50	216000	216000	864,0	432,0	1296,0
28,0	1,00	2,50	1,00	2,50	216000	216000	864,0	432,0	1296,0
29,0	1,00	2,50	1,00	2,50	216000	216000	864,0	432,0	1296,0
30,0	1,00	2,50	1,00	2,50	216000	216000	864,0	432,0	1296,0
31,0	1,00	2,50	1,00	2,50	216000	216000	864,0	432,0	1296,0
32,0	1,00	2,50	1,00	2,50	216000	216000	864,0	432,0	1296,0
33,0	1,00	2,50	1,00	2,50	216000	216000	864,0	432,0	1296,0
34,0	1,00	2,50	1,00	2,50	216000	216000	864,0	432,0	1296,0
35,0	1,00	2,50	1,00	2,50	216000	216000	864,0	432,0	1296,0

Der dritte Parameter, der in diesem Kapitel verändert wird, ist der Lochabstand in Krafrichtung  $p_1$ . Dieser Parameter wird in der Gleichung 3.7 mit  $\alpha_d$  berücksichtigt und hat somit Auswirkungen auf den Kennwert  $\alpha_b$  für innen liegende Schrauben. Der Parameter  $p_1$  wird im Folgenden von 40mm in 1mm Schritten auf 70mm erhöht und erfüllt somit die Angaben der DIN EN 1993-1-8 [18] für den minimalen Lochabstand von  $2,2 \cdot d_0$ . Mit 40mm wurde der nächstmögliche gerundete Millimeterabstand verwendet.

Tab. 6-4: Parameterstudie DIN EN 1993-1-8 [18] Änderungen  $p_1$ 

p1 [mm]	Randschrauben		Innenschrauben		Ergebnisse				
	In KR	Quer	In KR	Quer	Rand	Innen	Rand gesamt	Innen gesamt	Fb,Rk [kN] Gesamt
	alpha_b	k1	alpha_b	k1	Fb,Rk [N]	Fb,Rk [N]	Fb,Rk [kN]	Fb,Rk [kN]	
40,0	1,00	2,50	0,49	2,50	216000	106000	864,0	212,0	1076,0
41,0	1,00	2,50	0,51	2,50	216000	110000	864,0	220,0	1084,0
42,0	1,00	2,50	0,53	2,50	216000	114000	864,0	228,0	1092,0
43,0	1,00	2,50	0,55	2,50	216000	118000	864,0	236,0	1100,0
44,0	1,00	2,50	0,56	2,50	216000	122000	864,0	244,0	1108,0
45,0	1,00	2,50	0,58	2,50	216000	126000	864,0	252,0	1116,0
46,0	1,00	2,50	0,60	2,50	216000	130000	864,0	260,0	1124,0
47,0	1,00	2,50	0,62	2,50	216000	134000	864,0	268,0	1132,0
48,0	1,00	2,50	0,64	2,50	216000	138000	864,0	276,0	1140,0
49,0	1,00	2,50	0,66	2,50	216000	142000	864,0	284,0	1148,0
50,0	1,00	2,50	0,68	2,50	216000	146000	864,0	292,0	1156,0
51,0	1,00	2,50	0,69	2,50	216000	150000	864,0	300,0	1164,0
52,0	1,00	2,50	0,71	2,50	216000	154000	864,0	308,0	1172,0
53,0	1,00	2,50	0,73	2,50	216000	158000	864,0	316,0	1180,0
54,0	1,00	2,50	0,75	2,50	216000	162000	864,0	324,0	1188,0
55,0	1,00	2,50	0,77	2,50	216000	166000	864,0	332,0	1196,0
56,0	1,00	2,50	0,79	2,50	216000	170000	864,0	340,0	1204,0
57,0	1,00	2,50	0,81	2,50	216000	174000	864,0	348,0	1212,0
58,0	1,00	2,50	0,82	2,50	216000	178000	864,0	356,0	1220,0
59,0	1,00	2,50	0,84	2,50	216000	182000	864,0	364,0	1228,0
60,0	1,00	2,50	0,86	2,50	216000	186000	864,0	372,0	1236,0
61,0	1,00	2,50	0,88	2,50	216000	190000	864,0	380,0	1244,0
62,0	1,00	2,50	0,90	2,50	216000	194000	864,0	388,0	1252,0
63,0	1,00	2,50	0,92	2,50	216000	198000	864,0	396,0	1260,0
64,0	1,00	2,50	0,94	2,50	216000	202000	864,0	404,0	1268,0
65,0	1,00	2,50	0,95	2,50	216000	206000	864,0	412,0	1276,0
66,0	1,00	2,50	0,97	2,50	216000	210000	864,0	420,0	1284,0
67,0	1,00	2,50	0,99	2,50	216000	214000	864,0	428,0	1292,0
68,0	1,00	2,50	1,00	2,50	216000	216000	864,0	432,0	1296,0
69,0	1,00	2,50	1,00	2,50	216000	216000	864,0	432,0	1296,0
70,0	1,00	2,50	1,00	2,50	216000	216000	864,0	432,0	1296,0

Der berechnete Lochleibungswiderstand kann der Tabelle Tab. 6-4 entnommen werden. Die gelb markierte Spalte zeigt die steigenden Werte von  $p_1$ . Man erkennt die Auswirkungen von  $p_1$  auf den  $\alpha_b$ -Wert für innen liegende Schrauben. Dieser Kennwert steigt so lange an, bis er bei einem  $p_1$  von 68mm seinen maximal Wert Eins erreicht. Mit einem Anfangswert für  $\alpha_b$  von 0,49 kommt es durch die Erhöhung von  $p_1$  zu einer Verringerung des Lochleibungswiderstandes für eine innen liegende Schraube von bis zu 51%. Die visuelle Auswertung der Ergebnisse erfolgt ebenfalls in dem Kapitel 6.5 dieser Arbeit.

Der letzte Parameter ist der Lochabstand quer zur Krafrichtung  $p_2$ . Dieser geometrische Parameter hat nicht nur Auswirkungen auf den Kennwert  $k_1$  für Randschrauben, sondern auch auf den  $k_1$ -Kennwert für innen liegende Schrauben. Dies zeigen die Gleichungen 3.8 und 3.9 dieser Arbeit. Damit  $p_2$  einen Einfluss auf den Kennwert  $k_1$  hat, wird für den Parameter  $e_2$  ein Wert von 35mm angenommen. So bleibt dieser Abschnitt der Gleichung 3.8 immer größer als 2,5 und  $p_2$  wird für den Kennwert  $k_1$  maßgebend.

Tab. 6-5: Parameterstudie DIN EN 1993-1-8 [18] Änderungen  $p_2$ 

$p_2$ [mm]	Randschrauben		Innenschrauben		Ergebnisse				
	In KR	Quer	In KR	Quer	Rand	Innen	Rand gesamt	Innen gesamt	Fb,Rk [kN] Gesamt
	alpha_b	k <sub>1</sub>	alpha_b	k <sub>1</sub>	Fb,Rk [N]	Fb,Rk [N]	Fb,Rk [kN]	Fb,Rk [kN]	
40,0	1,00	1,41	1,00	1,41	121920	121920	487,7	243,8	731,5
41,0	1,00	1,49	1,00	1,49	128640	128640	514,6	257,3	771,8
42,0	1,00	1,57	1,00	1,57	135360	135360	541,4	270,7	812,2
43,0	1,00	1,64	1,00	1,64	142080	142080	568,3	284,2	852,5
44,0	1,00	1,72	1,00	1,72	148800	148800	595,2	297,6	892,8
45,0	1,00	1,80	1,00	1,80	155520	155520	622,1	311,0	933,1
46,0	1,00	1,88	1,00	1,88	162240	162240	649,0	324,5	973,4
47,0	1,00	1,96	1,00	1,96	168960	168960	675,8	337,9	1013,8
48,0	1,00	2,03	1,00	2,03	175680	175680	702,7	351,4	1054,1
49,0	1,00	2,11	1,00	2,11	182400	182400	729,6	364,8	1094,4
50,0	1,00	2,19	1,00	2,19	189120	189120	756,5	378,2	1134,7
51,0	1,00	2,27	1,00	2,27	195840	195840	783,4	391,7	1175,0
52,0	1,00	2,34	1,00	2,34	202560	202560	810,2	405,1	1215,4
53,0	1,00	2,42	1,00	2,42	209280	209280	837,1	418,6	1255,7
54,0	1,00	2,50	1,00	2,50	216000	216000	864,0	432,0	1296,0
55,0	1,00	2,50	1,00	2,50	216000	216000	864,0	432,0	1296,0
56,0	1,00	2,50	1,00	2,50	216000	216000	864,0	432,0	1296,0
57,0	1,00	2,50	1,00	2,50	216000	216000	864,0	432,0	1296,0
58,0	1,00	2,50	1,00	2,50	216000	216000	864,0	432,0	1296,0
59,0	1,00	2,50	1,00	2,50	216000	216000	864,0	432,0	1296,0
60,0	1,00	2,50	1,00	2,50	216000	216000	864,0	432,0	1296,0

Der Lochabstand von 40mm wird in 1mm Schritten auf 60mm erhöht und es wurde somit der minimale gerundete Wert gewählt, den die aktuelle Norm mit  $2,2 \cdot d_0$  für den Lochabstand zulässt. [18]

Der Aufbau in der Tabelle Tab. 6-5 entspricht dem der Tabelle Tab. 6-2, mit dem Unterschied, dass die gelb markierte Spalte hier die Änderungen für  $p_2$  markiert. Es ist zu erkennen, dass durch die Steigerung von  $p_2$  der Kennwert  $k_1$  sowohl für am Rand liegende Schrauben als auch für innen liegende Schrauben steigt. Ab einem  $p_2$ -Wert von 54mm wird bei beiden Kennwerten der maximale Wert von 2,5 erreicht. Beide  $k_1$ -Kennwerte starten mit einem Wert von 1,41, was bedeutet, dass es zu einer Verringerung des Lochleibungswiderstands an allen Schrauben von ca. 44% kommen kann. Die visuelle Auswertung erfolgt in Verbindung mit den Werten aus dem prEN 1993-1-8 [13] in dem Kapitel 6.5 dieser Arbeit.

### 6.3 Bemessung nach prEN 1993-1-8 [13]

In diesem Unterkapitel wird der Schraubanschluss der Parameterstudie mit den Formeln aus der prEN 1993-1-8 [13] für den Lochleibungswiderstand bemessen. Die hierfür verwendeten Formeln aus [13] werden erneut dargestellt, weitergehende Informationen können jedoch dem Kapitel 3.2.2 dieser Arbeit entnommen werden.

$$F_{b,Ed} \leq F_{b,Rd} \quad (3.24)$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_m * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} \quad (3.25)$$

$$\text{Am Rand liegende Schrauben} \quad \alpha_b = \min \left\{ \frac{e_1}{d_0}; 3 * \frac{f_{ub}}{f_u}; 3,0 \right\} \quad (3.26)$$

$$\text{Innen liegende Schrauben} \quad \alpha_b = \min \left\{ \frac{p_1}{d_0} - \frac{1}{2}; 3 * \frac{f_{ub}}{f_u}; 3,0 \right\} \quad (3.27)$$

Neben dem allgemeinen Lochleibungsnachweis wird der Lochleibungswiderstand für am Rand liegende Schrauben mit der folgenden Gleichung nach [13] begrenzt.

$$N_{u,Rd} = \frac{2,0 * (e_2 - 0,5 * d_0) * t * f_u}{\gamma_{M2}} \quad (3.28)$$

Zusätzliche Informationen zu dieser Gleichung können ebenfalls dem Kapitel 3.2.2 dieser Arbeit entnommen werden.

Ähnlich wie bei den Berechnungen nach DIN EN 1993-1-8 [18] dieser Parameterstudie, wird zuerst der Randabstand in Krafrichtung  $e_1$  variiert. Dieser wird, beginnend bei 22mm in 1mm Schritten bis zu einem Wert von 60mm erhöht. Die minimal zulässigen Randabstände in der prEN 1993-1-8 [13] entsprechen denen der DIN EN 1993-1-8 [18] und müssen nicht erneut untersucht werden. Damit der maximal mögliche Lochleibungswiderstand ermittelt werden kann, wurde der Parameter  $p_1$  so gewählt, dass der  $\alpha_b$ -Wert für innen liegende Schrauben immer 3 ergibt. Die Ergebnisse der Berechnung können Tabelle Tab. 6-6 entnommen werden.

Tab. 6-6: Parameterstudie prEN 1993-1-8 [13] Änderungen  $e_1$ 

e1 [mm]	Randschrauben		Innenschrauben		Ergebnisse				
	In KR	Quer	In KR	Quer	Rand	Innen	Rand gesamt	Innen gesamt	Fb,Rk [kN] Gesamt
	alpha_b	km	alpha_b	km	Fb,Rk [N]	Fb,Rk [N]	Fb,Rk [kN]	Fb,Rk [kN]	
22,0	1,22	1,0	3,00	1,0	105600	259200	422,4	518,4	940,8
23,0	1,28	1,0	3,00	1,0	110400	259200	441,6	518,4	960,0
24,0	1,33	1,0	3,00	1,0	115200	259200	460,8	518,4	979,2
25,0	1,39	1,0	3,00	1,0	120000	259200	480,0	518,4	998,4
26,0	1,44	1,0	3,00	1,0	124800	259200	499,2	518,4	1017,6
27,0	1,50	1,0	3,00	1,0	129600	259200	518,4	518,4	1036,8
28,0	1,56	1,0	3,00	1,0	134400	259200	537,6	518,4	1056,0
29,0	1,61	1,0	3,00	1,0	139200	259200	556,8	518,4	1075,2
30,0	1,67	1,0	3,00	1,0	144000	259200	576,0	518,4	1094,4
31,0	1,72	1,0	3,00	1,0	148800	259200	595,2	518,4	1113,6
32,0	1,78	1,0	3,00	1,0	153600	259200	614,4	518,4	1132,8
33,0	1,83	1,0	3,00	1,0	158400	259200	633,6	518,4	1152,0
34,0	1,89	1,0	3,00	1,0	163200	259200	652,8	518,4	1171,2
35,0	1,94	1,0	3,00	1,0	168000	259200	672,0	518,4	1190,4
36,0	2,00	1,0	3,00	1,0	172800	259200	691,2	518,4	1209,6
37,0	2,06	1,0	3,00	1,0	177600	259200	710,4	518,4	1228,8
38,0	2,11	1,0	3,00	1,0	182400	259200	729,6	518,4	1248,0
39,0	2,17	1,0	3,00	1,0	187200	259200	748,8	518,4	1267,2
40,0	2,22	1,0	3,00	1,0	192000	259200	768,0	518,4	1286,4
41,0	2,28	1,0	3,00	1,0	196800	259200	787,2	518,4	1305,6
42,0	2,33	1,0	3,00	1,0	201600	259200	806,4	518,4	1324,8
43,0	2,39	1,0	3,00	1,0	206400	259200	825,6	518,4	1344,0
44,0	2,44	1,0	3,00	1,0	211200	259200	844,8	518,4	1363,2
45,0	2,50	1,0	3,00	1,0	216000	259200	864,0	518,4	1382,4
46,0	2,56	1,0	3,00	1,0	220800	259200	883,2	518,4	1401,6
47,0	2,61	1,0	3,00	1,0	225600	259200	902,4	518,4	1420,8
48,0	2,67	1,0	3,00	1,0	230400	259200	921,6	518,4	1440,0
49,0	2,72	1,0	3,00	1,0	235200	259200	940,8	518,4	1459,2
50,0	2,78	1,0	3,00	1,0	240000	259200	960,0	518,4	1478,4
51,0	2,83	1,0	3,00	1,0	244800	259200	979,2	518,4	1497,6
52,0	2,89	1,0	3,00	1,0	249600	259200	998,4	518,4	1516,8
53,0	2,94	1,0	3,00	1,0	254400	259200	1017,6	518,4	1536,0
54,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	1036,8	518,4	1555,2
55,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	1036,8	518,4	1555,2
56,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	1036,8	518,4	1555,2
57,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	1036,8	518,4	1555,2
58,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	1036,8	518,4	1555,2
59,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	1036,8	518,4	1555,2
60,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	1036,8	518,4	1555,2

Der Tabellenaufbau entspricht dem der Berechnungen nach DIN EN 1993-1-8 [18] in Kapitel 6.2. Es werden zuerst der zu verändernde geometrische Parameter angegeben. In diesem Fall der Randabstand  $e_1$ . Anschließend werden die Kennwerte  $\alpha_b$  und  $k_m$  für am Rand liegende Schrauben und innen liegende Schrauben berechnet und im Anschluss die Lochleibungswiderstände pro Schraube bzw. für den gesamten Anschluss in den letzten Spalten festgehalten. In Gelb ist hier der zu variierende Randabstand  $e_1$  markiert. Der Einfluss von  $e_1$  wird hier an dem Kennwert  $\alpha_b$  für am Rand liegende Schrauben erkennbar. Dieser Wert steigt mit dem Randabstand kontinuierlich an, bis bei einem  $e_1$ -Wert von 54mm der maximale Wert für  $\alpha_b$  von 3 erreicht wird und somit auch der maximale Lochleibungswiderstand.

Mit einem Anfangswert von  $\alpha_b$  von 1,22 kann es zu einer Verringerung des Lochleibungswiderstands pro Randschraube von ca. 60% kommen. Mit dem gewählten  $e_2$ -Wert von 35mm ist für Randschrauben der allgemeine Lochleibungsnachweis maßgebend und nicht der maximal zulässige Wert  $N_{u,Rk}$ . Die visuelle Auswertung der Ergebnisse erfolgt im Kapitel 6.5 dieser Arbeit.

Tab. 6-7: Parameterstudie prEN 1993-1-8 [13] Änderungen  $e_2$ 

e2 [mm]	Randschrauben		Innenschrauben		Ergebnisse				
	In KR	Quer	In KR	Quer	Rand	Innen	Rand gesamt	Innen gesamt	Fb,Rk [kN] Gesamt
	alpha_b	km	alpha_b	km	Fb,Rk [N]	Fb,Rk [N]	Fb,Rk [kN]	Fb,Rk [kN]	
22,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	561,6	518,4	1080,0
23,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	604,8	518,4	1123,2
24,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	648,0	518,4	1166,4
25,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	691,2	518,4	1209,6
26,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	734,4	518,4	1252,8
27,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	777,6	518,4	1296,0
28,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	820,8	518,4	1339,2
29,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	864,0	518,4	1382,4
30,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	907,2	518,4	1425,6
31,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	950,4	518,4	1468,8
32,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	993,6	518,4	1512,0
33,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	1036,8	518,4	1555,2
34,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	1036,8	518,4	1555,2
35,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	1036,8	518,4	1555,2

Der nächste Abstand, der auch bei der Berechnung nach dem Entwurf variiert wird, ist der Randabstand quer zur Krafrichtung  $e_2$ . Der Abstand wird wieder von 22mm in 1mm Schritten bis auf 35mm erhöht.

Der Randabstand  $e_2$  hat keine Auswirkung auf die Formel für den allgemeinen Lochleibungswiderstand, jedoch auf die Formel für den maximalen Widerstand nach Gleichung 3.28. Es ist zu erkennen, dass erst ab einem  $e_2$ -Wert von 33mm der Wert des allgemeinen Lochleibungswiderstandes mit dem  $N_{u,RK}$ -Wert übereinstimmt und ab dem Randabstand die Lochleibungsformeln nach Gleichung 3.24 bis 3.27 maßgebend werden.

Die visuelle Auswertung der Ergebnisse erfolgt im Kapitel 6.5 dieser Arbeit.

Der dritte Parameter, der variiert wird, ist der Lochabstand in Krafrichtung  $p_1$ . Der Parameter wird von 40mm in 1mm Schritten auf 70mm erhöht. Der maximale Lochleibungswiderstand  $N_{u,RK}$  wird hier nicht maßgebend und wird daher nicht in der Tabelle Tab. 6-8 aufgeführt. In Gelb ist hier der steigende Kennwert  $p_1$  angegeben. Damit der volle Lochleibungswiderstand erreicht werden kann, wurde der Kennwert  $e_1$  mit 60mm so gewählt, dass der  $\alpha_b$ -Kennwert für am Rand liegende Schrauben immer den maximalen Wert von 3 erreicht.

Tab. 6-8: Parameterstudie prEN 1993-1-8 [13] Änderungen  $p_1$ 

$p_1$ [mm]	Randschrauben		Innenschrauben		Ergebnisse				
	In KR	Quer	In KR	Quer	Rand	Innen	Rand gesamt	Innen gesamt	Fb,Rk [kN] Gesamt
	$\alpha_b$	$k_m$	$\alpha_b$	$k_m$	Fb,Rk [N]	Fb,Rk [N]	Fb,Rk [kN]	Fb,Rk [kN]	
40,0	3,00	1,0	1,72	1,0	259200	148800	1036,8	297,6	1334,4
41,0	3,00	1,0	1,78	1,0	259200	153600	1036,8	307,2	1344,0
42,0	3,00	1,0	1,83	1,0	259200	158400	1036,8	316,8	1353,6
43,0	3,00	1,0	1,89	1,0	259200	163200	1036,8	326,4	1363,2
44,0	3,00	1,0	1,94	1,0	259200	168000	1036,8	336,0	1372,8
45,0	3,00	1,0	2,00	1,0	259200	172800	1036,8	345,6	1382,4
46,0	3,00	1,0	2,06	1,0	259200	177600	1036,8	355,2	1392,0
47,0	3,00	1,0	2,11	1,0	259200	182400	1036,8	364,8	1401,6
48,0	3,00	1,0	2,17	1,0	259200	187200	1036,8	374,4	1411,2
49,0	3,00	1,0	2,22	1,0	259200	192000	1036,8	384,0	1420,8
50,0	3,00	1,0	2,28	1,0	259200	196800	1036,8	393,6	1430,4
51,0	3,00	1,0	2,33	1,0	259200	201600	1036,8	403,2	1440,0
52,0	3,00	1,0	2,39	1,0	259200	206400	1036,8	412,8	1449,6
53,0	3,00	1,0	2,44	1,0	259200	211200	1036,8	422,4	1459,2
54,0	3,00	1,0	2,50	1,0	259200	216000	1036,8	432,0	1468,8
55,0	3,00	1,0	2,56	1,0	259200	220800	1036,8	441,6	1478,4
56,0	3,00	1,0	2,61	1,0	259200	225600	1036,8	451,2	1488,0
57,0	3,00	1,0	2,67	1,0	259200	230400	1036,8	460,8	1497,6
58,0	3,00	1,0	2,72	1,0	259200	235200	1036,8	470,4	1507,2
59,0	3,00	1,0	2,78	1,0	259200	240000	1036,8	480,0	1516,8
60,0	3,00	1,0	2,83	1,0	259200	244800	1036,8	489,6	1526,4
61,0	3,00	1,0	2,89	1,0	259200	249600	1036,8	499,2	1536,0
62,0	3,00	1,0	2,94	1,0	259200	254400	1036,8	508,8	1545,6
63,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	1036,8	518,4	1555,2
64,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	1036,8	518,4	1555,2
65,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	1036,8	518,4	1555,2
66,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	1036,8	518,4	1555,2
67,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	1036,8	518,4	1555,2
68,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	1036,8	518,4	1555,2
69,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	1036,8	518,4	1555,2
70,0	3,00	1,0	3,00	1,0	259200	259200	1036,8	518,4	1555,2

Die Auswirkungen des Parameters  $p_1$  auf den  $\alpha_b$ -Kennwert für innen liegende Schrauben sind in der Tabelle Tab. 6-8 sehr gut abzulesen. Der Wert steigt so lange an, bis bei einem  $p_1$ -Wert von 63mm der maximale Wert für  $\alpha_b$  von 3 und somit der maximale Lochleibungswiderstand erreicht ist. Die visuelle Auswertung und der Vergleich zu den Ergebnissen der DIN EN 1993-1-8 [18] erfolgt in dem Kapitel 6.5 dieser Arbeit. Mit einem Anfangskennwert  $\alpha_b$  von 1,72 verringert sich der Lochleibungswiderstand bei innen liegenden Schrauben um bis zu 43%.

Der letzte zu verändernde Parameter ist der Lochabstand quer zur Krafrichtung  $p_2$ . Wie auch für die Berechnung nach DIN EN 1993-1-8 [18] wird dieser von 45mm in 1mm Schritten auf 60mm erhöht. Die Ermittlung des Lochleibungswiderstandes kann der Tabelle Tab. 6-9 entnommen werden.

Tab. 6-9: Parameterstudie prEN 1993-1-8 [13] Änderungen p<sub>2</sub>

p <sub>2</sub> [mm]	Randschrauben		Innenschrauben		Ergebnisse				
	In KR	Quer	In KR	Quer	Rand	Innen	Rand gesamt	Innen gesamt	Fb,Rk [kN] Gesamt
	alpha_b	km	alpha_b	km	Fb,Rk [N]	Fb,Rk [N]	Fb,Rk [kN]	Fb,Rk [kN]	
40,0	3,000	1,00	3,00	1,00	259200	259200	1036,80	518,40	1555,2
41,0	3,000	1,00	3,00	1,00	259200	259200	1036,80	518,40	1555,2
42,0	3,000	1,00	3,00	1,00	259200	259200	1036,80	518,40	1555,2
43,0	3,000	1,00	3,00	1,00	259200	259200	1036,80	518,40	1555,2
44,0	3,000	1,00	3,00	1,00	259200	259200	1036,80	518,40	1555,2
45,0	3,000	1,00	3,00	1,00	259200	259200	1036,80	518,40	1555,2
46,0	3,000	1,00	3,00	1,00	259200	259200	1036,80	518,40	1555,2
47,0	3,000	1,00	3,00	1,00	259200	259200	1036,80	518,40	1555,2
48,0	3,000	1,00	3,00	1,00	259200	259200	1036,80	518,40	1555,2
49,0	3,000	1,00	3,00	1,00	259200	259200	1036,80	518,40	1555,2
50,0	3,000	1,00	3,00	1,00	259200	259200	1036,80	518,40	1555,2
51,0	3,000	1,00	3,00	1,00	259200	259200	1036,80	518,40	1555,2
52,0	3,000	1,00	3,00	1,00	259200	259200	1036,80	518,40	1555,2
53,0	3,000	1,00	3,00	1,00	259200	259200	1036,80	518,40	1555,2
54,0	3,000	1,00	3,00	1,00	259200	259200	1036,80	518,40	1555,2
55,0	3,000	1,00	3,00	1,00	259200	259200	1036,80	518,40	1555,2
56,0	3,000	1,00	3,00	1,00	259200	259200	1036,80	518,40	1555,2
57,0	3,000	1,00	3,00	1,00	259200	259200	1036,80	518,40	1555,2
58,0	3,000	1,00	3,00	1,00	259200	259200	1036,80	518,40	1555,2
59,0	3,000	1,00	3,00	1,00	259200	259200	1036,80	518,40	1555,2
60,0	3,000	1,00	3,00	1,00	259200	259200	1036,80	518,40	1555,2

Da der Parameter p<sub>1</sub> auf die Formeln aus der prEN 1993-1-8 [13] keinen Einfluss hat, wird in allen Zeilen der maximale Lochleibungswiderstand erreicht. Die visuelle Auswertung und der Vergleich zu den Ergebnissen der aktuellen Norm erfolgt in dem Kapitel 6.5 dieser Arbeit.

## 6.4 Lochleibungsverformungen

Wie bereits in den vorherigen Kapiteln erläutert, wird im prEN 1993-1-8 [13] der Lochleibungswiderstand zusammen mit der Einbettung der Schraube in das Stahlblech bei Belastung in Verbindung gebracht. Dabei ist die Einbettung der Schraube von dem Schraubendurchmesser und der Verformung am Lochrand abhängig. Um die Verformungen zu berücksichtigen, wurden in der Literatur zwei Formeln aufgestellt.

Die erste Angabe zu den Lochleibungsverformungen wird [52] von P. Moze aus dem Jahr 2016 entnommen. Die Formel für Verformungen lautet wie folgt:

$$\Delta_u = \min\left(\frac{e_1}{3}; \frac{p_1}{3}; d\right) \quad \text{Normalfester Stahl} \quad (6.1)$$

$$\Delta_u = \min\left(\frac{0,9 * e_1}{3}; \frac{0,9 * p_1}{3}; 0,8 * d\right) \quad \text{Hochfester Stahl} \quad (6.2)$$

Die zweite Funktion wird [56] von P. Moze, Y. Fang et al. aus dem Jahr 2021 entnommen. Hier sieht die Formel wie folgt aus:

$$u_{xd} = \min\left(\frac{k_m * \alpha_b}{3}; k_m^2\right) * d \quad (6.3)$$

Die verwendeten Formelkennwerte werden den Gleichungen 3.26 und 3.27 dieser Arbeit entnommen und die Unterscheidung zwischen den normalfesten und hochfesten Stählen wird über den Kennwert  $k_m$  getroffen.

Der Unterschied zwischen den beiden Formeln liegt in der Betrachtung der Rand- bzw. Lochabstände. Bei der Verschiebungsformel nach Gleichung 6.3 werden nicht nur  $e_1$  und  $p_1$  berücksichtigt, sondern auch das Verhältnis zwischen den beiden Parametern und dem Lochdurchmesser  $d_0$ . Anders als bei der Gleichung 6.1 und 6.2 wird bei der Gleichung 6.3 zudem der Wert 0,5 zusätzlich für den Kennwert  $\alpha_b$  abgezogen.

Bei den Gleichungen 6.1 bis 6.3 wurde jeweils die Annahme getroffen, dass die maximalen Verformungen am Lochrand gleichzeitig mit dem maximalen Lochleibungswiderstand auftreten. Da beide Formeln aus experimentellen Ergebnissen stammen, wird im Folgenden untersucht, welche dieser Formeln besser den Lochleibungswiderständen entspricht.

Berechnet man die Verformungen nach beiden Gleichungen, ergeben sich für den Schraubenschluss die Ergebnisse in den folgenden Tabellen. Hier wurden jeweils die Anschlussgeometrien, der Lochleibungswiderstand und die beiden Verformungen angegeben.

Tab. 6-10: Lochleibungsverformungen Variation e<sub>1</sub>

n	fu [N/mm <sup>2</sup> ]	b [mm]	t [mm]	e1 [mm]	e2 [mm]	p1 [mm]	p2 [mm]	d [mm]	d0 [mm]	Fb,Rk [kN] Gesamt	Verformung Gl. 6.1 [mm]	Verformung Gl. 6.3 [mm]
6	360	130,0	15,0	22,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	940,8	7,33	6,52
6	360	130,0	15,0	23,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	960,0	7,67	6,81
6	360	130,0	15,0	24,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	979,2	8,00	7,11
6	360	130,0	15,0	25,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	998,4	8,33	7,41
6	360	130,0	15,0	26,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1017,6	8,67	7,70
6	360	130,0	15,0	27,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1036,8	9,00	8,00
6	360	130,0	15,0	28,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1056,0	9,33	8,30
6	360	130,0	15,0	29,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1075,2	9,67	8,59
6	360	130,0	15,0	30,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1094,4	10,00	8,89
6	360	130,0	15,0	31,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1113,6	10,33	9,19
6	360	130,0	15,0	32,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1132,8	10,67	9,48
6	360	130,0	15,0	33,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1152,0	11,00	9,78
6	360	130,0	15,0	34,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1171,2	11,33	10,07
6	360	130,0	15,0	35,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1190,4	11,67	10,37
6	360	130,0	15,0	36,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1209,6	12,00	10,67
6	360	130,0	15,0	37,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1228,8	12,33	10,96
6	360	130,0	15,0	38,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1248,0	12,67	11,26
6	360	130,0	15,0	39,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1267,2	13,00	11,56
6	360	130,0	15,0	40,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1286,4	13,33	11,85
6	360	130,0	15,0	41,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1305,6	13,67	12,15
6	360	130,0	15,0	42,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1324,8	14,00	12,44
6	360	130,0	15,0	43,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1344,0	14,33	12,74
6	360	130,0	15,0	44,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1363,2	14,67	13,04
6	360	130,0	15,0	45,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1382,4	15,00	13,33
6	360	130,0	15,0	46,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1401,6	15,33	13,63
6	360	130,0	15,0	47,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1420,8	15,67	13,93
6	360	130,0	15,0	48,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1440,0	16,00	14,22
6	360	130,0	15,0	49,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1459,2	16,00	14,52
6	360	130,0	15,0	50,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1478,4	16,00	14,81
6	360	130,0	15,0	51,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1497,6	16,00	15,11
6	360	130,0	15,0	52,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1516,8	16,00	15,41
6	360	130,0	15,0	53,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1536,0	16,00	15,70
6	360	130,0	15,0	54,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	130,0	15,0	55,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	130,0	15,0	56,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	130,0	15,0	57,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	130,0	15,0	58,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	130,0	15,0	59,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00

Tab. 6-11: Lochleibungsverformungen Variation  $e_2$ 

n	$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]	b [mm]	t [mm]	$e_1$ [mm]	$e_2$ [mm]	$p_1$ [mm]	$p_2$ [mm]	d [mm]	$d_0$ [mm]	Fb,Rk [kN] Gesamt	Verformung Gl. 6.1 [mm]	Verformung Gl. 6.3 [mm]
6	360	104,0	15,0	60,0	22,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1080,0	16,00	16,00
6	360	106,0	15,0	60,0	23,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1123,2	16,00	16,00
6	360	108,0	15,0	60,0	24,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1166,4	16,00	16,00
6	360	110,0	15,0	60,0	25,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1209,6	16,00	16,00
6	360	112,0	15,0	60,0	26,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1252,8	16,00	16,00
6	360	114,0	15,0	60,0	27,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1296,0	16,00	16,00
6	360	116,0	15,0	60,0	28,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1339,2	16,00	16,00
6	360	118,0	15,0	60,0	29,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1382,4	16,00	16,00
6	360	120,0	15,0	60,0	30,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1425,6	16,00	16,00
6	360	122,0	15,0	60,0	31,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1468,8	16,00	16,00
6	360	124,0	15,0	60,0	32,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1512,0	16,00	16,00
6	360	126,0	15,0	60,0	33,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	128,0	15,0	60,0	34,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00

Tab. 6-12: Lochleibungsverformungen Variation  $p_1$ 

n	$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]	b [mm]	t [mm]	$e_1$ [mm]	$e_2$ [mm]	$p_1$ [mm]	$p_2$ [mm]	d [mm]	$d_0$ [mm]	Fb,Rk [kN] Gesamt	Verformung Gl. 6.1 [mm]	Verformung Gl. 6.3 [mm]
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	40,0	60,0	16,0	18,0	1334,4	13,33	9,19
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	41,0	60,0	16,0	18,0	1344,0	13,67	9,48
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	42,0	60,0	16,0	18,0	1353,6	14,00	9,78
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	43,0	60,0	16,0	18,0	1363,2	14,33	10,07
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	44,0	60,0	16,0	18,0	1372,8	14,67	10,37
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	45,0	60,0	16,0	18,0	1382,4	15,00	10,67
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	46,0	60,0	16,0	18,0	1392,0	15,33	10,96
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	47,0	60,0	16,0	18,0	1401,6	15,67	11,26
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	48,0	60,0	16,0	18,0	1411,2	16,00	11,56
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	49,0	60,0	16,0	18,0	1420,8	16,00	11,85
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	50,0	60,0	16,0	18,0	1430,4	16,00	12,15
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	51,0	60,0	16,0	18,0	1440,0	16,00	12,44
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	52,0	60,0	16,0	18,0	1449,6	16,00	12,74
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	53,0	60,0	16,0	18,0	1459,2	16,00	13,04
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	54,0	60,0	16,0	18,0	1468,8	16,00	13,33
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	55,0	60,0	16,0	18,0	1478,4	16,00	13,63
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	56,0	60,0	16,0	18,0	1488,0	16,00	13,93
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	57,0	60,0	16,0	18,0	1497,6	16,00	14,22
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	58,0	60,0	16,0	18,0	1507,2	16,00	14,52
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	59,0	60,0	16,0	18,0	1516,8	16,00	14,81
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	60,0	60,0	16,0	18,0	1526,4	16,00	15,11
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	61,0	60,0	16,0	18,0	1536,0	16,00	15,41
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	62,0	60,0	16,0	18,0	1545,6	16,00	15,70
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	63,0	60,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	64,0	60,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	65,0	60,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	66,0	60,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	67,0	60,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	68,0	60,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	69,0	60,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00

Tab. 6-13: Lochleibungsverformungen Variation  $p_2$ 

n	$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]	b [mm]	t [mm]	$e_1$ [mm]	$e_2$ [mm]	$p_1$ [mm]	$p_2$ [mm]	d [mm]	$d_0$ [mm]	Fb,Rk [kN] Gesamt	Verformung Gl. 6.1 [mm]	Verformung Gl. 6.3 [mm]
6	360	110,0	15,0	60,0	35,0	70,0	40,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	111,0	15,0	60,0	35,0	70,0	41,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	112,0	15,0	60,0	35,0	70,0	42,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	113,0	15,0	60,0	35,0	70,0	43,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	114,0	15,0	60,0	35,0	70,0	44,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	115,0	15,0	60,0	35,0	70,0	45,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	116,0	15,0	60,0	35,0	70,0	46,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	117,0	15,0	60,0	35,0	70,0	47,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	118,0	15,0	60,0	35,0	70,0	48,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	119,0	15,0	60,0	35,0	70,0	49,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	120,0	15,0	60,0	35,0	70,0	50,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	121,0	15,0	60,0	35,0	70,0	51,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	122,0	15,0	60,0	35,0	70,0	52,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	123,0	15,0	60,0	35,0	70,0	53,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	124,0	15,0	60,0	35,0	70,0	54,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	125,0	15,0	60,0	35,0	70,0	55,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	126,0	15,0	60,0	35,0	70,0	56,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	127,0	15,0	60,0	35,0	70,0	57,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	128,0	15,0	60,0	35,0	70,0	58,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	129,0	15,0	60,0	35,0	70,0	59,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00
6	360	130,0	15,0	60,0	35,0	70,0	60,0	16,0	18,0	1555,2	16,00	16,00

Um zu untersuchen, welche der beiden Formeln für die Berechnung der maximalen Verformungen bei dem Nachweis der Lochleibung besser geeignet sind, werden die Ergebnisse zusammen mit den Lochleibungswiderständen nach prEN 1993-1-8 [13] und DIN EN 1993-1-8 [18] am Beispiel des Randabstands  $e_1$  grafisch untersucht.

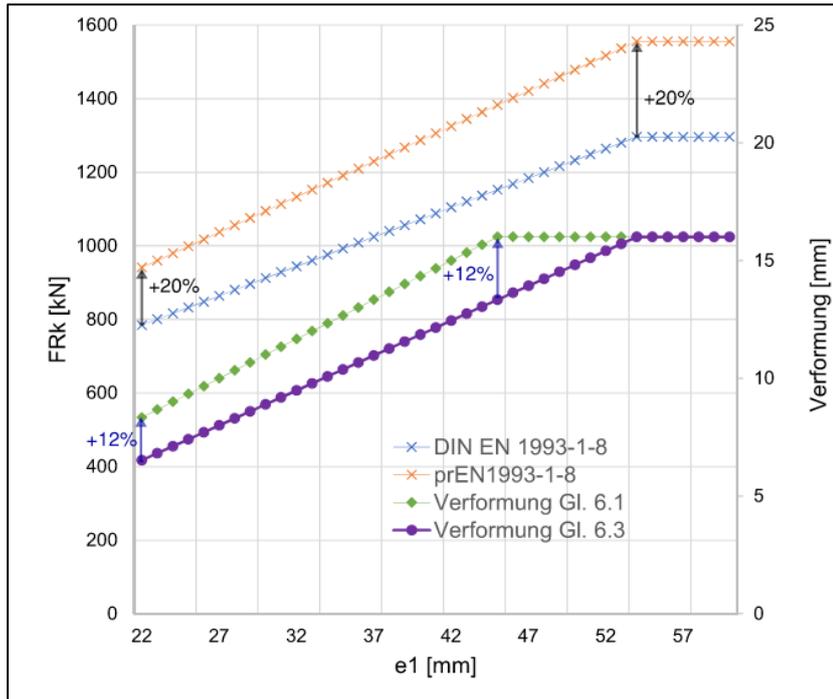


Abbildung 6-3: Unterschied Verformungen Gleichung 6.1 und Gleichung 6.3

In der Abbildung 6-3 ist dabei auf der Ordinate der Lochleibungswiderstand in kN und auf der Abszisse der Randabstand  $e_1$  dargestellt. Auf der Sekundärachse ist die Verformung in mm zu finden. In Blau und Orange sind die Ergebnisse des Lochleibungswiderstände nach DIN EN 1993-1-8 [18] und prEN 1993-1-8 [13] aufgetragen. Diese Ergebnisse werden in dem folgenden Kapitel noch genauer analysiert. In Grün sind die Ergebnisse der Verformung nach der Gleichung 6.1 aufgetragen und in Lila die Ergebnisse der Gleichung 6.3.

Betrachtet man die beiden Graphen der Lochleibungsverformungen, zeigt sich, dass die Gleichung 6.1 größere Verformungen ergeben als die Gleichung 6.3. Jedoch lässt sich ebenfalls feststellen, dass sich das Verhältnis zwischen den Ergebnissen prozentual nicht ändert. Dies ist an den gleichbleibenden prozentualen Differenzen von 12% zwischen den Verformungen zu erkennen. Dieser Abstand zwischen den Verformungen bleibt so lange gleich, bis die maximale Verformung von 16mm, also dem Schraubendurchmesser  $d$ , erreicht ist. Der Unterschied von 12% liegt daran, dass die Verformungsfunktion bei den Formeln aus dem Jahr 2021 mit dem Verhältnis von Schraubendurchmesser zu Lochdurchmesser, also  $d/d_0$ , verringert wird. Bei diesem Beispiel ist  $d$  mit 16mm und  $d_0$  mit 18mm festgelegt worden, das Verhältnis aus diesen beiden Kennwerten liegt bei 1,12 und entspricht den Abweichungen von 12%.

In [52] und [56] wird jeweils die Annahme getroffen, dass die maximale Verformung bei dem maximalen Lochleibungswiderstand auftritt. Vergleicht man nun die Kurven ist zu erkennen, dass die maximale Verformung nach der Gleichung 6.3 das Maximum bei einem  $e_1$  von 54mm erreichen. Die Ergebnisse nach Gleichung 6.1 erreichen das Maximum jedoch schon bei einem Randabstand von 48mm. Der maximale Lochleibungswiderstand nach prEN 1993-1-8 [13] wird ebenfalls bei einem  $e_1$  von 54mm erreicht. Da sich gezeigt hat, dass der Lochleibungswiderstand gleichmäßig mit der Verformung am Lochrand und der Einbettung

der Schraube steigt, bringt die Gleichung 6.3 nachvollziehbarere Ergebnisse. [56] Diese Formeln werden für die weitere Berechnung angesetzt und für die Parameterstudie verwendet.

## 6.5 Auswertung und Evaluation der Parameterstudie

Um die in Kapitel 6.2 und 6.3 dieser Arbeit ermittelten Lochleibungswiderstände miteinander zu vergleichen, werden im Folgenden die Widerstände nach DIN EN 1993-1-8 [18] und prEN 1993-1-8 [13] über den zu ändernden Parameter hin abgetragen. Zusätzlich werden die Ergebnisse der Verformungen am Lochrand nach den Berechnungen von Gleichung 6.3 [56] eingezeichnet.

Die erste Auswertung behandelt die Änderungen des Randabstandes in Krafrichtung  $e_1$  in Abbildung 6-4. Hier ist auf der Ordinate der charakteristische Lochleibungswiderstand  $F_{RK}$  in kN, auf der Abszisse der Randabstand  $e_1$  in mm und auf der Sekundärachse die maximale Verschiebung bzw. Verformung des Schraubenlochs in mm eingetragen.

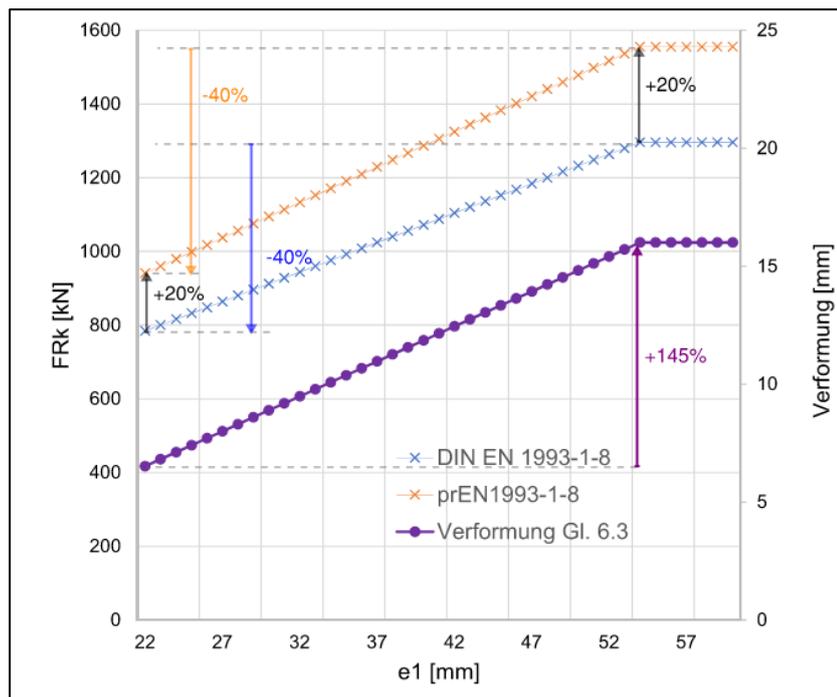


Abbildung 6-4: Parameterstudie Vergleich prEN 1993-1-8 [13] und DIN EN 1993-1-8 [18] Änderungen  $e_1$

In Blau sind die Werte der DIN EN 1993-1-8 [18] und in Orange die Ergebnisse der prEN 1993-1-8 [13] eingetragen. In Lila sind die Verformungen am Lochrand zu sehen.

Zuerst werden die Ergebnisse des Lochleibungswiderstands miteinander verglichen. Wie bereits erwähnt, hat der Randabstand  $e_1$  sowohl bei den Berechnungen nach aktueller Norm als auch bei den Berechnungen nach prEN 1993-1-8 [13] einen Einfluss auf den Kennwert  $\alpha_b$ . Dieser Kennwert wird bei den Formeln der DIN EN 1993-1-8 [18] mit dem Kennwert  $k_1$  multipliziert, sodass ein maximaler Wert dieses Produkts von 2,5 möglich ist. Bei den Formeln der prEN 1993-1-8 [13] wird der  $\alpha_b$ -Wert mit dem Kennwert  $k_m$  multipliziert, sodass für normalfesten Stahl das Produkt einen maximalen Wert von 3 erreichen kann. Das Verhältnis zwischen den beiden Faktoren liegt bei 1,2. Das bedeutet, dass die maximalen Lochleibungswiderstände mit den Formeln der prEN 1993-1-8 [13] immer 20% höher sind als die maximalen Lochleibungswiderstände nach den Formeln der DIN EN 1993-1-8 [18]. In der Abbildung 6-4 ist dies bei einem  $e_1$ -Wert von 54mm zu erkennen, was einem

$e_1/d_0$ -Verhältnis von 3 entspricht. Beide Formeln erreichen ab diesem Randabstand ihren maximalen Wert. Obwohl die Steigungen von den beiden eingezeichneten Geraden nicht gleich groß sind, verhalten sich die Formeln der beiden Berechnungsmethoden gleich. Dies ist daran zu erkennen, dass der Abstand zwischen den Geraden schon bei den Anfangswerten bei 20% liegt. Begründen lässt sich dies damit, dass bei beiden Berechnungsmethoden der Kennwert  $\alpha_b$  durch das Verhältnis zwischen dem Randabstand  $e_1$  und dem Lochdurchmesser  $d_0$  beeinflusst wird. Da sich das Verhältnis dieser beiden Parameter bei Veränderung von  $e_1$  sowohl bei den Formeln der aktuellen Norm als auch bei den Formeln des Entwurfs gleich verhält, bleibt der prozentuale Abstand zwischen den beiden Lochleibungswiderständen gleich groß.

Generell ist festzuhalten, dass der Randabstand in Krafrichtung  $e_1$  einen sehr großen Einfluss auf den Lochleibungswiderstand hat. Die Verringerung von  $e_1$  führt bei den Widerständen nach dem Entwurf zu einer Verringerung von bis zu 40% zwischen dem Anfangswert von 940,8 kN und dem Endwert von 1555,2 kN. Den gleichen prozentualen Abfall erhält man auch bei den Widerständen nach DIN EN 1993-1-8 [18], wo ein Anfangswert von 784 kN und einen Endwert von 1296 kN vorliegt.

Auch an den maximalen Verformungen des Lochrandes bei Randschrauben, während der Lochleibung, lässt sich erkennen, wie groß hier der Einfluss des Randabstandes  $e_1$  ist. Mit einer Anfangsverformung von 6,52mm und einem Endwert von 16mm kommt es durch den Einfluss von  $e_1$  zu einer Erhöhung von ca. 145% bzw. einer Verringerung von ca. 60%.

Der nächste Parameter, der ausgewertet wird, ist der Randabstand quer zur Krafrichtung  $e_2$ . Die Auswertung kann anhand der Ergebnisse aus der Abbildung 6-5 geführt werden.

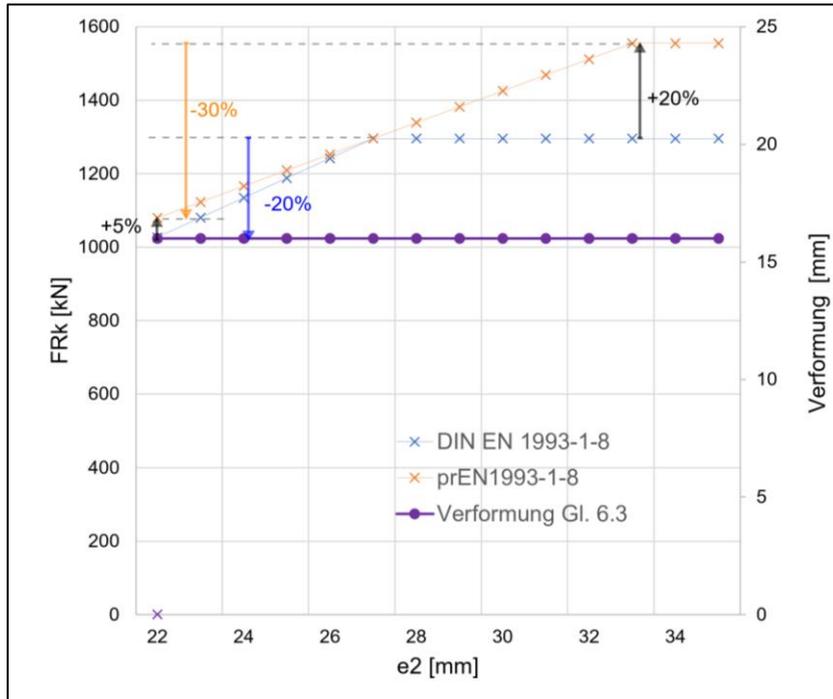


Abbildung 6-5: Parameterstudie Vergleich prEN 1993-1-8 und DIN EN 1993-1-8 Änderungen  $e_2$

In dieser Abbildung ist ebenfalls auf der Ordinate der charakteristische Lochleibungswiderstand in kN angegeben und auf der Abszisse der Randabstand quer zur Krafrichtung  $e_2$ . Auf der Sekundärachse ist die maximale Verformung in mm festgehalten.

Die Lochleibungswiderstände nach den Formeln der DIN EN 1993-1-8 [18] sind in Blau eingezeichnet und die Ergebnisse nach prEN 1993-1-8 [13] in Orange. Die Verformungen sind in Lila angegeben.

Der Randabstand  $e_2$  ist in den Formeln des allgemeinen Lochleibungsnachweises nach prEN 1993-1-8 [13] nicht enthalten. Jedoch wird in dem Entwurf der Norm festgehalten, dass der Lochleibungswiderstand von Randschrauben den Wert nach Gleichung 3.28 nicht überschreiten darf. Der Randabstand quer zur Krafrichtung hat somit trotzdem einen Einfluss auf den Lochleibungswiderstand nach dem Entwurf. Bei den Berechnungen nach DIN EN 1993-1-8 [18] ist der Parameter für die Berechnung des Kennwertes  $k_1$  für am Rand liegende Schrauben zu finden.

Vergleicht man nun die Ergebnisse aus beiden Berechnungen, fällt auf, dass die Lochleibungswiderstände sowohl am Anfang als auch am Ende nach prEN 1993-1-8 [13] größer sind als nach DIN EN 1993-1-8 [18]. Mit einem Anfangswert von 1080 kN sind die Widerstände nach dem Entwurf um 5% größer als die der gültigen Norm mit einem Anfangswert von 1027 kN. Bei den Endwerten liegt der Lochleibungswiderstand nach den Formeln der prEN 1993-1-8 [13] mit 1555,2 kN wieder 20% über den Ergebnissen der DIN EN 1993-1-8 [18] mit 1296 kN. Die 20% ergeben sich hier aus den bereits erläuterten Unterschieden zwischen den maximalen Lochleibungswiderständen. Durch den Einfluss des Parameters  $e_2$  kommt es bei den Widerständen nach prEN 1993-1-8 [13] zu einer Verringerung des Lochleibungswiderstandes von bis zu 30% und bei den Widerständen nach DIN EN 1993-1-8 [18] bis zu 20%.

Besonders ist hier jedoch, dass bei einem Randabstand von 27mm die Ergebnisse aus beiden Berechnungen genau übereinstimmen. Bei der DIN EN 1993-1-8 [18] ist hier bereits das Maximum erreicht, wohingegen die Lochleibungswiderstände nach dem Entwurf noch bis zu einem Randabstand von 33mm ansteigen. Erklären lässt sich das damit, dass bei den Berechnungen nach der aktuellen Norm der Randabstand immer ins Verhältnis zu dem Lochdurchmesser gesetzt wird, wohingegen bei den Formeln nach dem Entwurf der halbe Lochdurchmesser von dem Randabstand abgezogen wird.

Zum besseren Verständnis werden beide Formelabschnitte hier noch einmal aufgeführt. Zuerst der Abschnitt des Lochleibungswiderstandes aus der DIN EN 1993-1-8 [18]:

$$k_1 = \min \left\{ 2,8 * \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 1,4 * \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\} \quad (3.8)$$

Im Anschluss der maximale Lochleibungswiderstand für Randschrauben aus dem Entwurf prEN 1993-1-8 [13]:

$$N_{u,Rd} = \frac{2,0 * (e_2 - 0,5 * d_0) * t * f_u}{\gamma_{M2}} \quad (3.28)$$

Bei dem prEN 1993-1-8 [13] wird der Randabstand  $e_2$  mit der Blechdicke und Zugfestigkeit des Stahls multipliziert. Hierbei handelt es sich nicht um eine Ermittlung des Lochleibungswiderstandes, sondern um die Ermittlung des Nettoquerschnittwiderstands am Rand des Stahlbleches.

Bis zu einem  $e_2$ -Wert von 33mm, welcher einem  $e_2/d_0$ -Verhältnis von 1,83 entspricht, wird nach prEN 1993-1-8 [13] für diesen Schraubanschluss das Versagen des Netto-Querschnitts maßgebend und nicht das Versagen auf Lochleibung. In dem Entwurf für die neue Norm wurde somit das Phänomen berücksichtigt, dass sich Lochleibung nur dann einstellen kann, wenn sich ein Zugbogen um das Schraubenloch ausbreiten kann. Dieses Phänomen wurde bereits in der Literatur in [53] beschrieben. Wie bereits in dem Kapitel 3 erläutert, kommt es bei der Beanspruchung einer Verbindung zu hohen Kräften, die über kleine Kontaktflächen zwischen den Schrauben und den Blechen weitergeleitet werden. Das Blech wird dabei am Lochrand durch die Einbettung der Schraube auf Druck beansprucht. Dadurch baut sich im Blech ein Zugbogen um das Schraubenloch auf, der dafür sorgt, dass die punktuelle Belastung auf das gesamte Blech übertragen wird. Sollten die Rand- und Lochabstände so gering sein, dass sich dieser Zugbogen nicht vollkommen ausbreiten kann, kann die Belastung nicht komplett auf das Blech verteilt werden und es kommt zu einem Versagen im Nettoquerschnitt des Stahlbleches. [53]

Dieses Verhalten wurde in der DIN EN 1993-1-8 [18] mit dem Versagen auf Lochleibung in Verbindung gebracht, eventuell war das auch einer der Gründe, warum der Randabstand  $e_2$  in den Lochleibungsformeln verwendet wurde. Durch die Verringerung des Lochleibungswiderstandes wurde das Phänomen jedoch ebenfalls in den bisherigen Berechnungen eines Schraubanschlusses abgedeckt und der Nachweis liegt somit trotzdem auf der sicheren Seite. Bei den Berechnungen nach der DIN EN 1993-1-8 [18] kann der Lochleibungswiderstand durch den Einfluss von  $e_2$  daher um ca. 30% verringert werden.

Es kann festgehalten werden, dass der Randabstand quer zur Kraftrichtung auf den Widerstand für Lochleibung keinen Einfluss bei der Berechnung nach prEN 1993-1-8 [13] hat. Dies trifft auch auf die Ergebnisse der Verformung zu, hier ist durchgehend die maximale

Verformung von 16mm vorhanden und der Randabstand  $e_2$  hat keinen Einfluss. Dies entspricht den bisher getätigten Aussagen, da es ohne Änderungen der Verformung auch keine Änderungen des Lochleibungswiderstandes gibt.

Die nächste Auswertung, die durchgeführt wird, ist die Variation des Schraubenabstands in Krafrichtung  $p_1$ . Die grafische Zusammenfassung der zuvor berechneten Ergebnisse kann der Abbildung 6-6 entnommen werden. Hier wurde auf der Abszisse der Parameter  $p_1$  in mm dargestellt und auf der Ordinate der charakteristische Lochleibungswiderstand in kN. Auf der Sekundärachse ist die Verformung am Lochrand in mm aufgetragen.

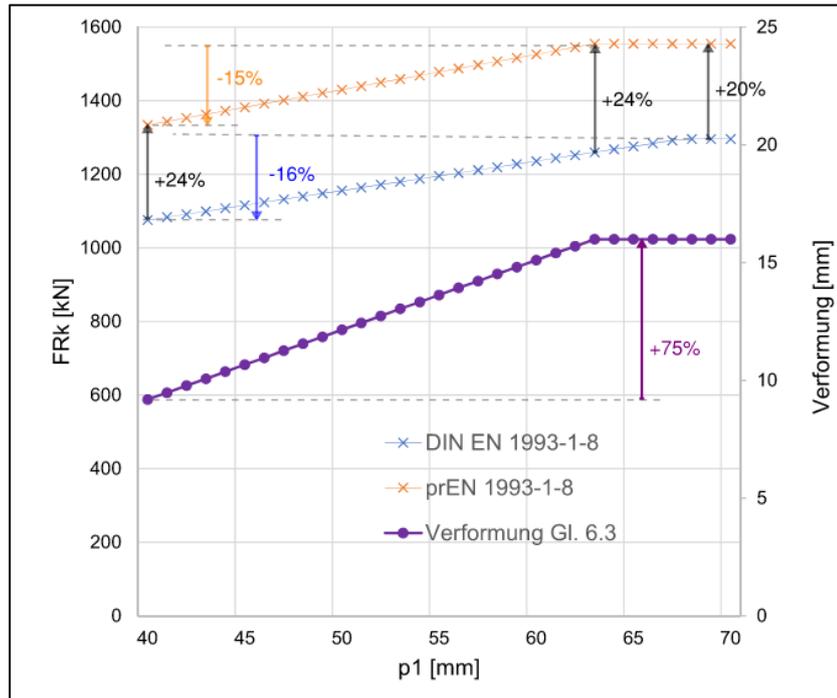


Abbildung 6-6: Parameterstudie Vergleich prEN 1993-1-8 [13] und DIN EN 1993-1-8 [18] Änderungen  $p_1$

In Blau sind die Ergebnisse nach DIN EN 1993-1-8 [18] und in Orange die Ergebnisse nach prEN 1993-1-8 [13] dargestellt. In Lila sind die Verformungen am Lochrand angegeben.

Vergleicht man die Ergebnisse der Lochleibungswiderstände, kann man erneut erkennen, dass die orangenen Ergebnisse deutlich höher als die blauen Ergebnisse liegen und somit größer sind. Mit einem Lochleibungswiderstand von 1334,4 kN bei einem Lochabstand von 40mm liegt der Widerstand nach dem Entwurf um 24% höher als der Widerstand nach der aktuellen Norm mit 1076 kN. Dieses Verhältnis zwischen den beiden Berechnungen ändert sich bis zu dem maximalen Lochleibungswiderstand des prEN 1993-1-8 [13] bei einem Lochabstand  $p_1$  von 63mm auch nicht.

Besonders ist bei dem Vergleich der beiden Berechnungsergebnisse, dass der maximale Lochleibungswiderstand nach dem Entwurf schon bei 63mm, also einem  $p_1/d_0$ -Verhältnis von 3,5, erreicht ist, wobei der maximale Widerstand nach DIN EN 1993-1-8 [18] erst bei einem Lochabstand von 68mm vorliegt. Dies entspricht einem  $p_1/d_0$ -Verhältnis von ca. 3,8.

Wie bereits erläutert, hat der Lochabstand  $p_1$  bei beiden Berechnungsmethoden Einfluss auf den Kennwert  $\alpha_b$  und sowohl bei der aktuellen Norm als auch bei dem Entwurf, geht der Lochabstand mit dem Verhältnis  $p_1/d_0$  in die Formeln ein.

Die Formel für  $\alpha_b$  nach prEN 1993-1-8 [13] lautet dabei

$$\alpha_b = \frac{p_1}{d_0} - \frac{1}{2} \quad (3.27)$$

und nach DIN EN 1993-1-8 [18]

$$\alpha_d = \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4} \quad (3.7)$$

Der Unterschied liegt dabei zum einen an dem Faktor 1,2, der zwischen den beiden maximalen Lochleibungswiderständen liegt. Wo bei den Formeln der prEN 1993-1-8 [13] lediglich das Verhältnis zwischen  $p_1$  und  $d_0$  betrachtet wird, wird bei den Formeln nach DIN EN 1993-1-8 [18]  $p_1/(3 \cdot d_0)$  berechnet. Anschließend wird der  $\alpha_b$ -Kennwert mit dem Kennwert  $k_1$  multipliziert, welcher einen maximalen Wert von 2,5 erreichen kann. Das Verhältnis  $p_1/d_0$  wird bei der aktuellen Norm somit als 20% niedriger eingestuft als nach dem Entwurf. Der zweite Teil der Formeln besteht aus der Subtraktion von  $\frac{1}{4}$  bzw.  $\frac{1}{2}$ . Da jedoch nicht nur das  $p_1/d_0$ -Verhältnis mit dem  $k_1$ -Wert von maximal 2,5 multipliziert wird, sondern auch der Faktor  $\frac{1}{4}$ , werden nicht  $\frac{1}{4}$  abgezogen, sondern  $\frac{1}{4} \cdot 2,5$  was einen Wert von 0,625 ergibt.

So lässt sich zum einen das Verhältnis zwischen den beiden Lochleibungswiderständen von 24% erklären und zum anderen auch die Tatsache, dass der maximale Lochleibungswiderstand nach DIN EN 1993-1-8 [18] erst bei einem Lochabstand  $p_1$  von 68mm und nicht bereits bei 63mm erreicht wird.

Vergleicht man die Anfangs- und Endwerte miteinander, ist bei den Lochleibungswiderständen nach DIN EN 1993-1-8 [18] eine Verringerung des Widerstands von 16% durch den Einfluss von  $p_1$  festzustellen, da der Anfangswert bei 1076 kN und einem Endwert bei 1296 kN liegt. Bei den Widerständen nach prEN 1993-1-8 [13] liegt der Anfangswert bei 1334,4 kN und der Endwert bei 1555,2 kN. Damit ergibt sich eine prozentuale Verringerung des Lochleibungswiderstands von ca. 15%.

Betrachtet man die Verformungen, die bei innen liegenden Schrauben auftreten, ist zu erkennen, dass der Lochabstand in Krafrichtung  $p_1$  auch hier einen großen Einfluss hat. Mit einer Verformung von 9,19mm bei einem  $p_1$ -Wert von 40mm liegt die prozentuale Steigerung bei ca. 75%, bis die maximale Verformung von 16mm eintritt. Zusätzlich fällt an der Grafik der Verformungen auf, dass mit der Formel das Verformungsverhalten für den Lochleibungswiderstand nach prEN 1993-1-8 [13] festgehalten ist, da beide Maxima ab einem  $p_1$ -Wert von 63mm erreicht werden.

Generell lässt sich festhalten, dass der Lochabstand in Krafrichtung  $p_1$  einen Einfluss auf den Lochleibungswiderstand hat und dies bei der Konstruktion berücksichtigt werden sollte.

Der letzte Parameter, der in dieser Arbeit untersucht wird, ist der Lochabstand quer zur Krafrichtung  $p_2$ . Die visuelle Zusammenfassung der Lochleibungswiderstände und der Verformungen am Lochrand kann dafür der Abbildung 6-7 entnommen werden. Auf der Abszisse ist dabei der Lochabstand  $p_2$  in mm dargestellt und auf der Ordinate der charakteris-

tische Lochleibungswiderstand in der Einheit kN. Die Sekundärachse stellt die Verformungen am Lochrand in der Einheit mm dar. In Blau ist dabei der Lochleibungswiderstand nach den Formeln der DIN EN 1993-1-8 [18] dargestellt und in Orange nach den Formeln der prEN 1993-1-8 [13]. Die Verformungen am Lochrand, die durch die Einbettung der Schraube entstehen, werden in Lila abgebildet.

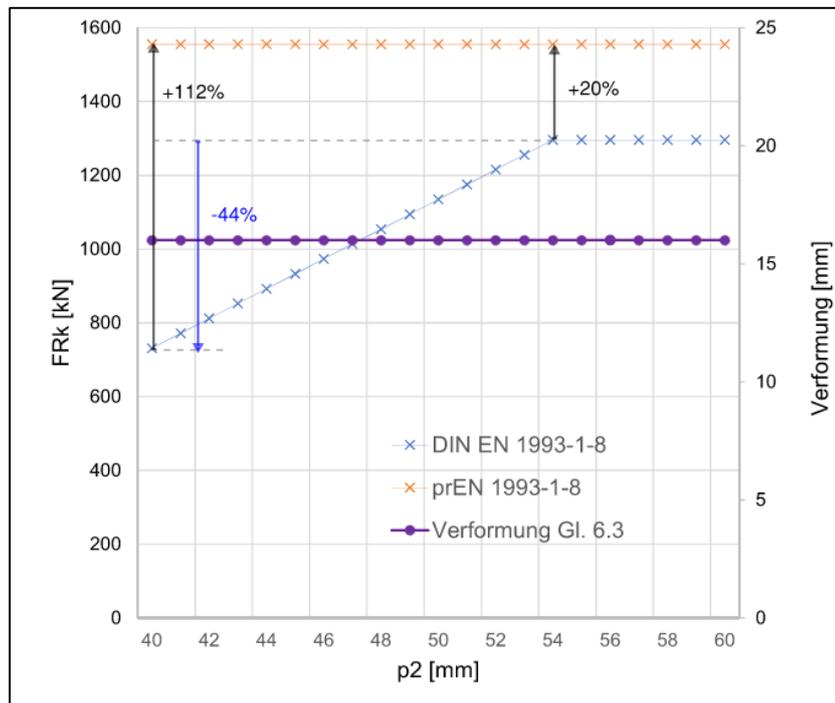


Abbildung 6-7: Parameterstudie Vergleich prEN 1993-1-8 [13] und DIN EN 1993-1-8 [18] Änderungen  $p_2$

Betrachtet man im ersten Schritt die Lochleibungswiderstände von beiden Berechnungsmethoden ist zu erkennen, dass der Randabstand  $p_2$  keinen Einfluss auf den Lochleibungswiderstand nach prEN 1993-1-8 [13] hat. Die orangenen Kreuze befinden sich alle auf der gleichen Höhe bei dem maximalen Lochleibungswiderstand von 1555,2 kN.

Dies stellt sich bei den Lochleibungswiderständen nach DIN EN 1993-1-8 [18] jedoch anders dar. Mit einem Widerstand von 731,5 kN bei einem Lochabstand von 40mm liegt der Unterschied zwischen den beiden Berechnungsmethoden bei 112 % und der Widerstand nach prEN 1993-1-8 [13] ist somit mehr als doppelt so groß wie der nach DIN EN 1993-1-8 [18]. Insgesamt kann es auch bei den Widerständen nach der aktuellen Norm zu einer Verringerung von bis zu 44% kommen. Erst ab einem Lochabstand  $p_2$  von 54mm und einem  $p_2/d_0$ -Verhältnis von 3 tritt der maximale Lochleibungswiderstand von 1296 kN ein.

Bei den Verformungen am Lochrand verhält es sich wie bei den Lochleibungswiderständen nach dem Entwurf. Hier hat der Lochabstand  $p_2$  ebenfalls keine Auswirkungen und die Verformungen von 16mm bleiben unverändert.

Generell lässt sich festhalten, dass der Parameter  $p_2$  nur Auswirkungen auf die Widerstände nach DIN EN 1993-1-8 [18] hat. Da jedoch bereits im Kapitel 5 dieser Arbeit ermittelt wurde, dass die Formeln für den Lochleibungswiderstand nach prEN 1993-1-8 [13] deutlich besser

zu den Versuchsergebnissen passen und die tatsächlichen Widerstände sehr gut durch diese Formeln vorhergesagt werden, kann festgestellt werden, dass der Parameter  $p_2$  keine Auswirkung auf den Widerstand der Lochleibung hat. Durch die Formeln der DIN EN 1993-1-8 [18] wurden die Lochleibungswiderstände somit unnötiger Weise verringert.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass in den Formeln der DIN EN 1993-1-8 [18] für den Lochleibungswiderstand zwar alle Rand- und Lochleibungsparameter eine Rolle spielen, jedoch hat nicht jeder davon einen tatsächlichen Einfluss auf die Lochleibung.

Die größte Veränderung des Lochleibungswiderstandes wird durch den Parameter  $e_1$ , also den Randabstand in Krafrichtung, bewirkt. Hier kann durch die Veränderung des Parameters der gesamte Lochleibungswiderstand um 40% und der Lochleibungswiderstand von einzelnen Randschrauben in der Verbindung sogar um 60% verringert werden. Da der Lochleibungswiderstand mit den Verformungen am Schraubenrand zusammenhängt, werden auch die Verformungen von Randschrauben je nach Randabstand bis zu 145 % gesteigert bzw. ebenfalls um 60% verringert.

Der zweite Parameter, der einen großen Einfluss auf den Lochleibungswiderstand hat, ist der Lochabstand  $p_1$ . Durch die Verringerung von  $p_1$  kann es zu Abminderung des Lochleibungswiderstandes von innen liegenden Schrauben von 51% bei den Berechnungen nach DIN EN 1993-1-8 [18] bzw. 43 % bei den Berechnungen nach prEN 1993-1-8 [13] kommen. Da die Anzahl an innen liegenden Schrauben in dem hier gewählten System gering ist, bedeutet das eine Verringerung für den Lochleibungswiderstand der gesamten Verbindung von 16% bzw. 15%. Für die Verformungen von Lochrändern bei innen liegenden Schrauben bedeutet der Einfluss von  $p_1$  eine mögliche Steigerung von bis zu 75%.

Bei den Parametern  $e_2$  und  $p_2$  hat sich gezeigt, dass diese beiden Abstände keinen Einfluss auf die Lochleibungsnachweise haben, jedoch darüber entscheiden, ob für eine Verbindung der Nachweis auf Lochleibung oder der Nachweis Netto-Querschnitts maßgebend wird.

Für Tragwerksplaner sind die Erkenntnisse der Parameterstudie sehr hilfreich. Wenn der Lochleibungswiderstand einer Verbindung erhöht werden soll, kann zuallererst der Randabstand  $e_1$  bis  $3 \cdot d_0$  erhöht werden, weil hier die größten Steigerungen des Widerstandes möglich sind. Sollte es zudem dazu kommen, dass die Verformungen durch die Pressungen der Lochleibung begrenzt werden sollen, weil beispielsweise die Stahlbleche womöglich in einer anderen Verbindung noch verwendet werden sollen, kann bei Randschrauben der Randabstand  $e_1$  verringert werden und bei Innenschrauben der Schraubenabstand  $p_1$ .

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, mehreren Fragen bezüglich des Bemessungsentwurfs prEN 1993-1-8 [13] für geschraubte Stahlverbindungen auf den Grund zu gehen. In den ersten beiden Fragen wurde zum einen die Notwendigkeit eines neuen Bemessungsvorschlags für die Bemessung eines geschraubten Stahlanschlusses betrachtet. Zu anderen sollten die Unterschiede der beiden Berechnungsmethoden herausgearbeitet werden.

Es hat sich herausgestellt, dass in der Handhabung der DIN EN 1993-1-8 [18] Unklarheiten aufgetreten sind. Es wurde festgestellt, dass bei den Nachweisen für das Abscheren von Schrauben, Durchstanzen von Schrauben oder der Zugbelastung von Schrauben keine Änderungen in den Gleichungen gibt. Hier wurden lediglich Angaben in den Bemessungsgleichungen genauer erläutert oder Sonderfälle eingeführt, um die Handhabung zu verbessern. [13, 18]

Bei den Nachweisen für Lochleibung und Blockversagen zeigt sich jedoch ein anderes Bild. Zu beiden Nachweisen wurden im Laufe der letzten Jahre viele zusätzliche Versuche gemacht, die dazu geführt haben, dass beide Nachweise infrage gestellt wurden. [56] Bei dem Nachweis auf Blockversagen hat sich seit der Veröffentlichung der DIN EN 1993-1-8 [18] im Jahr 2012 das generelle Verständnis für den Nachweis geändert. Es wurde erkannt, dass in einer geschraubten Verbindung das Blockversagen oft bemessungsrelevant wird, da es zu geringeren Widerständen als die anderen Verbindungsnachweise führen kann. Dem gesamten Nachweis wurde in dem Entwurf prEN 1993-1-8 [13] eine größere Notwendigkeit eingeräumt und auch die Formeln haben sich im Vergleich zu der DIN EN 1993-1-8 [18] geändert. [13, 18]

Bei dem Nachweis auf Lochleibung hat sich durch die zusätzlichen Versuchsergebnisse hingegen gezeigt, dass bei der Bemessung eines Stahlbleches zu konservativ Widerstände ermittelt wurden. Die vorhergesagten Lochleibungswiderstände liegen im Durchschnitt deutlich unter den ermittelten Widerständen aus Versuchen. Die Gleichungen wurden angepasst, damit Anschlüsse wirtschaftlicher dimensioniert werden können. [54]

Die nächsten Themen, die in dieser Arbeit behandelt wurden, sind die Zuverlässigkeit und die Sicherheit des Lochleibungsnachweis nach der DIN EN 1993-1-8 [18] und der prEN 1993-1-8 [13].

In der statistischen Auswertung, die nach den Richtlinien der DIN EN 1990 [18] erfolgt ist, hat sich gezeigt, dass beide Berechnungsmethoden für den vorhergesagten Widerstand auf Lochleibung als sicher anzusehen sind. Jedoch ist klar geworden, dass die Bemessungsergebnisse von der DIN EN 1993-1-8 [18] den Lochleibungswiderstand von Stahlblechen oft unterschätzen, was bei den Ergebnissen nach dem Entwurf prEN 1993-1-8 [13] behoben wurde.

Somit kann auch die nächste Frage beantwortet werden, bei der betrachtet wurde, welche der beiden Berechnungsmethoden die realistischeren Ergebnisse für den Lochleibungswiderstand in einer Verbindung liefert. Hier kann nachweislich der Entwurf prEN 1993-1-8 [13] genannt werden.

Der letzte Punkt, der in dieser Arbeit behandelt wurde, ist die Untersuchung, von welchen Kenngrößen der Nachweis des Lochleibungswiderstandes abhängig ist.

Der Widerstand für das Versagen auf Lochleibung ist von der Zugfestigkeit der Stahlsorte, der Zugfestigkeit des Schraubenwerkstoffes und der Dicke des Stahlblechs abhängig. Daneben haben jedoch auch die Abstände zwischen den Schrauben oder zum Rand des Bleches Auswirkungen auf den Widerstand. Zudem haben Untersuchungen gezeigt, dass das Einbetten der Schraube in das Stahlblech während der Belastung in Verbindung zu dem Lochleibungswiderstand steht. [13, 18, 56]

An einer geschraubten Stahlverbindung wurde daher untersucht, welchen Einfluss die geometrischen Parameter der Rand- und Lochabstände auf den Lochleibungswiderstand und die Verformungen durch die Einbettung der Schraube haben.

Die Parameterstudie ergab, dass der Randabstand in Krafrichtung  $e_1$  den größten Einfluss auf den Nachweis des Lochleibungswiderstandes hat, da durch eine Veränderung dieses Parameters der Widerstand um bis zu 60% verringert werden kann. Zudem hat sich gezeigt, dass die Verformungen am Lochrand von Randschrauben durch einen geringen Randabstand sehr verringert werden können.

Der zweite Parameter, der einen großen Einfluss auf den Widerstand und die Verformung am Schraubenrand hat, ist der Parameter  $p_1$ , welcher den Lochabstand in Krafrichtung beschreibt. Durch die Veränderung dieses Abstandes kann der Lochleibungswiderstand der gesamten Verbindung um bis zu 16% verringert werden. Auch dieser Abstand hat einen Einfluss auf die Verformungen am Lochrand von innen liegenden Schrauben. Die Verformungen können um bis zu 75% erhöht werden, je nachdem welcher Abstand für  $p_1$  gewählt wird.

Es hat sich gezeigt, dass die beiden Parameter  $e_2$  und  $p_2$ , also der Randabstand quer zur Krafrichtung und der Schraubenabstand quer zur Krafrichtung, keinen Einfluss auf die Verformungen am Lochrand haben. Damit ist der Lochleibungswiderstand einzelner Schrauben oder der gesamten Verbindung ebenfalls unabhängig. In der DIN EN 1993-1-8 [18] fließen jedoch beide Parameter in die Gleichungen des Lochleibungsnachweises ein, wodurch die Widerstände stark verringert werden. [18]

Um den tatsächlichen Lochleibungswiderstand eines geschraubten Stahlschlusses zu erhöhen, sollten neben der Blechdicke und der Zugfestigkeiten von Schraub- und Stahlwerkstoffen somit die Abstände  $e_1$  und  $p_1$  erhöht werden, da diese beiden Kennwerte die größten Auswirkungen auf den Lochleibungsnachweis haben. Im Projektalltag lässt sich die Veränderung der Abstände oft besser rechtfertigen als die Erhöhung von z.B. der Stahlgüte.

Sowohl die statistische Auswertung als auch die Parameterstudie haben bewiesen, dass der Lochleibungswiderstand durch die DIN EN 1993-1-8 [18] unterschätzt wird, was zu unwirtschaftlichen Stahlverbindungen führt.

Die Gleichungen aus der DIN EN 1993-1-8 [18] und der prEN 1993-1-8 [13] können zwar beide als zuverlässig und sicher angenommen werden, jedoch sollten bei der Berechnung einer Verbindung auch der Materialverbrauch und die Dimensionierung von Stahlbauteilen berücksichtigt werden. Die Berechnung nach prEN 1993-1-8 [13] hat sich damit als sinnvoller herausgestellt.

Um diese Arbeit zu erweitern, könnten zusätzliche Versuche für den Lochleibungsnachweis mit hochfesten Stahlgüten geführt werden. In der Literatur sind zwar einige Versuchsergebnisse zu finden, jedoch wurden oft die minimalen Rand- und Lochabstände sowie die ma-

ximalen Schraubenfestigkeiten nicht eingehalten. Dies hat dazu geführt, dass diese Ergebnisse nicht in den statistischen Auswertungen in dieser Arbeit berücksichtigt werden konnten.

Um den Entwurf prEN 1993-1-8 [13] noch genauer zu prüfen ist es ratsam, die gleiche Arbeitsweise auf den Nachweis des Blockversagens anzuwenden. Bei diesem Nachweis kommt es ebenfalls zu großen Änderungen zwischen der DIN EN 1993-1-8 [18] und prEN 1993-1-8 [13] und es wäre interessant zu sehen, ob zwischen den experimentellen Versuchswerten zum Blockversagen und den theoretisch berechneten Werten ebenfalls so große Unterschiede existieren. Zudem ist es auch bei dem Nachweis auf Blockversagen interessant zu erkennen, welcher geometrische Parameter den größten Einfluss auf den Widerstand hat und durch welche Parameteränderung man als Benutzer die schnellsten Steigerungen des Widerstands erwarten kann.

## 8 Literatur

- [1] *A. Albert*. Bautabellen für Ingenieure. mit Berechnungshinweisen und Beispielen, 21. Aufl. Köln: Bundesanzeiger Verlag; 2014.
- [2] *A. Fischer*. Bestimmung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte zur semiprobabilistischen Bemessung von Stahlbetonkonstruktionen. Kaiserslautern; 2010.
- [3] *A. Kleiner*. Beurteilung des Tragverhaltens von Flankenkehlnahtverbindungen aus normal- und höherfestem Baustahl unter Berücksichtigung statistischer Kriterien. Stuttgart; 2018.
- [4] *A. Moore, G. Rassati, J. Swanson*. Evaluation of the Current Resistance Factors for High-Strength Bolts; 2008.
- [5] *Academic*. Zuverlässigkeit (Technik). <https://de-academic.com/dic.nsf/dewiki/1553951>.
- [6] *C.-A. Graubner, H. Schmidt, M. Heimann*. Eurocode 0 - Grundlagen der Tragwerksplanung. Bauingenieur. 2011: 307–314.
- [7] *coggle*. Sicherheitskonzept. <https://coggle.it/diagram/WMzrf1F0uwABVNql/t/sicherheitskonzepte>.
- [8] *DBD - Dynamische BauDaten*. Eurocodes. <https://www.bauprofessor.de/eurocodes/>.
- [9] *Deutsches Institut für Normung*. Handbuch Eurocode 0 - Grundlagen der Tragwerksplanung. Vom DIN konsolidierte Fassung, 1. Aufl. Berlin: Beuth; 2011.
- [10] *Deutsches Institut für Normung e. V.* Handbuch Eurocode 0. Grundlagen der Tragwerksplanung: Beuth Verlag GmbH; 2011.
- [11] *Deutsches Institut für Normung e. V.* Handbuch Eurocode 3. Stahlbau - Band 1: Allgemeine Regeln Teil 1: Beuth Verlag GmbH; 2012.
- [12] *DIN Deutsches Institut für Normung e. V.* DIN EN 1090-2:2018-09, Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken\_- Teil\_2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken; Deutsche Fassung EN\_1090-2:2018: Beuth Verlag GmbH. Berlin.
- [13] *DIN Deutsches Institut für Normung e. V.* DIN EN 1993-1-8: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen; Deutsche Fassung prEN 1993-1-8:2021.
- [14] *DIN Deutsches Institut für Normung e. V.* DIN 1055-100: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln. 2001.
- [15] *DIN Deutsches Institut für Normung e. V.* DIN EN 1990: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002. 2010.
- [16] *DIN Deutsches Institut für Normung e. V.* DIN EN 1993-1-1: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005. 2010.
- [17] *DIN Deutsches Institut für Normung e. V.* DIN EN 1993-1-12: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Teil 1-12: Zusätzliche Regeln und Erweiterungen von EN 1993 auf Stahlgüten bis S700. 2010.
- [18] *DIN Deutsches Institut für Normung e. V.* DIN EN 1993-1-8: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen; Deutsche Fassung EN 1993-1-8:2005. 2010.

- [19] *DIN Deutsches Institut für Normung e. V.* DIN EN 1993-6: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten- Teil 6: Kranbahnen; Deutsche Fassung EN 1993-6:2007. 2010.
- [20] *DIN Deutsches Institut für Normung e. V.* DIN EN 1999-1-1: Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken- Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln; Deutsche Fassung EN 1999-1-1:2007. 2010.
- [21] *DIN Deutsches Institut für Normung e. V.* DIN EN 1993-1-1: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche und Englische Fassung prEN 1993-1-1:2020. 2020.
- [22] *DIN Deutsches Institut für Normung e. V.* DIN EN 1993-1-8/NA: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen. 2020.
- [23] *DIN Deutsches Institut für Normung e. V.* prEN 1993-1-1: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche und Englische Fassung prEN 1993-1-1:2020. 2020.
- [24] *Dr.-Ing. Gerhard Scheuermann.* Europarechtliche Regelungen und ihre Auswirkungen auf nationale Verordnungen und die Baupraxis. In: Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann. Stahlbau Kalender 2011. Eurocode 3 - Grundnorm Verbindungen, Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn; 2011.
- [25] *Eurocode 3 Editorial Group.* Eurocode No.3 - Background Documentation. Chapter 6. 1990.
- [26] *Eurocode online.* Entstehung und Geschichte. <https://www.eurocode-online.de/de/eurocode-informationen/entstehung-und-geschichte>.
- [27] *Europäische Union.* Die Geschichte der EU von 1945 bis 1959. [https://european-union.europa.eu/principles-countries-history/history-eu/1945-59\\_de](https://european-union.europa.eu/principles-countries-history/history-eu/1945-59_de).
- [28] *F. Stauder.* Zuverlässigkeitskonzept für bestehende Tragwerke im Wasserbau. Kaiserslautern; 2015.
- [29] *G. Franz, E.Hampe, K.Schäfer.* Konstruktionslehre des Stahlbetons. Band II: Tragwerke: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 1991.
- [30] *G. Sedlacek, O. Kraus.* Use of safety factors for the design of steel structures according to the Eurocodes. Engineering Failure Analysis. 2007; 14: 434–441.
- [31] *G. W. Owens, P. J. Dowling, R. J. Algar.* Bolted Connections, Bearing Stresses in Connections using Grade 8.8 Bolts. CESLIC Report BC3. London; 1976.
- [32] *H. Gangoly, P. Holzer, P. Maydl, A. Pech.* Ziegel im Hochbau. Theorie und Praxis: De Gruyter; 2018.
- [33] *H. Müller, U. Noltring, M. Haist, M. Kromer.* Betonverformung beherrschen. Grundlagen für schadensfreie Bauwerke; 12.03.2015.
- [34] *H. Pasternak, J. Robra.* Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Bauingenieur; 2011: 336–347.
- [35] *Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart.* Datensammlung Grundwerkstoffe. 2022.
- [36] *Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart.* Datensammlung Material. 2022.
- [37] *J. Grünberg.* Grundlagen der Tragwerksplanung-Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln für den konstruktiven Ingenieurbau. Erläuterungen zu DIN 1055-100: Beuth Verlag GmbH; 2004.

- [38] *J. Hou, S. Fu, X. An, Y. He.* Study on Statistical Characteristic of Strength of Steel Plate Used for Penstocks of Hydropower Stations.
- [39] *J. Huemer.* Zuverlässigkeit im Stahlbau - Vorgehensweise nach Eurocode und praktische Anwendung. Graz; 2014.
- [40] *J. Scheer.* Bestimmung der reinen Lochleibungsfestigkeiten und des Lochleibungs-Verformungsverhaltens. Bericht Nr. 6066. Braunschweig; 1985.
- [41] *J. Scheer, W. Maier, M. Klahold, K. Vajen.* Zur "Lochleibungsbeanspruchung" in Schraubenverbindungen. Stahlbau. Mai 1987; 56: 129–136.
- [42] *J. Schneider.* Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen. Grundwissen für Ingenieure. Zürich; 1994.
- [43] *J.H.A. Struik.* Metingen aan verbindingen met voorspanbouten, special in verband met de toelaatbare rekenkundige stuikdruk. Scriptie 6-66-1-VB-15. Delft; 1966.
- [44] *Joint Research Centre.* The role of EN 1990: The key head Eurocode. 2008.
- [45] *K. Bierbrauer.* Ein Beitrag zur Bestimmung der Biegetragfähigkeit bestehender Stahlbetonbauteile. München; 2008.
- [46] *K. Geißler, I. Prokop, A. Bubner, R. Egner, S. Heyde.* Verbesserung der Praxistauglichkeit der Baunorm durch pränormative Arbeit. Teilantrag 3: Stahlbau: Fraunhofer IRB Verlag. 2015.
- [47] *Lebensraum Ziegel.* Mauerwerk-Bemessung von Mauerwerk. 1. Teilsicherheitskonzept. <https://www.lebensraum-ziegel.de/ziegelllexikon/mauerwerk/bemessung-von-mauerwerk/1-teilsicherheitskonzept.html>.
- [48] *M. Demanega.* Wie viel Sicherheit beim Bauen? <https://demanega.com/2021/09/25/wie-viel-sicherheit-beim-bauen/>.
- [49] *M. Lorin, R. Sahores.* Determination Experimentale de la Resistance des Princes Longitudinales et Transversales des Cornieres de Pylones Tendues. Paris; 1979.
- [50] *medistat.* Variationskoeffizient. <https://www.medistat.de/glossar/deskriptive-statistik/variationskoeffizient>.
- [51] *O. Klingmüller, U. Bourgund.* Sicherheit und Risiko im konstruktiven Ingenieurbau: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH; 1992.
- [52] *P. Može.* Deformation capacity, stiffness and bearing strength at bolt holes. Connections in Steel Structures VIII. 2016.
- [53] *P. Može.* Bearing strength at bolt holes in connections with large end distance and bolt pitch. Journal of Constructional Steel Research. 2018; 147: 132–144.
- [54] *P. Može.* Statistical evaluation of bearing resistance and related strength functions for bolted connections. Journal of Constructional Steel Research. 2020; 171: 106128.
- [55] *P. Može, D. Beg.* A complete study of bearing stress in single bolt connections. Journal of Constructional Steel Research. 2014; 95: 126–140.
- [56] *P. Može, F. Yang, M. Veljkovic.* Validation and application of bearing and block tearing resistance; background to prEN1993-1-8:2021. Journal of Constructional Steel Research. 2021; 187: 106985.
- [57] *Prof. Dr.-Ing. Horst-J. Bossenmayer.* Stahlbaunormung - heute und in Zukunft. In: Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann. Stahlbau Kalender 1999, Berlin: Ernst; 1999.
- [58] *R. Kindmann, M. Stracke.* Verbindungen im Stahl- und Verbundbau; 2012.
- [59] *S. Hafner.* Gesamtstabilitätsverhalten geschweißter Kastenquerschnitte unter Druck und Biegung. Graz.
- [60] *S. Hofmann.* Berechnung querbelasteter Schraubenverbindungen; 2016.

- [61] *statista*. Definition Quantil. <https://de.statista.com/statistik/lexikon/definition/106/quantil/>.
- [62] *Technische Universität Dresden*. Probabilistische Modelle. [https://methpsy.elearning.psych.tu-dresden.de/mediawiki/index.php/Probabilistische\\_Modelle](https://methpsy.elearning.psych.tu-dresden.de/mediawiki/index.php/Probabilistische_Modelle).
- [63] *Y. Shardt, H. Weiß*. Methoden der Statistik und Prozessanalyse. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2021.
- [64] *Y. Wang, Y. Lyu, G. Li, Liew, J. Y. R. Liew*. Behavior of single bolt bearing on high strength steel plate. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017; 137: 19–30.

## 9 Abkürzungsverzeichnis

BGD	<i>Background Documentation</i>
bzgl.	<i>Bezüglich</i>
bzw.	<i>Beziehungsweise</i>
ca.	<i>circa</i>
CEN	<i>Comité Européen de Normalisation</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
E	<i>Einwirkung</i>
EC	<i>Eurocode</i>
EN	<i>Europäische Norm</i>
FORM	<i>First Order Reliability Method</i>
GZG	<i>Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit</i>
GZT	<i>Grenzzustand der Tragfähigkeit</i>
kN	<i>Kilonewton</i>
mm	<i>Millimeter</i>
R	<i>Widerstand</i>
$r_e$	<i>Experimenteller Widerstand</i>
$r_t$	<i>Theoretischer Widerstand</i>
z.B.	<i>zum Beispiel</i>

## 10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Normen des Eurocodes ([15], S. 10) .....	4
Abbildung 2-2: Überblick über statistische Methoden im Eurocode ([15], 87) .....	6
Abbildung 2-3: Zusammenspiel nach der Zuverlässigkeitsmethode 1. Ordnung (in Anlehnung an [15], S.90) .....	11
Abbildung 2-4: Dreidimensionale Darstellung der Verteilungsfunktionen (in Anlehnung an [2], S.19) .....	12
Abbildung 2-5: Zusammenhang des Sicherheitsindex und der Wichtungsfaktoren (in Anlehnung an [2], S. 51) .....	13
Abbildung 2-6: Beziehungen zwischen den einzelnen Teilsicherheitsbeiwerten für Einwirkungen und Widerstände ([10], S.97).....	16
Abbildung 2-7: Nachweispunkte für Spannungen ([51], S.77) .....	18
Abbildung 2-8: Teilsicherheitskonzept [47].....	19
Abbildung 2-9: Bilineare Spannungs-Dehnungsbeziehung ([11], S. 52).....	23
Abbildung 3-1: Abscherbeanspruchung einer Schraube ([58], S. 204).....	26
Abbildung 3-2: Ein- und Zweischnittige Scherverbindung ([58], S. 204).....	28
Abbildung 3-3: Bezeichnung der Lochabstände eines Stahlbleches ([18],S. 28) .....	28
Abbildung 3-4: Versagensarten Lochleibung (in Anlehnung an [53], S. 2) .....	29
Abbildung 3-5: Zugbeanspruchte Schrauben in einer Verbindung ([58], S.211) .....	31
Abbildung 3-6: Zug- und Abscherbeanspruchung einer Schraube ([58], S. 213) .....	33
Abbildung 3-7: Blockversagen von Schraubengruppen (in Anlehnung an [18], S. 37) .....	34
Abbildung 3-8: Abstand Scherfuge und Übergangsbereich in einer Scherverbindung (in Anlehnung an [13], S. 49) .....	38
Abbildung 3-9: Einwirkende Lochleibungskraft in zwei Richtungen ([13], S. 50) .....	41
Abbildung 3-10: Blockversagen bei gleichmäßigen zugbeanspruchten Bereichen ([13],56).....	44
Abbildung 3-11: Blockversagen bei ungleichmäßigen zugbeanspruchten Bereichen ([13],56).....	45
Abbildung 3-12: Prinzip Lochleibungsverformung ([56], S. 3).....	48
Abbildung 3-13: Lochleibungsverformungen der Stahlwerkstoffe (in Anlehnung an [56], S. 4).....	48
Abbildung 4-1: Regressionsdiagramm ([15] S. 107) .....	52
Abbildung 4-2: Bezeichnung der Lochabstände eines Stahlbleches ([18],S. 28) .....	60
Abbildung 4-3: Statistische Verteilung der Zugfestigkeit $f_u$ der Stahlsorten [35].....	61
Abbildung 4-4: Statistische Verteilung der Zugfestigkeit $f_{ub}$ des Schraubenwerkstoffes [36] .....	63
Abbildung 5-1: Vergleich rechnerischer und experimenteller Widerstände für die Stahlgüte S235; a) 1 Verbindungsmittel mit Abstand der Widerstandsergebnisse (schwarz); b) 2 Verbindungsmittel; c) mehr als 2 Verbindungsmittel; d) normativer Vergleich .....	68
Abbildung 5-2: Auszug BGD „Report Delf 4“ ([25], S. 147).....	72
Abbildung 5-3: Neuer Vergleich rechnerischer und experimenteller Widerstände für die Stahlgüte S235; a) 1 Verbindungsmittel; b) 2 Verbindungsmittel; c) mehr als 2 Verbindungsmittel; d) nomineller Vergleich.....	73

Abbildung 5-4: Vergleich rechnerischer und experimenteller Widerstände für die Stahlgüte S275; a) Vergleich $r_t$ und $r_e$ ; b) normativer Vergleich.....	77
Abbildung 5-5: Neuer Vergleich rechnerischer und experimenteller Widerstände für die Stahlgüte S275; a) Vergleich $r_t$ und $r_e$ ; b) nomineller Vergleich .....	79
Abbildung 5-6: Vergleich rechnerischer und experimenteller Widerstände für die Stahlgüte S355; a) 1 Verbindungsmittel; b) 2 Verbindungsmittel; c) mehr als 2 Verbindungsmittel; d) normativer Vergleich.....	81
Abbildung 5-7: Neuer Vergleich rechnerischer und experimenteller Widerstände für die Stahlgüte S355; a) 1 Verbindungsmittel; b) 2 Verbindungsmittel; c) mehr als 2 Verbindungsmittel; d) nomineller Vergleich.....	83
Abbildung 5-8: Vergleich rechnerischer und experimenteller Widerstände für die Stahlgüte S460; a) Vergleich für ein Verbindungsmittel; b) normativer Vergleich .....	86
Abbildung 5-9: Vergleich rechnerischer und experimenteller Widerstände für die Stahlgüte S550; a) Vergleich für ein Verbindungsmittel; b) normativer Vergleich .....	88
Abbildung 5-10: Vergleich rechnerischer und experimenteller Widerstände für die Stahlgüte S690; a) Vergleich für ein Verbindungsmittel; b) normativer Vergleich.....	91
Abbildung 5-11: Vergleich rechnerischer und experimenteller Widerstände für alle Versuchsergebnisse; a) Vergleich $r_t$ und $r_e$ ; b) normativer Vergleich.....	94
Abbildung 5-12: Statistische Auswertung BGD Lochleibungsnachweis ([25],6.02 S. I 94) .....	96
Abbildung 6-1: Schraubverbindung Parameterstudie Draufsicht .....	101
Abbildung 6-2: Schraubverbindung Parameterstudie Ansicht .....	102
Abbildung 6-3: Unterschied Verformungen Gleichung 6.1 und Gleichung 6.3 .....	118
Abbildung 6-4: Parameterstudie Vergleich prEN 1993-1-8 [13] und DIN EN 1993-1-8 [18] Änderungen $e_1$ .....	120
Abbildung 6-5: Parameterstudie Vergleich prEN 1993-1-8 und DIN EN 1993-1-8 Änderungen $e_2$ .....	122
Abbildung 6-6: Parameterstudie Vergleich prEN 1993-1-8 [13] und DIN EN 1993-1-8 [18] Änderungen $p_1$ .....	124
Abbildung 6-7: Parameterstudie Vergleich prEN 1993-1-8 [13] und DIN EN 1993-1-8 [18] Änderungen $p_2$ .....	126

## 11 Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Teilsicherheitsbeiwerte im Stahlbau ([16], S. 48 & [18], S. 21).....	22
Tab. 3-1: Kategorien von Schraubverbindungen [18].....	25
Tab. 3-2: Parameter zur Berücksichtigung der Lage und Schraubenfestigkeit [18].....	27
Tab. 3-3: Abminderungsbeiwerte für Sonderfälle $\beta_2$ und $\beta_3$ ([18], S. 38) .....	36
Tab. 3-4: Gegenüberstellung Nachweis Lochleibung DIN EN 1993-1-8 [18] und prEN 1993-1-8 [13] .....	47
Tab. 4-1: Werte $k_n$ für charakteristischen Wert (5%-Fraktile) ([15], S.102) .....	56
Tab. 4-2: Werte $k_n$ für charakteristischen Wert (5%-Fraktile) ([15], S.102) .....	57
Tab. 4-3: Statistische Kenngrößen der Zugfestigkeit $f_u$ der Stahlsorten [35] .....	61
Tab. 4-4: Statistische Kenngrößen der Zugfestigkeit $f_{ub}$ des Schraubenwerkstoffes [36].....	62
Tab. 4-5: Übersicht und Gliederung der experimentellen Datensätze .....	65
Tab. 5-1: Ergebnisse der Auswertung Stahlbleche der Güte S235 mit einem Verbindungsmittel nach DIN EN 1993-1-8 [18] und prEN 1993-1-8 [13] .....	70
Tab. 5-2: Ergebnisse der Auswertung Stahlbleche der Güte S235 nach DIN EN 1993-1-8 [18] (grau) und prEN 1993-1-8 [13] (weiß) .....	71
Tab. 5-3: Neue Ergebnisse der Auswertung Stahlbleche der Güte S235 nach DIN EN 1993-1-8 [18] (grau) und prEN 1993-1-8 [13] (weiß) .....	75
Tab. 5-4: Ergebnisse der Auswertung Stahlbleche der Güte S275 nach DIN EN 1993-1-8 [18] (grau) und prEN 1993-1-8 [13] (weiß) .....	78
Tab. 5-5: Neue Ergebnisse der Auswertung Stahlbleche der Güte S275 nach DIN EN 1993-1-8 [18] (grau) und prEN 1993-1-8 [13] (weiß) .....	79
Tab. 5-6: Ergebnisse der Auswertung Stahlbleche der Güte S355 nach DIN EN 1993-1-8 [18] (grau) und prEN 1993-1-8 [13] (weiß) .....	82
Tab. 5-7: Neue Ergebnisse der Auswertung Stahlbleche der Güte S355 nach DIN EN 1993-1-8 [18] (grau) und prEN 1993-1-8 [13] (weiß) .....	85
Tab. 5-8: Ergebnisse der Auswertung Stahlbleche der Güte S460 nach DIN EN 1993-1-8 [18] (grau) und prEN 1993-1-8 [13] (weiß) .....	87
Tab. 5-9: Ergebnisse der Auswertung Stahlbleche der Güte S550 nach DIN EN 1993-1-8 [18] (grau) und prEN 1993-1-8 [13] (weiß) .....	89
Tab. 5-10: Ergebnisse der Auswertung Stahlbleche der Güte S690 nach DIN EN 1993-1-8 [18] (grau) und prEN 1993-1-8 [13] (weiß) .....	92
Tab. 5-11: Ergebnisse der Auswertung aller Versuchsergebnisse .....	95
Tab. 5-12: Zusammenfassung der Ergebnisse nach der Berechnung der DIN EN 1993-1-8 [18]... 97	97
Tab. 5-13: Zusammenfassung der Ergebnisse nach der Berechnung des Entwurfs prEN 1993-1-8 [13].....	98
Tab. 6-1: Festgelegte Parameter.....	102
Tab. 6-2: Parameterstudie DIN EN 1993-1-8 [18] Änderungen $e_1$ .....	105
Tab. 6-3: Parameterstudie DIN EN 1993-1-8 [18] Änderungen $e_2$ .....	106
Tab. 6-4: Parameterstudie DIN EN 1993-1-8 [18] Änderungen $p_1$ .....	107

---

Tab. 6-5: Parameterstudie DIN EN 1993-1-8 [18] Änderungen $p_2$ .....	108
Tab. 6-6: Parameterstudie prEN 1993-1-8 [13] Änderungen $e_1$ .....	110
Tab. 6-7: Parameterstudie prEN 1993-1-8 [13] Änderungen $e_2$ .....	111
Tab. 6-8: Parameterstudie prEN 1993-1-8 [13] Änderungen $p_1$ .....	112
Tab. 6-9: Parameterstudie prEN 1993-1-8 [13] Änderungen $p_2$ .....	113
Tab. 6-10: Lochleibungsverformungen Variation $e_1$ .....	115
Tab. 6-11: Lochleibungsverformungen Variation $e_2$ .....	116
Tab. 6-12: Lochleibungsverformungen Variation $p_1$ .....	116
Tab. 6-13: Lochleibungsverformungen Variation $p_2$ .....	117

## 12 Anhang

### Parameter

Rep	Report Nummer
No.	Testnummer
Pu	Tatsächliche Last
b	Blechbreite
t	Blehdicke
d	Charakteristischer Schraubendurchmesser
n	Schraubenanzahl
e1	Randabstand in Krafrichtung
e2	Randabstand quer zur Krafrichtung
p1	Lochabstand in Krafrichtung
R	Tatsächliche Zugfestigkeit des Stahlbleches
d1	Schraubenlochdurchmesser
St	Stahlgüte
V	Versagensart
C	Bauteilcode

## 12.1 Anhang 1

Experimentelle Versuchsergebnisse aufbereitet aus BGD „Report Delf 4“ [25].

Rep	No.	Pu	b	t	d	n	e2	e1	p	R	d1	St	V	C
4	1	400,0	72,0	19,0	24,0	1,0	36,0	48,0	0,0	41,2	25,0	37,0	9,0	3,0
4	2	412,0	72,0	19,0	24,0	1,0	36,0	48,0	0,0	41,2	25,0	37,0	9,0	3,0
4	3	419,0	72,0	19,0	24,0	1,0	36,0	48,0	0,0	41,2	25,0	37,0	9,0	3,0
4	4	413,0	72,0	19,0	24,0	1,0	36,0	48,0	0,0	41,2	25,0	37,0	9,0	3,0
4	5	390,0	72,0	19,0	24,0	1,0	36,0	48,0	0,0	41,2	25,0	37,0	9,0	4,0
4	6	344,0	73,0	15,0	24,0	1,0	36,5	48,0	0,0	41,3	25,0	37,0	9,0	3,0
4	7	344,0	73,0	15,0	24,0	1,0	36,5	48,0	0,0	41,8	25,0	37,0	9,0	3,0
4	8	326,0	73,0	15,0	24,0	1,0	36,5	48,0	0,0	41,8	25,0	37,0	9,0	3,0
4	9	303,0	73,0	15,0	24,0	1,0	36,5	48,0	0,0	41,8	25,0	37,0	9,0	3,0
4	10	312,0	73,0	15,0	24,0	1,0	36,5	48,0	0,0	41,8	25,0	37,0	9,0	4,0
4	11	304,0	88,0	12,5	24,0	1,0	44,0	48,0	0,0	38,9	25,0	37,0	6,0	3,0
4	12	310,0	88,0	12,5	24,0	1,0	44,0	48,0	0,0	38,9	25,0	37,0	6,0	3,0
4	13	269,0	88,0	12,5	24,0	1,0	44,0	48,0	0,0	38,9	25,0	37,0	6,0	3,0
4	14	262,0	88,0	12,5	24,0	1,0	44,0	48,0	0,0	38,9	25,0	37,0	6,0	4,0
4	15	231,0	110,0	10,0	24,0	1,0	55,0	48,0	0,0	40,1	25,0	37,0	6,0	3,0
4	16	285,0	110,0	10,0	24,0	1,0	55,0	48,0	0,0	40,1	25,0	37,0	6,0	3,0
4	17	268,0	110,0	10,0	24,0	1,0	55,0	48,0	0,0	40,1	25,0	37,0	5,0	3,0
4	18	217,0	110,0	10,0	24,0	1,0	55,0	48,0	0,0	40,1	25,0	37,0	6,0	4,0
4	19	289,0	60,0	15,0	20,0	1,0	30,0	40,0	0,0	41,8	21,0	37,0	9,0	3,0
4	20	285,0	60,0	15,0	20,0	1,0	30,0	40,0	0,0	41,8	21,0	37,0	9,0	3,0
4	21	255,0	60,0	15,0	20,0	1,0	30,0	40,0	0,0	41,8	21,0	37,0	9,0	4,0
4	22	244,0	62,0	12,5	20,0	1,0	31,0	40,0	0,0	38,9	21,0	37,0	9,0	3,0
4	21	234,0	62,0	12,5	20,0	1,0	11,0	40,0	0,0	38,9	21,0	37,0	9,0	3,0
4	24	247,0	62,0	12,5	20,0	1,0	11,0	40,0	0,0	38,9	21,0	37,0	9,0	3,0
4	25	208,0	62,0	12,5	20,0	1,0	31,0	40,0	0,0	38,9	21,0	37,0	9,0	4,0
4	26	213,0	78,0	10,0	20,0	1,0	39,0	40,0	0,0	40,1	21,0	37,0	6,0	1,0
4	27	219,0	78,0	10,0	20,0	1,0	39,0	40,0	0,0	40,1	21,0	37,0	6,0	3,0
4	28	227,0	78,0	10,0	20,0	1,0	39,0	40,0	0,0	40,1	21,0	37,0	6,0	3,0
4	29	190,0	78,0	10,0	20,0	1,0	39,0	40,0	0,0	40,1	21,0	37,0	6,0	4,0
4	30	185,0	110,0	7,0	20,0	1,0	55,0	40,0	0,0	41,6	21,0	37,0	6,0	3,0
4	31	1G8.0	110,0	7,0	20,0	1,0	55,0	40,0	0,0	41,6	21,0	37,0	6,0	3,0
4	32	181,0	110,0	7,0	20,0	1,0	55,0	40,0	0,0	41,6	21,0	37,0	6,0	3,0
4	33	148,0	110,0	7,0	20,0	1,0	55,0	40,0	0,0	41,6	21,0	37,0	6,0	4,0
4	14	175,0	48,0	12,5	16,0	1,0	24,0	32,0	0,0	38,9	17,0	37,0	9,0	3,0
4	35	176,0	48,0	12,5	16,0	1,0	24,0	32,0	0,0	38,9	17,0	37,0	9,0	3,0

4	36	169,0	48,0	12,5	16,0	1,0	24,0	32,0	0,0	38,9	17,0	37,0	9,0	1,0
4	37	155,0	48,0	12,5	16,0	1,0	24,0	32,0	0,0	38,9	17,0	37,0	9,0	4,0
4	38	152,0	49,0	10,0	16,0	1,0	24,5	32,0	0,0	40,1	17,0	37,0	9,0	3,0
4	39	156,0	49,0	10,0	16,0	1,0	24,5	32,0	0,0	40,1	17,0	37,0	9,0	3,0
4	40	154,0	49,0	10,0	16,0	1,0	24,5	32,0	0,0	40,1	17,0	37,0	9,0	3,0
4	41	134,0	49,0	10,0	16,0	1,0	24,5	32,0	0,0	40,1	17,0	37,0	9,0	4,0
4	42	119,0	70,0	7,0	16,0	1,0	35,0	32,0	0,0	41,6	17,0	37,0	6,0	3,0
4	43	120,0	70,0	7,0	16,0	1,0	35,0	32,0	0,0	41,6	17,0	37,0	6,0	3,0
4	44	116,0	70,0	7,0	16,0	1,0	35,0	32,0	0,0	41,6	17,0	37,0	6,0	3,0
4	45	101,0	70,0	7,0	16,0	1,0	35,0	32,0	0,0	41,6	17,0	37,0	6,0	4,0
4	46	102,0	98,0	5,0	16,0	1,0	49,0	32,0	0,0	40,4	17,0	37,0	6,0	3,0
4	47	102,0	98,0	5,0	16,0	1,0	49,0	32,0	0,0	40,4	17,0	37,0	6,0	3,0
4	48	93,0	98,0	5,0	16,0	1,0	49,0	32,0	0,0	40,4	17,0	37,0	6,0	3,0
4	49	74,0	98,0	5,0	16,0	1,0	49,0	32,0	0,0	40,4	17,0	37,0	6,0	4,0
4	50	100,0	36,0	10,0	12,0	1,0	18,0	24,0	0,0	40,1	13,0	37,0	9,0	3,0
4	51	107,0	36,0	10,0	12,0	1,0	18,0	24,0	0,0	40,1	13,0	37,0	9,0	3,0
4	52	105,0	36,0	10,0	12,0	1,0	18,0	24,0	0,0	40,1	13,0	37,0	9,0	3,0
4	53	94,0	36,0	10,0	12,0	1,0	18,0	24,0	0,0	40,1	13,0	37,0	9,0	4,0
4	54	83,0	38,0	7,0	12,0	1,0	19,0	24,0	0,0	41,6	13,0	37,0	9,0	3,0
4	55	84,0	38,0	7,0	12,0	1,0	19,0	24,0	0,0	41,6	13,0	37,0	9,0	3,0
4	56	86,0	38,0	7,0	12,0	1,0	19,0	24,0	0,0	41,6	11,0	37,0	9,0	3,0
4	57	75,0	38,0	7,0	12,0	1,0	19,0	24,0	0,0	41,6	11,0	37,0	9,0	4,0
4	58	69,0	53,0	5,0	12,0	1,0	26,5	24,0	0,0	40,4	13,0	37,0	6,0	3,0
4	59	69,0	53,0	5,0	12,0	1,0	26,5	24,0	0,0	40,4	13,0	37,0	6,0	3,0
4	60	51,0	53,0	5,0	12,0	1,0	26,5	24,0	0,0	40,4	13,0	37,0	6,0	4,0
4	61	67,0	66,0	4,0	12,0	1,0	33,0	24,0	0,0	41,0	13,0	37,0	6,0	3,0
4	62	64,0	66,0	4,0	12,0	1,0	33,0	24,0	0,0	41,0	13,0	37,0	6,0	3,0
4	63	68,0	66,0	4,0	12,0	1,0	33,0	24,0	0,0	41,0	13,0	37,0	6,0	1,0
4	64	63,0	66,0	4,0	12,0	1,0	33,0	24,0	0,0	41,0	13,0	37,0	6,0	1,0
4	65	48,0	66,0	4,0	12,0	1,0	33,0	24,0	0,0	41,0	13,0	37,0	6,0	4,0
4	66	757,0	141,0	15,0	24,0	2,0	70,5	48,0	72,0	41,8	25,0	37,0	9,0	3,0
4	67	581,0	110,0	15,0	24,0	2,0	55,0	48,0	72,0	41,8	25,0	37,0	9,0	3,0
4	68	544,0	110,0	15,0	24,0	2,0	55,0	48,0	72,0	41,8	25,0	37,0	9,0	4,0
4	69	590,0	141,0	12,5	24,0	2,0	70,5	48,0	72,0	38,9	25,0	37,0	9,0	3,0
4	70	448,0	110,0	12,5	24,0	2,0	55,0	48,0	72,0	18,9	25,0	37,0	9,0	3,0
4	71	428,0	110,0	12,5	24,0	2,0	55,0	48,0	72,0	38,9	25,0	37,0	9,0	4,0
4	72	513,0	141,0	10,0	24,0	2,0	70,5	48,0	72,0	40,1	25,0	37,0	9,0	3,0
4	73	398,0	110,0	10,0	24,0	2,0	55,0	48,0	72,0	40,1	25,0	37,0	9,0	3,0

---

4	74	250,0	95,0	7,0	16,0	2,0	47,5	32,0	48,0	41,6	17,0	37,0	9,0	3,0
4	75	213,0	95,0	7,0	16,0	2,0	47,5	32,0	48,0	41,6	17,0	37,0	6,0	4,0
4	76	180,0	98,0	5,0	16,0	2,0	47,5	32,0	48,0	40,4	17,0	37,0	9,0	3,0

## 12.2 Anhang 2

Experimentelle Versuchsergebnisse aufbereitet aus BGD „Report EDF 11“ [25].

Rep	No.	Pu	b	t	d	n	e2	e1	p	R	d1	St	V	C
11	1	29,8	50,0	3,2	12,0	1,0	26,3	23,1	0,0	42,4	11,0	37,0	8,0	1,0
11	2	30,1	50,0	3,2	12,0	1,0	26,1	21,6	0,0	43,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	3	30,1	50,0	3,2	12,0	1,0	27,0	23,6	0,0	43,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	4	61,0	60,0	5,0	16,0	1,0	31,1	27,8	0,0	42,3	17,0	37,0	8,0	1,0
11	5	62,0	60,0	5,0	16,0	1,0	31,6	27,1	0,0	42,3	17,0	37,0	8,0	1,0
11	6	133,0	90,0	7,2	24,0	1,0	46,5	40,2	0,0	37,8	25,0	37,0	8,0	1,0
11	7	132,0	90,0	7,3	24,0	1,0	46,7	40,4	0,0	37,8	25,0	37,0	8,0	1,0
11	8	124,0	90,0	7,3	24,0	1,0	46,3	39,3	0,0	38,4	25,0	37,0	8,0	1,0
11	9	151,0	100,0	7,3	24,0	1,0	35,7	44,0	0,0	44,7	25,0	37,0	8,0	1,0
11	10	150,0	100,0	7,3	24,0	1,0	35,7	44,3	0,0	44,7	25,0	37,0	9,0	1,0
11	11	78,5	70,0	5,5	18,0	1,0	25,2	30,3	0,0	45,0	19,0	37,0	8,0	1,0
11	12	80,5	70,0	5,5	18,0	1,0	17,0	30,7	0,0	45,0	19,0	37,0	8,0	1,0
11	13	78,0	70,0	5,5	18,0	1,0	37,9	31,3	0,0	45,0	19,0	37,0	8,0	1,0
11	14	77,5	70,0	5,5	18,0	1,0	37,3	30,9	0,0	45,0	19,0	37,0	8,0	1,0
11	15	129,0	90,0	6,4	20,0	1,0	52,1	39,6	0,0	47,3	21,0	37,0	8,0	1,0
11	16	128,0	90,0	6,1	20,0	1,0	51,8	40,0	0,0	47,1	21,0	37,0	8,0	1,0
11	17	128,0	90,0	6,4	20,0	1,0	52,0	40,1	0,0	47,3	21,0	37,0	8,0	1,0
11	18	155,0	90,0	7,3	24,0	1,0	12,9	43,7	0,0	47,5	25,0	37,0	8,0	1,0
11	19	168,0	90,0	7,3	24,0	1,0	57,7	45,3	0,0	44,7	25,0	37,0	8,0	1,0
11	20	164,0	10,0	7,3	24,0	1,0	57,8	44,4	0,0	44,7	25,0	37,0	8,0	1,0
11	21	173,0	90,0	7,3	24,0	1,0	57,1	45,6	0,0	44,7	25,0	37,0	8,0	1,0
11	22	172,0	100,0	8,0	24,0	1,0	32,8	44,6	0,0	47,7	25,0	37,0	8,0	1,0
11	23	184,0	100,0	8,2	24,0	1,0	53,6	45,2	0,0	47,7	25,0	37,0	8,0	1,0
11	24	197,0	100,0	8,2	24,0	1,0	54,2	45,1	0,0	47,7	25,0	37,0	8,0	1,0
11	25	198,0	100,0	8,2	24,0	1,0	54,2	45,9	0,0	47,7	25,0	37,0	8,0	1,0
11	26	239,0	120,0	8,1	27,0	1,0	65,5	53,7	0,0	52,4	28,0	52,0	8,0	1,0
11	27	242,0	120,0	8,1	27,0	1,0	63,4	53,7	0,0	52,4	28,0	52,0	8,0	1,0
11	28	242,0	120,0	8,1	27,0	1,0	65,0	52,6	0,0	52,4	28,0	52,0	8,0	1,0
11	29	63,6	60,0	4,1	12,0	2,0	28,5	20,5	30,2	41,6	13,0	37,0	8,0	1,0
11	30	63,7	60,0	4,1	12,0	2,0	28,8	21,0	30,7	41,6	13,0	37,0	8,0	1,0
11	31	64,6	60,0	4,1	12,0	2,0	28,5	20,5	29,5	41,6	13,0	37,0	8,0	1,0
11	32	65,0	60,0	4,1	12,0	2,0	28,8	20,2	35,2	41,6	13,0	37,0	8,0	1,0
11	33	65,6	60,0	4,1	12,0	2,0	28,5	19,6	36,0	41,6	13,0	37,0	8,0	1,0
11	34	65,2	60,0	4,0	12,0	2,0	28,8	21,0	35,3	41,6	13,0	37,0	8,0	1,0
11	35	66,8	60,0	4,0	12,0	2,0	29,2	19,5	40,2	41,6	13,0	37,0	8,0	1,0
11	36	68,4	60,0	4,1	12,0	2,0	29,2	19,2	39,5	41,6	13,0	37,0	8,0	1,0
11	37	66,4	60,0	4,1	12,0	2,0	28,5	19,8	40,7	41,6	13,0	37,0	8,0	1,0
11	38	68,2	60,0	4,1	12,0	2,0	29,2	25,8	29,0	41,6	13,0	37,0	8,0	1,0
11	39	68,0	60,0	4,1	12,0	2,0	28,3	23,8	30,4	41,6	13,0	37,0	8,0	1,0
11	40	69,0	60,0	4,1	12,0	2,0	29,5	22,9	30,4	41,6	13,0	37,0	8,0	1,0

11	41	70,6	60,0	4,0	12,0	2,0	28,8	23,5	15,1	41,6	13,0	37,0	8,0	1,0
11	42	72,8	60,0	4,1	12,0	2,0	28,7	24,0	35,4	41,6	13,0	37,0	8,0	1,0
11	43	71,2	60,0	4,2	12,0	2,0	28,5	24,1	35,4	41,6	13,0	37,0	8,0	1,0
11	44	73,2	60,0	4,1	12,0	2,0	29,0	25,1	40,2	41,6	13,0	37,0	8,0	1,0
11	45	93,2	60,0	4,1	12,0	3,0	29,2	19,6	29,6	41,6	13,0	37,0	8,0	1,0
11	46	91,4	60,0	4,0	12,0	3,0	28,8	21,2	29,4	41,6	13,0	37,0	8,0	1,0
11	47	91,6	60,0	4,1	12,0	3,0	29,1	19,3	30,4	41,6	13,0	37,0	8,0	1,0
11	48	99,0	60,0	4,2	12,0	3,0	29,0	20,5	35,0	41,6	13,0	37,0	8,0	1,0
11	49	98,0	60,0	4,1	12,0	3,0	28,1	19,9	35,4	41,6	13,0	37,0	8,0	1,0
11	50	99,0	60,0	4,3	12,0	3,0	30,0	20,9	34,8	40,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	51	98,3	60,0	4,1	12,0	3,0	29,4	20,4	39,8	40,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	52	103,8	60,0	4,2	12,0	3,0	29,2	20,0	40,0	40,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	53	104,0	60,0	4,2	12,0	3,0	29,1	20,0	40,5	40,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	54	98,7	60,0	4,2	12,0	3,0	29,8	24,5	30,4	40,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	55	108,0	60,0	4,2	12,0	3,0	29,8	24,5	35,7	40,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	56	105,5	60,0	4,2	12,0	3,0	29,2	25,0	35,5	40,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	57	106,0	60,0	4,1	12,0	3,0	29,7	24,3	40,3	40,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	58	107,5	60,0	4,1	12,0	3,0	29,8	24,3	40,6	40,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	59	146,0	70,0	5,2	20,0	2,0	34,6	30,1	55,0	44,9	21,0	37,0	10,0	1,0
11	60	147,0	70,0	5,4	20,0	2,0	34,2	30,4	65,1	44,9	21,0	37,0	10,0	1,0
11	61	146,5	70,0	5,4	20,0	2,0	33,9	30,9	65,1	44,9	21,0	37,0	10,0	1,0
11	62	147,0	70,0	5,4	20,0	2,0	35,0	30,5	65,4	44,9	21,0	37,0	10,0	1,0
11	63	153,0	90,0	7,1	20,0	2,0	46,4	31,0	44,9	41,3	21,0	37,0	8,0	1,0
11	64	156,0	90,0	7,1	20,0	2,0	46,4	29,9	45,4	41,3	21,0	37,0	8,0	1,0
11	65	156,0	90,0	7,2	20,0	2,0	46,4	31,9	44,9	41,3	21,0	37,0	8,0	1,0
11	65	162,3	90,0	7,1	20,0	2,0	46,8	30,5	55,0	41,3	21,0	37,0	8,0	1,0
11	67	160,8	90,0	7,1	20,0	2,0	46,6	30,8	55,0	41,3	21,0	37,0	8,0	1,0
11	68	158,0	90,0	7,1	20,0	2,0	46,5	32,4	55,0	41,3	21,0	37,0	8,0	1,0
11	69	162,3	90,0	7,1	20,0	2,0	46,5	29,0	65,0	41,3	21,0	37,0	8,0	1,0
11	70	168,5	90,0	7,1	20,0	2,0	46,0	29,7	65,0	41,3	21,0	37,0	8,0	1,0
11	71	169,5	90,0	7,1	20,0	2,0	46,8	29,6	65,0	41,3	21,0	37,0	8,0	1,0
11	22	234,0	90,0	7,3	20,0	3,0	46,6	30,3	45,4	41,5	21,0	37,0	8,0	1,0
11	73	231,0	90,0	7,2	20,0	3,0	46,8	31,7	44,7	41,5	21,0	37,0	8,0	1,0
11	74	232,0	90,0	7,3	20,0	3,0	46,6	30,4	45,0	41,5	21,0	37,0	8,0	1,0
11	75	249,0	90,0	7,3	20,0	3,0	46,6	30,0	55,5	41,5	21,0	37,0	8,0	1,0
11	76	249,0	90,0	7,3	20,0	3,0	46,4	31,0	54,5	41,5	21,0	37,0	8,0	1,0
11	77	238,0	90,0	7,4	20,0	3,0	46,3	30,0	55,0	41,5	21,0	37,0	8,0	1,0
11	78	259,0	90,0	7,3	20,0	3,0	45,0	30,8	65,6	41,5	21,0	37,0	8,0	1,0
11	79	294,0	100,0	8,1	20,0	3,0	48,1	29,8	45,2	45,4	21,0	37,0	8,0	1,0
11	80	298,0	100,0	8,2	20,0	3,0	48,6	29,7	45,0	45,4	21,0	37,0	8,0	1,0
11	81	350,0	100,0	8,3	20,0	3,0	50,9	31,0	64,3	44,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	82	353,0	100,0	8,1	20,0	3,0	49,2	30,4	65,3	44,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	83	294,0	100,0	7,8	20,0	4,0	49,2	29,7	45,5	36,8	21,0	37,0	10,0	1,0
11	84	87,6	70,0	5,1	12,0	2,0	34,5	20,4	30,3	43,7	13,0	37,0	8,0	1,0

11	85	88,0	70,0	5,2	12,0	2,0	33,4	20,8	29,5	43,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	86	85,4	70,0	5,1	12,0	2,0	34,2	18,6	29,8	43,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	87	92,2	70,0	5,3	12,0	2,0	34,3	19,8	34,7	43,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	88	93,6	70,0	5,1	12,0	2,0	33,8	22,1	34,5	43,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	89	90,0	70,0	5,0	12,0	2,0	34,8	20,0	35,0	43,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	90	95,6	70,0	5,2	12,0	2,0	34,2	20,5	39,3	43,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	91	92,2	70,0	5,0	12,0	2,0	14,0	21,2	40,0	43,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	92	91,4	70,0	5,1	12,0	2,0	34,0	19,5	40,6	43,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	93	96,8	70,0	5,2	12,0	2,0	34,0	24,1	29,9	43,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	4	97,0	70,0	5,0	12,0	2,0	34,1	24,0	29,8	43,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	95	96,4	70,0	5,1	12,0	2,0	34,2	23,4	29,8	43,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	96	99,8	70,0	5,4	12,0	2,0	35,0	18,6	34,4	43,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	97	97,6	70,0	5,1	12,0	2,0	33,7	24,6	34,0	43,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	98	96,0	70,0	4,9	12,0	2,0	33,0	25,0	34,8	43,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	99	99,7	70,0	5,3	12,0	2,0	35,0	23,7	39,4	43,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	100	99,8	70,0	5,3	12,0	2,0	34,4	22,8	39,5	43,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	101	99,8	70,0	5,4	12,0	2,0	35,4	23,2	39,9	43,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	102	132,0	70,0	4,9	12,0	3,0	34,4	20,9	30,0	46,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	103	126,5	70,0	5,0	12,0	3,0	33,6	21,0	29,4	46,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	104	122,0	70,0	5,0	12,0	3,0	34,2	20,1	30,3	46,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	105	133,0	70,0	5,1	12,0	3,0	14,0	20,8	34,8	46,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	106	135,5	70,0	4,9	12,0	3,0	34,0	20,2	34,8	46,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	107	131,5	70,0	5,1	12,0	3,0	34,0	19,7	35,2	46,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	108	144,5	70,0	4,9	12,0	3,0	34,7	19,7	40,3	46,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	109	146,5	70,0	5,3	12,0	3,0	34,1	18,7	40,7	46,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	110	137,0	70,0	5,1	12,0	3,0	34,3	20,6	39,8	46,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	111	141,0	70,0	5,3	12,0	3,0	34,5	24,1	29,5	46,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	112	141,0	70,0	5,3	12,0	3,0	34,3	22,9	29,7	46,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	113	137,5	70,0	5,3	12,0	3,0	34,2	23,8	30,2	46,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	114	224,0	90,0	7,2	20,0	2,0	46,9	41,5	45,0	41,3	21,0	37,0	10,0	1,0
11	115	206,0	90,0	7,1	20,0	2,0	46,7	41,4	44,8	41,3	21,0	37,0	10,0	1,0
11	116	206,0	90,0	7,1	20,0	2,0	47,5	40,5	44,8	41,3	21,0	37,0	10,0	1,0
11	117	243,0	90,0	7,0	20,0	2,0	46,7	41,6	54,8	41,3	21,0	37,0	10,0	1,0
11	118	230,0	90,0	7,1	20,0	2,0	46,2	40,8	55,0	41,3	21,0	37,0	10,0	1,0
11	119	230,0	90,0	7,3	20,0	2,0	46,1	41,4	55,0	41,5	21,0	37,0	10,0	1,0
11	120	242,0	90,0	7,2	20,0	2,0	45,4	41,2	65,7	41,5	21,0	37,0	10,0	1,0
11	121	240,0	90,0	7,3	20,0	2,0	45,2	40,0	66,0	41,5	21,0	37,0	8,0	1,0
11	122	240,0	90,0	7,2	20,0	2,0	45,8	39,7	65,6	41,5	21,0	37,0	8,0	1,0
11	123	285,0	90,0	7,3	20,0	3,0	46,5	30,8	65,2	41,5	21,0	37,0	8,0	1,0
11	124	294,5	90,0	7,3	20,0	3,0	46,4	30,4	64,7	41,5	21,0	37,0	8,0	1,0
11	125	202,0	100,0	8,2	20,0	2,0	50,8	31,1	45,0	45,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	126	203,0	100,0	8,2	20,0	2,0	50,2	30,9	44,8	45,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	127	204,0	100,0	8,1	20,0	2,0	49,3	29,5	45,3	45,2	21,0	37,0	8,0	1,0

11	129	217,0	100,0	8,3	20,0	2,0	50,0	32,1	55,1	45,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	129	219,0	100,0	8,2	20,0	2,0	50,0	32,0	55,5	45,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	130	220,0	100,0	8,3	20,0	2,0	49,4	30,2	54,7	45,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	131	224,0	100,0	8,3	20,0	2,0	50,2	30,2	65,4	45,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	132	227,0	100,0	8,3	20,0	2,0	49,3	31,0	64,4	45,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	133	226,0	100,0	8,3	20,0	2,0	50,0	30,5	64,8	45,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	134	260,0	100,0	8,3	20,0	2,0	50,8	39,4	45,1	45,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	135	234,0	120,0	10,5	20,0	2,0	58,3	31,8	43,2	40,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	136	244,0	120,0	10,5	20,0	2,0	58,7	32,5	43,9	40,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	137	232,0	120,0	10,6	20,0	2,0	58,4	29,8	43,6	40,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	138	252,0	120,0	10,4	20,0	2,0	58,2	31,5	53,9	40,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	139	260,0	120,0	10,4	20,0	2,0	58,6	30,5	55,3	40,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	140	250,0	120,0	10,5	20,0	2,0	58,0	29,5	55,7	40,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	141	267,0	120,0	10,4	20,0	2,0	58,2	30,4	65,0	40,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	142	267,0	120,0	10,4	20,0	2,0	58,1	31,3	64,4	40,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	143	266,0	120,0	10,2	20,0	2,0	57,0	32,0	64,5	43,0	21,0	37,0	8,0	1,0
11	144	308,0	120,0	10,1	20,0	2,0	57,9	40,3	44,8	43,0	21,0	37,0	8,0	1,0
11	145	315,0	120,0	10,5	20,0	2,0	58,3	41,0	45,1	43,0	21,0	37,0	8,0	1,0
11	146	318,0	120,0	10,6	20,0	2,0	58,7	40,9	44,5	43,0	21,0	37,0	8,0	1,0
11	147	323,0	120,0	10,3	20,0	2,0	57,2	40,8	54,7	43,0	21,0	37,0	8,0	1,0
11	148	320,0	120,0	10,3	20,0	2,0	60,0	40,0	54,2	43,0	21,0	37,0	8,0	1,0
11	149	310,0	120,0	10,2	20,0	2,0	58,6	40,2	54,0	43,0	21,0	37,0	8,0	1,0
11	150	341,0	120,0	10,4	20,0	2,0	57,3	42,0	64,4	43,0	21,0	37,0	8,0	1,0
11	151	325,0	120,0	10,0	20,0	2,0	58,0	40,2	65,5	41,7	21,0	37,0	8,0	1,0
11	152	310,0	120,0	10,2	20,0	2,0	57,7	40,0	64,6	41,7	21,0	37,0	8,0	1,0
11	153	460,0	120,0	10,4	20,0	4,0	58,0	31,8	44,0	41,7	21,0	37,0	8,0	1,0
11	154	438,0	120,0	10,5	20,0	4,0	58,0	30,8	44,1	41,7	21,0	37,0	8,0	1,0
11	155	466,0	120,0	10,3	20,0	4,0	57,8	31,0	44,5	41,7	21,0	37,0	8,0	1,0
11	156	356,0	120,0	10,2	30,0	2,0	59,5	44,3	64,4	43,3	31,0	37,0	8,0	1,0
11	157	346,0	120,0	10,1	30,0	2,0	59,5	41,9	65,0	43,3	31,0	37,0	8,0	1,0
11	158	330,0	120,0	10,0	30,0	2,0	58,7	41,9	64,7	41,2	31,0	37,0	8,0	1,0
11	159	386,0	120,0	10,1	10,0	2,0	59,5	47,3	80,1	40,5	31,0	37,0	10,0	1,0
11	160	396,0	120,0	10,1	30,0	2,0	60,5	46,5	80,1	40,5	31,0	37,0	10,0	1,0
11	161	369,0	120,0	10,2	30,0	2,0	60,3	45,5	80,2	40,5	31,0	37,0	10,0	1,0
11	162	407,0	120,0	10,2	30,0	2,0	60,4	48,8	94,8	40,5	31,0	37,0	10,0	1,0
11	163	394,0	120,0	10,2	30,0	2,0	60,5	48,0	95,0	40,5	31,0	37,0	10,0	1,0
11	164	401,0	120,0	10,2	30,0	2,0	60,5	46,1	94,7	40,5	31,0	37,0	10,0	1,0
11	165	379,0	120,0	10,5	20,0	2,0	60,4	29,5	45,7	56,9	21,0	52,0	8,0	1,0
11	166	363,0	120,0	10,4	20,0	2,0	60,0	29,0	45,8	56,9	21,0	52,0	8,0	1,0
11	167	404,0	120,0	10,4	20,0	2,0	60,8	30,0	55,3	56,9	21,0	52,0	8,0	1,0
11	168	374,0	120,0	10,4	20,0	2,0	59,2	28,4	55,4	56,9	21,0	52,0	8,0	1,0
11	169	400,0	120,0	10,5	20,0	2,0	58,9	30,3	55,0	56,9	21,0	52,0	8,0	1,0
11	170	406,0	120,0	10,3	20,0	2,0	59,3	30,0	65,3	56,9	21,0	52,0	8,0	1,0

11	171	402,0	120,0	10,4	20,0	2,0	59,1	31,4	65,0	56,9	21,0	52,0	8,0	1,0
11	172	445,0	120,0	10,4	20,0	2,0	59,2	31,2	64,7	56,9	21,0	52,0	8,0	1,0
11	173	444,0	120,0	10,3	20,0	2,0	59,6	41,0	45,1	55,5	21,0	52,0	8,0	1,0
11	174	430,0	120,0	10,4	20,0	2,0	59,7	40,3	45,4	55,5	21,0	52,0	8,0	1,0
11	175	442,0	120,0	10,3	20,0	2,0	59,3	40,4	45,2	55,5	21,0	52,0	8,0	1,0
11	176	490,0	120,0	10,4	20,0	2,0	60,0	40,0	54,9	55,5	21,0	52,0	8,0	1,0
11	177	482,0	120,0	10,4	20,0	2,0	59,2	40,0	55,2	55,5	21,0	52,0	8,0	1,0
11	178	470,0	120,0	10,5	20,0	2,0	60,0	39,8	54,9	55,5	21,0	52,0	8,0	1,0
11	179	480,0	120,0	10,4	20,0	2,0	60,0	40,6	64,8	55,5	21,0	52,0	8,0	1,0
11	180	496,0	120,0	10,4	20,0	2,0	59,2	40,0	65,2	55,5	21,0	52,0	8,0	1,0
11	181	490,0	120,0	10,5	20,0	2,0	59,4	40,1	65,3	55,5	21,0	52,0	8,0	1,0
11	192	482,0	120,0	10,3	20,0	4,0	50,5	29,5	45,2	53,4	21,0	52,0	8,0	1,0
11	183	610,0	120,0	10,4	20,0	4,0	60,3	30,6	45,5	53,4	21,0	52,0	8,0	1,0
11	184	930,0	120,0	10,5	20,0	6,0	59,3	30,8	55,2	56,0	21,0	52,0	10,0	1,0
11	185	930,0	120,0	10,4	20,0	6,0	59,4	31,6	55,1	56,0	21,0	52,0	10,0	1,0
11	186	958,0	120,0	10,4	20,0	6,0	57,6	31,4	55,3	56,0	21,0	52,0	10,0	1,0
11	187	454,0	120,0	10,4	30,0	2,0	60,3	45,5	64,8	52,1	31,0	52,0	10,0	1,0
11	188	450,0	120,0	10,4	30,0	2,0	59,8	44,7	65,3	52,1	31,0	52,0	8,0	1,0
11	189	452,0	120,0	10,5	30,0	2,0	59,7	46,0	65,1	52,1	31,0	52,0	10,0	1,0
11	190	492,0	120,0	10,5	30,0	2,0	60,0	46,5	80,2	52,1	31,0	52,0	10,0	1,0
11	191	499,0	120,0	10,5	30,0	2,0	60,2	45,5	79,8	52,1	31,0	52,0	10,0	1,0
11	192	482,0	120,0	10,4	30,0	2,0	60,0	43,7	80,4	52,1	31,0	52,0	8,0	1,0
11	193	514,0	120,0	10,5	30,0	2,0	60,2	45,1	94,6	52,1	31,0	52,0	10,0	1,0
11	194	484,0	120,0	10,4	30,0	2,0	59,8	46,9	94,5	52,1	31,0	52,0	10,0	1,0
11	195	504,0	120,0	10,4	30,0	2,0	60,8	47,0	94,7	52,1	31,0	52,0	10,0	1,0
11	196	576,0	120,0	10,5	30,0	2,0	60,0	61,3	65,6	53,6	31,0	52,0	10,0	1,0
11	197	598,0	120,0	10,5	30,0	2,0	60,9	60,8	77,8	53,6	31,0	52,0	10,0	1,0
11	198	626,0	120,0	10,4	30,0	2,0	60,7	61,4	94,6	53,6	31,0	52,0	10,0	1,0
11	199	620,0	120,0	10,4	30,0	2,0	61,1	61,5	95,0	53,6	31,0	52,0	10,0	1,0
11	200	678,0	120,0	10,4	30,0	3,0	60,1	44,9	65,7	57,0	31,0	52,0	10,0	1,0
11	201	710,0	120,0	10,4	30,0	3,0	59,8	47,0	81,0	57,0	31,0	52,0	10,0	1,0
11	202	710,0	120,0	10,4	30,0	3,0	61,4	47,0	80,6	57,0	31,0	52,0	10,0	1,0
11	203	722,0	120,0	10,5	30,0	3,0	61,5	60,5	65,4	56,1	31,0	52,0	10,0	1,0
11	204	552,0	150,0	11,2	30,0	2,0	73,9	44,3	65,5	58,6	31,0	52,0	8,0	1,0
11	205	528,0	150,0	10,4	30,0	2,0	75,1	45,9	65,8	55,1	31,0	52,0	8,0	1,0
11	206	544,0	150,0	11,1	30,0	2,0	74,5	45,7	64,9	58,6	11,0	52,0	8,0	1,0
11	207	562,0	150,0	11,0	30,0	2,0	73,9	44,1	80,4	58,6	31,0	52,0	8,0	1,0
11	208	550,0	150,0	11,2	30,0	2,0	74,5	45,2	79,8	55,1	31,0	52,0	8,0	1,0
11	209	560,0	150,0	11,2	30,0	2,0	74,5	45,8	80,0	58,6	31,0	52,0	8,0	1,0
11	210	670,0	150,0	11,2	30,0	2,0	74,5	45,3	96,2	59,3	31,0	52,0	8,0	1,0
11	211	635,0	150,0	10,0	30,0	2,0	75,0	44,5	96,4	59,3	31,0	52,0	8,0	1,0
11	212	680,0	150,0	11,2	30,0	2,0	73,9	45,2	95,2	59,3	31,0	52,0	8,0	1,0
11	213	643,0	150,0	10,1	30,0	2,0	74,5	58,5	65,5	59,3	31,0	52,0	8,0	1,0
11	214	622,0	150,0	10,0	30,0	2,0	74,4	59,8	66,1	59,3	31,0	52,0	8,0	1,0

11	215	633,0	150,0	10,1	30,0	2,0	74,8	59,5	65,4	59,3	31,0	52,0	3,0	1,0
11	216	678,0	150,0	10,0	30,0	2,0	74,5	59,2	80,6	59,3	31,0	52,0	8,0	1,0
11	217	700,0	150,0	10,0	30,0	2,0	74,5	59,9	80,6	59,3	31,0	52,0	8,0	1,0
11	218	708,0	150,0	10,0	30,0	2,0	75,1	60,2	80,4	59,3	31,0	52,0	8,0	1,0
11	219	760,0	150,0	10,0	30,0	2,0	74,7	61,5	96,0	60,5	31,0	52,0	8,0	1,0
11	220	765,0	150,0	10,4	30,0	2,0	76,3	60,2	95,4	60,5	31,0	52,0	8,0	1,0
11	221	705,0	150,0	10,4	30,0	2,0	75,3	60,3	95,0	60,5	31,0	52,0	8,0	1,0
11	222	756,0	150,0	10,3	30,0	3,0	75,4	45,3	65,0	60,5	31,0	52,0	8,0	1,0
11	223	670,0	150,0	10,4	30,0	1,0	75,9	45,1	65,0	60,5	31,0	52,0	8,0	1,0
11	224	862,0	150,0	10,3	30,0	1,0	75,7	44,1	80,8	60,5	31,0	52,0	8,0	1,0
11	225	832,0	150,0	10,4	30,0	3,0	76,2	44,9	80,5	60,5	31,0	52,0	8,0	1,0
11	226	850,0	150,0	10,3	30,0	3,0	75,7	44,7	80,4	60,5	31,0	52,0	8,0	1,0
11	227	978,0	150,0	11,3	30,0	3,0	76,1	44,5	95,3	58,2	31,0	52,0	8,0	1,0
11	228	980,0	150,0	10,3	30,0	3,0	76,2	44,8	95,0	58,2	31,0	52,0	8,0	1,0
11	229	970,0	150,0	10,8	30,0	3,0	75,1	61,1	80,1	58,2	31,0	52,0	8,0	1,0
11	230	930,0	150,0	10,7	30,0	4,0	74,5	46,1	65,1	61,9	31,0	52,0	10,0	1,0
11	231	915,0	150,0	10,7	30,0	4,0	74,8	44,8	65,2	61,9	31,0	52,0	10,0	1,0
11	232	742,0	150,0	14,8	30,0	2,0	73,3	45,2	65,2	55,7	31,0	52,0	8,0	1,0
11	233	1110,0	150,0	14,8	30,0	3,0	73,1	45,0	64,5	55,7	31,0	52,0	8,0	1,0
11	234	1403,0	10,0	14,9	30,0	4,0	73,3	45,8	64,9	55,7	31,0	52,0	10,0	1,0
11	235	1587,0	150,0	14,9	30,0	4,0	73,6	46,4	80,1	55,7	31,0	52,0	10,0	1,0
11	236	827,0	150,0	14,8	30,0	2,0	72,5	46,0	80,0	55,7	31,0	52,0	8,0	1,0
11	237	882,0	150,0	15,0	30,0	2,0	74,5	44,8	95,0	55,7	31,0	52,0	8,0	1,0
11	236	1425,0	150,0	15,5	30,0	3,0	72,9	45,7	95,2	55,7	31,0	52,0	8,0	1,0
11	239	960,0	150,0	15,4	30,0	2,0	74,9	45,7	95,0	55,7	31,0	52,0	8,0	1,0
11	240	932,0	150,0	15,4	30,0	2,0	75,1	58,3	64,7	54,8	31,0	52,0	8,0	1,0
11	241	930,0	150,0	15,4	30,0	2,0	75,2	60,3	65,6	54,8	31,0	52,0	8,0	1,0
11	242	957,0	150,0	15,3	30,0	2,0	75,1	60,1	65,4	54,8	31,0	52,0	8,0	1,0
11	243	1045,0	150,0	15,0	30,0	2,0	74,5	61,5	80,0	55,3	31,0	52,0	8,0	1,0
11	244	1018,0	150,0	15,5	30,0	2,0	73,5	60,7	79,6	55,3	31,0	52,0	8,0	1,0
11	245	1052,5	150,0	15,2	30,0	2,0	75,8	61,3	95,0	55,3	31,0	52,0	8,0	1,0
11	246	1160,0	150,0	15,1	30,0	3,0	74,7	45,9	65,8	55,3	31,0	52,0	8,0	1,0
11	247	1146,0	150,0	15,1	30,0	3,0	74,7	45,3	65,9	55,3	31,0	52,0	8,0	1,0
11	248	1151,0	150,0	15,2	30,0	3,0	74,9	44,8	65,4	55,3	31,0	52,0	8,0	1,0
11	249	1270,0	150,0	14,9	30,0	3,0	74,7	44,5	80,3	55,3	31,0	52,0	8,0	1,0
11	250	1294,0	150,0	15,0	30,0	3,0	74,7	44,7	80,1	55,4	31,0	52,0	8,0	1,0
11	251	1260,0	150,0	15,0	30,0	3,0	73,9	45,1	80,0	55,4	31,0	52,0	8,0	1,0
11	252	1450,0	150,0	15,0	30,0	3,0	74,2	44,6	94,9	55,4	31,0	52,0	8,0	1,0
11	253	1435,0	150,0	15,0	30,0	3,0	74,0	45,8	95,1	55,4	31,0	52,0	8,0	1,0
11	254	1375,0	150,0	15,0	30,0	3,0	73,7	45,1	95,5	55,4	31,0	52,0	8,0	1,0
11	255	1260,0	150,0	15,2	30,0	3,0	73,9	60,0	64,8	55,4	31,0	52,0	8,0	1,0
11	256	1222,0	150,0	15,2	30,0	3,0	73,5	60,5	64,9	55,4	31,0	52,0	8,0	1,0
11	257	1215,0	150,0	15,0	30,0	3,0	76,0	61,1	65,0	55,4	31,0	52,0	8,0	1,0
11	258	1393,0	150,0	15,4	30,0	3,0	74,7	61,1	79,6	55,3	31,0	52,0	8,0	1,0

11	259	1440,0	150,0	15,3	30,0	3,0	75,1	60,3	79,9	55,3	31,0	52,0	8,0	1,0
11	260	1420,0	150,0	15,4	30,0	3,0	74,2	61,3	80,3	55,3	31,0	52,0	8,0	1,0
11	261	1535,0	150,0	15,6	30,0	3,0	74,4	59,9	95,0	54,9	31,0	52,0	8,0	1,0
11	262	1445,0	150,0	15,3	30,0	4,0	76,8	45,1	65,0	54,9	31,0	52,0	10,0	1,0
11	263	1445,0	150,0	15,7	30,0	4,0	74,5	45,9	64,9	54,9	31,0	52,0	10,0	1,0
11	264	1460,0	150,0	15,5	30,0	4,0	74,5	45,3	65,0	54,9	31,0	52,0	10,0	1,0
11	265	1665,0	150,0	15,7	30,0	4,0	75,5	45,1	80,0	54,9	31,0	52,0	10,0	1,0
11	266	1630,0	150,0	15,6	30,0	4,0	73,9	45,1	80,2	54,9	31,0	52,0	10,0	1,0
11	267	1604,0	150,0	15,6	30,0	4,0	75,0	46,5	80,7	54,9	31,0	52,0	10,0	1,0
11	268	1514,0	150,0	15,0	30,0	4,0	74,2	59,8	65,0	56,2	31,0	52,0	10,0	1,0
11	269	1696,0	150,0	14,9	30,0	4,0	74,1	59,7	79,7	56,2	31,0	52,0	10,0	1,0
11	270	31,0	50,0	3,3	12,0	1,0	16,8	23,6	0,0	43,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	271	31,5	50,0	3,3	12,0	1,0	16,8	23,9	0,0	43,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	272	30,7	50,0	3,3	12,0	1,0	16,8	23,3	0,0	42,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	273	55,5	60,0	5,0	16,0	1,0	20,0	27,8	0,0	42,3	17,0	37,0	10,0	1,0
11	274	55,5	60,0	5,1	16,0	1,0	20,2	26,8	0,0	42,3	17,0	37,0	8,0	1,0
11	275	55,5	60,0	5,0	16,0	1,0	20,4	27,1	0,0	41,7	17,0	37,0	8,0	1,0
11	276	110,0	90,0	7,3	24,0	1,0	27,1	40,6	0,0	37,8	25,0	37,0	10,0	1,0
11	277	112,0	90,0	7,3	24,0	1,0	27,5	40,3	0,0	37,8	25,0	37,0	10,0	1,0
11	278	76,0	70,0	5,5	18,0	1,0	24,6	30,7	0,0	45,0	19,0	37,0	8,0	1,0
11	279	111,0	90,0	6,3	20,0	1,0	28,2	38,4	0,0	47,3	21,0	37,0	8,0	1,0
11	280	105,0	90,0	6,3	20,0	1,0	28,0	40,5	0,0	47,3	21,0	37,0	10,0	1,0
11	281	111,0	90,0	6,3	20,0	1,0	28,3	39,9	0,0	47,3	21,0	37,0	8,0	1,0
11	282	167,0	100,0	8,1	24,0	1,0	32,2	44,7	0,0	47,7	25,0	37,0	10,0	1,0
11	283	171,0	100,0	8,2	24,0	1,0	32,3	44,3	0,0	47,7	25,0	37,0	8,0	1,0
11	284	35,3	40,0	3,3	12,0	2,0	15,7	19,8	29,8	42,2	13,0	37,0	10,0	1,0
11	285	33,0	40,0	3,3	12,0	2,0	15,6	19,7	30,2	42,2	13,0	37,0	10,0	1,0
11	286	32,4	40,0	3,3	12,0	2,0	15,2	20,9	29,8	42,2	13,0	37,0	10,0	1,0
11	287	33,0	40,0	3,2	12,0	2,0	14,8	19,8	35,2	42,2	13,0	37,0	10,0	1,0
11	288	33,7	40,0	3,4	12,0	2,0	15,2	20,2	35,2	42,2	13,0	37,0	10,0	1,0
11	289	36,4	40,0	3,3	12,0	2,0	15,3	20,6	34,8	42,2	13,0	37,0	10,0	1,0
11	290	39,5	40,0	3,4	12,0	2,0	15,3	21,3	40,0	42,2	13,0	37,0	10,0	1,0
11	291	35,8	40,0	3,4	12,0	2,0	15,2	20,9	39,9	42,2	11,0	37,0	10,0	1,0
11	292	36,0	40,0	3,3	12,0	2,0	15,5	19,6	40,2	42,2	13,0	37,0	10,0	1,0
11	293	14,5	40,0	1,4	12,0	2,0	15,3	24,2	30,5	42,2	13,0	37,0	10,0	1,0
11	294	32,6	40,0	3,4	12,0	2,0	15,0	24,2	30,4	42,2	13,0	37,0	10,0	1,0
11	295	12,0	40,0	1,4	12,0	2,0	15,1	24,7	35,5	42,2	13,0	37,0	10,0	1,0
11	296	32,9	40,0	3,5	12,0	2,0	15,3	24,6	35,9	42,2	13,0	37,0	10,0	1,0
11	297	36,6	40,0	3,4	12,0	2,0	15,4	24,8	40,9	42,2	13,0	37,0	10,0	1,0
11	298	36,5	40,0	3,6	12,0	2,0	15,4	23,9	40,5	42,2	13,0	37,0	10,0	1,0
11	299	38,0	40,0	3,5	12,0	2,0	15,4	24,9	41,2	42,2	13,0	37,0	10,0	1,0
11	300	138,5	70,0	5,2	20,0	2,0	35,9	30,6	45,4	44,9	21,0	37,0	10,0	1,0
11	301	118,0	70,0	5,3	20,0	2,0	34,3	29,7	45,5	44,9	21,0	37,0	10,0	1,0
11	302	138,0	70,0	5,2	20,0	2,0	34,1	30,3	44,6	44,9	21,0	37,0	10,0	1,0
11	303	146,0	70,0	5,5	20,0	2,0	33,8	30,0	55,1	44,9	21,0	37,0	10,0	1,0

11	304	149,5	70,0	5,4	20,0	2,0	33,3	10,6	55,0	44,9	21,0	37,0	10,0	1,0
11	305	139,0	70,0	5,2	20,0	2,0	34,8	40,4	44,6	44,9	21,0	37,0	10,0	1,0
11	306	142,0	70,0	5,1	20,0	2,0	34,7	41,9	45,3	44,9	21,0	37,0	10,0	1,0
11	307	141,0	70,0	5,1	20,0	2,0	34,6	40,4	45,6	44,9	21,0	37,0	10,0	1,0
11	308	142,0	70,0	5,2	20,0	2,0	34,5	40,0	55,2	44,9	21,0	37,0	10,0	1,0
11	309	143,5	70,0	5,2	20,0	2,0	35,2	40,8	54,6	44,9	21,0	37,0	10,0	1,0
11	310	143,5	70,0	5,2	20,0	2,0	34,5	40,7	55,6	44,9	21,0	37,0	10,0	1,0
11	311	154,0	70,0	5,3	20,0	2,0	34,9	39,4	65,0	44,9	21,0	37,0	10,0	1,0
11	312	155,0	70,0	5,0	20,0	2,0	35,2	39,5	65,6	44,9	21,0	37,0	10,0	1,0
11	313	258,0	90,0	7,2	20,0	3,0	46,2	41,2	45,2	40,6	21,0	37,0	8,0	1,0
11	314	256,0	90,0	7,3	20,0	3,0	45,7	40,1	45,8	40,6	21,0	37,0	8,0	1,0
11	315	257,0	90,0	7,2	20,0	3,0	46,5	19,9	55,0	40,6	21,0	37,0	8,0	1,0
11	316	261,0	90,0	7,1	20,0	3,0	46,3	39,0	65,5	40,6	21,0	37,0	10,0	1,0
11	317	295,0	100,0	7,7	20,0	4,0	49,0	30,4	45,1	36,8	21,0	37,0	10,0	1,0
11	318	299,0	100,0	7,9	20,0	4,0	49,4	29,0	45,4	36,8	21,0	37,0	10,0	1,0
11	319	87,0	60,0	4,2	12,0	2,0	29,2	24,3	40,3	41,6	13,0	37,0	8,0	1,0
11	320	111,0	60,0	4,1	12,0	3,0	29,5	25,0	34,8	40,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	321	114,0	60,0	4,1	12,0	3,0	28,9	24,0	40,4	40,7	13,0	37,0	8,0	1,0
11	322	141,0	70,0	4,9	12,0	3,0	34,0	25,0	34,4	46,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	323	146,0	70,0	5,2	12,0	3,0	34,4	24,8	34,9	46,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	324	138,5	70,0	5,1	12,0	3,0	33,7	24,7	34,9	46,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	325	149,5	70,0	5,1	12,0	3,0	34,0	23,1	39,8	46,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	126	147,0	70,0	4,9	12,0	3,0	34,4	24,0	41,4	46,4	11,0	37,0	8,0	1,0
11	327	151,0	70,0	5,1	12,0	3,0	33,7	24,2	40,7	46,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	328	173,0	70,0	5,1	12,0	4,0	34,8	19,7	30,3	46,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	329	178,0	70,0	5,3	12,0	4,0	35,4	21,0	30,4	46,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	330	173,5	70,0	5,2	12,0	4,0	35,5	20,1	30,4	46,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	331	185,0	70,0	5,1	12,0	4,0	35,1	20,9	35,3	46,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	332	189,0	70,0	5,1	12,0	4,0	35,3	19,9	34,9	46,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	333	182,5	70,0	5,2	12,0	4,0	35,2	20,6	35,3	46,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	334	177,0	70,0	5,1	12,0	4,0	34,8	20,8	40,3	46,4	13,0	37,0	10,0	1,0
11	335	181,0	70,0	5,1	12,0	4,0	34,9	21,0	40,1	46,4	13,0	37,0	10,0	1,0
11	336	186,0	70,0	5,2	12,0	4,0	35,5	20,1	40,1	46,4	13,0	37,0	10,0	1,0
11	337	166,5	70,0	5,3	12,0	4,0	35,6	24,9	30,3	46,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	338	163,0	70,0	5,3	12,0	4,0	35,6	25,1	30,2	46,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	139	173,0	70,0	5,2	12,0	4,0	35,4	25,0	30,2	46,4	13,0	37,0	9,0	1,0
11	340	179,0	70,0	5,3	12,0	4,0	35,6	24,4	35,2	46,4	13,0	37,0	8,0	1,0
11	341	175,0	70,0	5,2	12,0	4,0	34,0	25,5	35,1	46,4	13,0	37,0	10,0	1,0
11	342	181,0	70,0	5,3	12,0	4,0	35,5	25,5	35,0	46,4	13,0	37,0	10,0	1,0
11	343	182,0	70,0	5,2	12,0	4,0	35,2	25,5	40,2	46,4	13,0	37,0	10,0	1,0
11	344	186,0	70,0	5,3	12,0	4,0	35,2	23,6	40,4	46,4	13,0	37,0	10,0	1,0
11	345	184,0	70,0	5,3	12,0	4,0	35,3	24,1	40,2	46,4	13,0	37,0	10,0	1,0
11	346	271,0	90,0	7,2	20,0	3,0	46,7	41,1	45,3	40,6	21,0	37,0	3,0	1,0

11	347	289,0	90,0	7,1	20,0	3,0	46,7	39,7	54,7	40,6	21,0	37,0	8,0	1,0
11	348	281,0	90,0	7,1	20,0	3,0	46,6	40,4	55,2	40,6	21,0	37,0	9,0	1,0
11	349	300,0	90,0	7,2	20,0	3,0	45,9	41,0	65,4	40,6	21,0	37,0	10,0	1,0
11	350	101,0	90,0	7,2	20,0	1,0	46,7	41,4	64,8	40,6	21,0	37,0	10,0	1,0
11	351	261,0	100,0	8,3	20,0	2,0	49,0	39,1	45,0	45,4	21,0	37,0	8,0	1,0
11	352	261,0	100,0	8,1	20,0	2,0	48,3	40,2	54,5	45,4	21,0	37,0	8,0	1,0
11	353	261,0	100,0	8,1	20,0	2,0	48,8	39,7	55,3	45,4	21,0	37,0	8,0	1,0
11	354	262,0	100,0	8,1	20,0	2,0	46,0	39,8	55,4	45,4	21,0	37,0	8,0	1,0
11	355	270,0	100,0	8,1	20,0	2,0	48,5	40,4	64,9	45,4	21,0	37,0	8,0	1,0
11	356	271,0	100,0	8,1	20,0	2,0	48,2	40,2	65,5	45,4	21,0	37,0	8,0	1,0
11	357	277,0	100,0	8,3	20,0	2,0	48,5	19,8	65,0	45,4	21,0	37,0	8,0	1,0
11	358	344,0	100,0	8,1	20,0	3,0	48,7	31,0	54,8	45,4	21,0	37,0	8,0	1,0
11	359	364,0	100,0	8,2	20,0	3,0	50,1	31,6	55,1	44,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	360	347,0	100,0	8,2	20,0	3,0	50,1	30,7	55,6	44,2	21,0	37,0	9,0	1,0
11	361	359,0	100,0	8,2	20,0	3,0	50,6	31,4	64,9	44,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	362	345,0	100,0	8,4	20,0	3,0	50,6	41,0	44,8	44,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	363	343,0	100,0	8,2	20,0	3,0	50,4	41,4	45,5	44,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	364	346,0	100,0	8,2	20,0	3,0	51,2	40,8	45,1	44,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	365	348,0	100,0	8,2	20,0	3,0	50,3	41,4	54,9	44,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	366	345,0	100,0	8,2	20,0	3,0	50,0	41,8	55,6	44,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	367	349,0	100,0	8,3	20,0	3,0	50,0	40,6	55,6	44,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	368	329,0	100,0	7,9	20,0	3,0	48,5	40,4	65,1	36,8	21,0	37,0	8,0	1,0
11	369	310,0	100,0	7,9	20,0	3,0	49,0	38,9	65,2	36,8	21,0	37,0	8,0	1,0
11	370	310,0	100,0	7,8	20,0	3,0	48,9	39,6	65,1	36,8	21,0	37,0	8,0	1,0
11	371	350,0	100,0	7,9	20,0	4,0	49,4	31,1	55,0	36,8	21,0	37,0	10,0	1,0
11	372	314,0	100,0	7,9	20,0	4,0	49,2	30,3	55,1	36,8	21,0	37,0	10,0	1,0
11	373	321,0	100,0	7,8	20,0	4,0	48,8	29,9	55,1	36,8	21,0	37,0	10,0	1,0
11	374	335,0	100,0	7,9	20,0	4,0	49,4	29,5	65,3	36,8	21,0	37,0	10,0	1,0
11	375	324,0	100,0	7,9	20,0	4,0	48,8	29,7	65,1	36,8	21,0	37,0	10,0	1,0
11	376	338,0	100,0	8,0	20,0	4,0	48,5	29,9	65,4	37,5	21,0	37,0	10,0	1,0
11	377	300,0	100,0	7,9	20,0	4,0	50,6	19,0	44,8	37,5	21,0	37,0	10,0	1,0
11	378	307,0	100,0	7,9	20,0	4,0	50,4	40,0	44,9	37,5	21,0	37,0	10,0	1,0
11	379	312,0	100,0	7,9	20,0	4,0	50,9	30,5	44,9	37,5	21,0	37,0	10,0	1,0
11	380	326,0	100,0	8,1	20,0	4,0	50,3	40,4	54,8	37,5	21,0	37,0	10,0	1,0
11	381	318,0	100,0	8,1	20,0	4,0	50,0	40,2	54,9	37,5	21,0	37,0	10,0	1,0
11	382	320,0	100,0	8,1	20,0	4,0	49,5	40,8	55,1	37,5	21,0	37,0	10,0	1,0
11	383	334,0	100,0	8,0	20,0	4,0	50,5	41,0	65,1	37,5	21,0	37,0	10,0	1,0
11	384	322,0	100,0	8,0	20,0	4,0	49,7	40,8	64,9	37,5	21,0	37,0	10,0	1,0
11	385	337,0	100,0	8,1	20,0	4,0	50,5	40,5	64,5	37,5	21,0	37,0	10,0	1,0
11	386	524,0	120,0	10,5	20,0	4,0	57,5	31,0	54,6	41,7	21,0	37,0	8,0	1,0
11	387	484,0	120,0	10,3	20,0	4,0	57,8	31,2	54,9	41,7	21,0	37,0	8,0	1,0
11	388	499,0	120,0	10,5	20,0	4,0	57,6	32,9	54,6	41,7	21,0	37,0	8,0	1,0
11	389	558,0	120,0	10,5	20,0	4,0	59,2	29,5	64,9	41,2	21,0	37,0	8,0	1,0
11	510	990,0	150,0	11,2	30,0	3,0	74,4	44,4	95,8	58,2	31,0	52,0	8,0	1,0

11	511	962,0	150,0	11,3	10,0	3,0	76,8	60,1	80,4	58,2	31,0	52,0	8,0	1,0
11	512	960,0	150,0	11,2	10,0	3,0	77,0	60,4	80,1	58,2	31,0	52,0	8,0	1,0
11	513	1000,0	150,0	10,8	30,0	3,0	74,6	58,8	95,6	61,9	31,0	52,0	8,0	1,0
11	514	1020,0	150,0	10,8	30,0	3,0	73,8	60,4	95,4	61,9	31,0	52,0	8,0	1,0
11	515	1050,0	150,0	10,7	10,0	3,0	74,8	58,7	95,4	61,9	31,0	52,0	8,0	1,0
11	516	985,0	150,0	9,9	10,0	4,0	75,2	44,9	80,4	61,9	31,0	52,0	10,0	1,0
11	517	968,0	150,0	9,9	10,0	4,0	75,9	44,8	80,4	61,9	31,0	52,0	10,0	1,0
11	518	972,0	150,0	10,8	30,0	4,0	75,3	44,1	78,4	61,9	31,0	52,0	10,0	1,0
11	519	1050,0	150,0	9,8	30,0	4,0	75,8	45,7	95,3	58,5	31,0	52,0	10,0	1,0
11	520	920,0	150,0	10,0	30,0	4,0	76,0	60,5	65,1	58,5	31,0	52,0	10,0	1,0
11	521	904,0	150,0	10,0	30,0	4,0	74,7	60,5	65,0	58,5	31,0	52,0	10,0	1,0
11	522	890,0	150,0	10,0	30,0	4,0	75,3	60,1	65,2	58,5	31,0	52,0	10,0	1,0
11	523	1030,0	150,0	11,0	30,0	4,0	73,5	60,8	80,1	59,3	11,0	52,0	10,0	1,0
11	524	1070,0	150,0	11,1	30,0	4,0	74,2	60,1	80,0	59,3	31,0	52,0	10,0	1,0
11	525	1560,0	150,0	15,3	30,0	3,0	74,5	61,6	94,9	54,9	31,0	52,0	8,0	1,0
11	526	1555,0	150,0	15,1	30,0	3,0	74,5	61,8	95,3	54,9	31,0	52,0	8,0	1,0
11	527	1735,0	150,0	15,0	30,0	4,0	78,0	46,5	94,9	56,2	31,0	52,0	10,0	1,0
11	528	1708,0	150,0	15,0	30,0	4,0	74,5	60,5	81,1	56,2	31,0	52,0	10,0	1,0

## 12.3 Anhang 3

Experimentelle Versuchsergebnisse aufbereitet aus BGD „Report Cigre 12“ [25].

Rep	No.	Pu	b	t	d	n	e2	e1	p	R	d1	St	V	C
12	116	26,5	40,0	3,3	12,7	1,0	17,9	17,1	0,0	44,6	14,1	43,0	8,0	1,0
12	117	26,7	40,0	3,3	12,7	1,0	18,0	17,2	0,0	44,6	14,1	43,0	8,0	1,0
12	118	26,4	40,0	3,3	12,7	1,0	18,2	17,4	0,0	44,6	14,1	43,0	8,0	1,0
12	119	25,9	40,0	3,3	12,7	1,0	17,6	19,0	0,0	44,6	14,2	43,0	8,0	1,0
12	120	29,1	40,0	3,3	12,7	1,0	17,7	19,3	0,0	44,5	14,1	43,0	8,0	1,0
12	121	29,4	40,0	3,3	12,7	1,0	17,8	19,2	0,0	44,6	14,0	43,0	8,0	1,0
12	122	69,5	50,0	5,2	15,9	1,0	25,0	36,8	0,0	38,3	16,9	37,0	8,0	1,0
12	123	68,1	50,0	5,2	15,9	1,0	23,4	32,7	0,0	38,3	17,1	37,0	8,0	1,0
12	124	69,0	50,0	5,2	15,9	1,0	23,6	32,5	0,0	38,1	17,0	37,0	8,0	1,0
12	125	78,0	55,0	5,3	15,9	1,0	26,2	35,1	0,0	44,5	17,0	43,0	8,0	1,0
12	126	51,7	55,0	5,0	15,8	1,0	25,0	35,4	0,0	44,5	17,2	43,0	8,0	1,0
12	127	76,7	55,0	5,4	16,0	1,0	25,5	34,9	0,0	44,5	17,2	43,0	8,0	1,0
12	128	64,9	55,0	5,0	15,9	1,0	25,4	27,3	0,0	44,0	17,3	43,0	8,0	1,0
12	129	67,7	55,0	5,1	15,9	1,0	24,8	27,9	0,0	44,0	17,2	43,0	8,0	1,0
12	130	69,7	55,0	5,0	15,9	1,0	25,0	27,9	0,0	44,0	17,3	43,0	8,0	1,0
12	131	66,5	55,0	5,1	15,8	1,0	25,0	27,7	0,0	44,0	17,2	43,0	8,0	1,0
12	132	33,6	40,0	3,3	12,8	1,0	17,8	25,2	0,0	44,6	14,1	43,0	8,0	1,0
12	133	34,8	40,0	3,3	12,8	1,0	18,1	25,0	0,0	44,6	14,2	43,0	8,0	1,0
12	134	32,5	40,0	3,3	12,7	1,0	17,2	25,3	0,0	44,6	14,1	43,0	10,0	1,0
12	135	61,5	50,0	4,9	15,9	1,0	23,7	33,1	0,0	38,3	17,1	37,0	8,0	1,0
12	136	67,9	50,0	5,4	15,9	1,0	24,9	36,6	0,0	38,3	17,2	37,0	8,0	1,0
12	137	70,3	50,0	5,2	15,9	1,0	24,4	36,5	0,0	38,3	16,8	37,0	8,0	1,0
12	138	62,0	50,0	5,0	16,0	1,0	22,4	34,1	0,0	38,3	17,0	37,0	10,0	1,0
12	139	70,4	50,0	5,2	15,9	1,0	23,4	35,5	0,0	38,3	17,1	37,0	10,0	1,0
12	140	67,7	50,0	5,2	15,9	1,0	23,2	34,9	0,0	38,3	17,3	37,0	10,0	1,0
12	141	71,0	50,0	5,3	15,9	1,0	24,4	37,3	0,0	38,3	16,4	37,0	10,0	1,0
12	142	78,8	55,0	5,0	15,9	1,0	24,8	34,4	0,0	44,5	17,3	43,0	8,0	1,0
12	143	79,0	55,0	5,0	15,9	1,0	24,7	35,4	0,0	44,5	17,2	43,0	8,0	1,0
12	144	76,2	55,0	5,0	16,0	1,0	24,7	34,9	0,0	44,5	17,2	43,0	8,0	1,0
12	145	81,1	55,0	5,0	15,8	1,0	24,6	35,8	0,0	44,5	17,0	43,0	8,0	1,0
12	146	80,4	55,0	5,0	15,9	1,0	24,5	36,0	0,0	44,5	17,0	43,0	8,0	1,0
12	147	77,0	55,0	5,0	15,9	1,0	24,1	35,7	0,0	44,5	17,3	43,0	8,0	1,0
12	148	80,8	55,0	5,0	15,9	1,0	24,7	38,1	0,0	44,5	17,3	43,0	10,0	1,0
12	65	43,2	60,0	5,0	16,0	1,0	30,0	14,5	0,0	54,7	17,5	52,0	8,0	1,0
12	66	37,3	60,0	5,0	16,0	1,0	30,0	14,5	0,0	54,7	17,5	52,0	8,0	1,0
12	67	65,7	60,0	5,0	16,0	1,0	30,0	21,0	0,0	54,7	17,5	52,0	8,0	1,0
12	68	64,3	60,0	5,0	16,0	1,0	30,0	21,0	0,0	54,7	17,5	52,0	8,0	1,0
12	69	77,8	60,0	5,0	16,0	1,0	30,0	27,0	0,0	54,7	17,5	52,0	8,0	1,0
12	70	126,1	60,0	5,0	20,0	1,0	30,0	43,0	0,0	54,7	21,0	52,0	8,0	1,0
12	71	128,8	60,0	5,0	20,0	1,0	30,0	42,0	0,0	54,7	21,0	52,0	8,0	1,0
12	72	115,8	70,0	5,0	16,0	1,0	35,0	44,0	0,0	52,3	16,0	52,0	8,0	1,0
12	73	125,1	70,0	5,0	16,0	1,0	35,0	44,0	0,0	52,3	16,0	52,0	8,0	1,0

## 12.4 Anhang 4

Experimentelle Versuchsergebnisse aufbereitet aus BGD „Report Braunschweig 23“ [25].

Rep	No.	Pu	b	t	d	n	e2	e1	p	R	d1	St	V	C
23	1	46,9	35,6	9,9	20,0	1,0	17,8	60,4	0,0	34,8	22,6	37,0	9,0	4,0
23	2	62,9	39,7	9,9	20,0	1,0	19,1	60,5	0,0	34,8	22,4	37,0	9,0	4,0
23	3	76,4	44,1	9,0	20,0	1,0	22,1	60,9	0,0	34,8	22,6	17,0	9,0	4,0
23	4	90,4	47,6	9,8	20,0	1,0	23,8	60,6	0,0	34,8	22,3	37,0	9,0	4,0
23	5	104,3	51,6	9,8	20,0	1,0	25,8	60,8	0,0	34,8	22,4	17,0	9,0	4,0
23	8	114,9	55,2	9,8	20,0	1,0	27,6	60,8	0,0	34,8	22,6	37,0	9,0	4,0
23	7	131,2	60,0	9,9	20,0	1,0	30,0	60,4	0,0	34,8	22,2	37,0	9,0	4,0
23	8	164,0	69,8	9,9	20,0	1,0	34,9	50,4	0,0	34,8	22,5	37,0	9,0	4,0
23	9	200,1	80,7	9,9	20,0	1,0	40,4	60,7	0,0	34,8	22,5	37,0	9,0	4,0
23	10	209,5	100,2	9,9	20,0	1,0	50,1	60,7	0,0	34,8	22,5	37,0	6,0	4,0
23	11	201,9	120,9	9,9	20,0	1,0	60,5	62,2	0,0	34,8	22,6	37,0	6,0	4,0
23	12	61,7	122,6	9,8	20,0	1,0	61,3	18,0	0,0	34,8	22,1	37,0	6,0	4,0
23	13	60,4	120,0	9,8	20,0	1,0	60,5	17,7	0,0	34,8	22,1	37,0	6,0	4,0
23	14	71,5	121,2	9,9	20,0	1,0	60,6	20,1	0,0	34,8	22,0	37,0	6,0	4,0
23	15	70,6	121,3	9,9	20,0	1,0	60,7	19,9	0,0	34,8	22,1	37,0	6,0	4,0
23	16	78,3	121,4	9,9	20,0	1,0	60,7	21,7	0,0	34,8	22,1	37,0	6,0	4,0
23	17	78,5	121,3	9,9	20,0	1,0	60,7	21,7	0,0	34,8	22,0	37,0	6,0	4,0
23	18	88,6	122,7	9,8	20,0	1,0	61,4	24,2	0,0	34,8	22,3	37,0	6,0	4,0
23	19	88,3	121,3	9,8	20,0	1,0	60,7	24,1	0,0	34,8	22,4	37,0	6,0	4,0
23	20	94,7	121,1	9,8	20,0	1,0	50,6	25,9	0,0	34,8	22,4	37,0	6,0	4,0
23	21	55,0	121,0	9,8	20,0	1,0	60,5	26,2	0,0	34,8	22,3	37,0	6,0	4,0
23	22	116,2	121,4	9,7	20,0	1,0	60,7	30,2	0,0	34,8	22,4	37,0	6,0	4,0
23	23	117,4	121,5	9,8	20,0	1,0	60,8	30,3	0,0	34,8	22,4	37,0	6,0	4,0
23	24	135,9	122,3	10,0	20,0	1,0	61,2	35,8	0,0	34,8	22,3	37,0	6,0	4,0
23	25	134,5	121,5	9,8	20,0	1,0	60,8	34,8	0,0	34,8	22,7	37,0	6,0	4,0
23	26	150,1	120,8	9,8	20,0	1,0	60,4	40,4	0,0	34,8	22,5	17,0	6,0	4,0
23	27	150,1	122,4	9,8	20,0	1,0	61,2	39,1	0,0	34,8	22,3	37,0	6,0	4,0
23	28	181,5	121,1	9,8	20,0	1,0	60,6	50,1	0,0	34,8	22,3	37,0	6,0	4,0
23	29	182,1	121,4	B.8	20,0	1,0	60,7	50,3	0,0	34,8	22,4	37,0	6,0	4,0
23	31	259,9	70,5	10,3	20,0	1,0	35,3	80,0	0,0	43,3	22,0	37,0	9,0	4,0
23	32	218,5	70,5	10,3	20,0	1,0	35,3	80,0	0,0	43,3	22,0	37,0	9,0	4,0
23	33	84,5	87,7	10,4	20,0	1,0	43,9	19,8	0,0	43,3	22,0	37,0	6,0	4,0
23	34	134,3	88,1	10,3	20,0	1,0	44,1	30,0	0,0	43,3	22,0	37,0	6,0	4,0
23	35	173,8	88,0	10,3	20,0	1,0	44,0	40,0	0,0	43,3	22,0	37,0	6,0	4,0
23	36	219,6	88,0	10,3	20,0	1,0	44,0	50,1	0,0	43,3	22,0	37,0	6,0	4,0
23	37	248,0	88,1	10,3	20,0	1,0	44,1	56,7	0,0	43,3	22,0	37,0	6,0	4,0
23	38	117,9	47,4	10,4	20,0	1,0	23,7	40,0	0,0	43,3	22,0	37,0	9,0	4,0
23	39	172,3	59,6	10,3	20,0	1,0	29,8	40,0	0,0	43,3	22,0	37,0	9,0	4,0
23	40	174,3	75,2	10,3	20,0	1,0	37,6	40,0	0,0	43,3	22,0	37,0	6,0	4,0

23	41	89,3	104,2	10,3	20,0	1,0	52,2	19,9	0,0	43,3	22,2	37,0	6,0	4,0
23	42	143,2	104,2	10,4	20,0	1,0	52,1	30,8	0,0	43,3	22,1	37,0	6,0	4,0
23	43	180,1	103,4	10,3	20,0	1,0	51,7	40,5	0,0	43,3	22,6	37,0	6,0	4,0
23	44	219,5	103,4	10,3	20,0	1,0	51,7	50,1	0,0	43,3	22,7	37,0	6,0	4,0
23	45	77,0	52,3	10,3	20,0	1,0	26,2	20,2	0,0	43,3	22,8	37,0	6,0	4,0
23	46	130,1	51,1	10,4	20,0	1,0	25,6	30,5	0,0	43,3	22,7	17,0	8,0	4,0
23	47	103,2	64,2	10,3	20,0	1,0	32,1	24,6	0,0	43,3	22,6	37,0	6,0	4,0
23	48	129,0	63,8	10,3	20,0	1,0	31,9	29,9	0,0	43,3	22,8	17,0	6,0	4,0
23	49	296,7	119,5	10,3	20,0	1,0	59,8	69,9	0,0	43,3	22,9	37,0	6,0	4,0
23	50	324,8	119,3	10,4	20,0	1,0	59,7	80,4	0,0	43,3	22,7	37,0	6,0	4,0
23	51	338,2	99,5	10,3	20,0	1,0	49,8	89,8	0,0	43,3	22,3	37,0	9,0	4,0
23	52	213,6	70,0	10,4	20,0	1,0	35,0	50,6	0,0	43,3	22,8	37,0	9,0	4,0
23	53	83,1	139,9	10,3	20,0	1,0	70,0	19,9	0,0	43,3	21,6	37,0	7,0	4,0
21	54	145,1	140,7	10,3	20,0	1,0	70,4	29,7	0,0	43,3	21,8	37,0	6,0	4,0
23	55	191,6	139,5	10,3	20,0	1,0	69,8	39,9	0,0	43,3	21,8	37,0	6,0	4,0
23	56	235,8	139,8	10,3	20,0	1,0	69,9	50,1	0,0	43,3	21,7	37,0	6,0	4,0
23	57	91,0	160,1	10,3	20,0	1,0	80,1	19,8	0,0	43,3	21,8	37,0	6,0	4,0
23	58	146,7	159,6	10,3	20,0	1,0	79,7	29,7	0,0	43,3	21,8	37,0	6,0	4,0
23	59	203,1	158,6	10,3	20,0	1,0	79,3	40,1	0,0	43,3	21,7	37,0	6,0	4,0
23	60	242,4	159,7	10,3	20,0	1,0	79,9	45,0	0,0	43,3	21,8	37,0	6,0	4,0
23	61	280,4	159,7	10,3	20,0	1,0	79,6	50,8	0,0	13,3	21,8	37,0	6,0	4,0
23	62	154,5	47,3	10,0	20,0	1,0	23,7	35,7	0,0	56,5	22,0	52,0	9,0	4,0
23	63	218,7	60,1	10,0	20,0	1,0	30,1	40,0	0,0	56,5	22,0	52,0	9,0	4,0
23	64	233,8	75,2	10,0	20,0	1,0	37,6	49,8	0,0	56,5	22,0	52,0	6,0	4,0
23	65	233,6	87,0	10,0	20,0	1,0	43,9	39,0	0,0	56,5	21,8	52,0	6,0	4,0
23	66	240,8	104,6	10,0	20,0	1,0	52,3	39,8	0,0	56,5	22,0	52,0	6,0	4,0
23	68	237,0	139,7	10,0	20,0	1,0	69,9	40,0	0,0	55,5	21,9	52,0	6,0	4,0
23	69	238,8	139,8	10,0	20,0	1,0	69,9	40,0	0,0	56,5	21,7	52,0	6,0	4,0
23	70	237,9	139,7	10,1	20,0	1,0	69,9	40,1	0,0	56,5	21,6	52,0	6,0	4,0
23	71	240,4	159,2	10,0	20,0	1,0	79,6	39,6	0,0	56,5	21,8	52,0	6,0	4,0
23	72	241,9	199,5	10,0	20,0	1,0	59,8	39,7	0,0	56,5	21,8	52,0	6,0	4,0
23	73	237,0	119,9	10,1	20,0	1,0	60,0	40,2	0,0	56,5	22,0	52,0	6,0	4,0
23	74	239,4	120,2	10,1	20,0	1,0	60,1	39,1	0,0	56,5	21,5	52,0	6,0	4,0
23	75	28,2	139,3	3,0	20,0	1,0	69,7	20,6	0,0	39,2	22,0	37,0	6,0	4,0
23	76	57,2	135,2	3,0	20,0	1,0	69,6	39,9	0,0	39,2	22,0	37,0	6,0	4,0
23	77	66,9	139,0	3,0	20,0	1,0	60,5	50,0	0,0	39,2	22,0	37,0	6,0	4,0
23	78	77,8	139,4	3,0	20,0	1,0	69,7	59,5	0,0	39,2	22,0	37,0	6,0	4,0
23	79	81,2	139,7	3,0	20,0	1,0	68,6	70,0	0,0	39,2	22,0	37,0	6,0	4,0
23	80	97,2	139,7	3,0	20,0	1,0	69,9	80,0	0,0	39,2	22,0	37,0	6,0	4,0
23	81	107,9	139,4	3,0	20,0	1,0	69,7	90,0	0,0	39,2	22,0	37,0	6,0	4,0
23	82	111,8	139,5	3,0	20,0	1,0	69,8	100,0	0,0	39,2	22,0	37,0	6,0	4,0
23	83	122,2	139,7	3,0	20,0	1,0	69,9	120,0	0,0	39,2	22,0	37,0	6,0	4,0

23	84	35,8	48,0	3,0	20,0	1,0	24,0	40,0	0,0	39,2	22,0	37,0	9,0	4,0
23	85	48,6	59,9	3,0	20,0	1,0	30,0	39,8	0,0	39,2	22,0	37,0	9,0	4,0
23	86	51,7	75,9	3,0	20,0	1,0	38,0	39,7	0,0	39,2	22,0	37,0	6,0	4,0
23	87	53,5	87,9	3,0	20,0	1,0	43,6	40,2	0,0	39,2	22,0	37,0	6,0	4,0
23	88	54,2	104,0	3,0	20,0	1,0	52,0	39,8	0,0	39,2	22,0	37,0	6,0	4,0
23	89	52,5	119,9	3,0	20,0	1,0	59,6	39,5	0,0	39,2	22,0	37,0	6,0	4,0
23	90	29,1	48,2	2,9	20,0	1,0	24,1	20,1	0,0	39,2	21,8	37,0	6,0	4,0
23	91	25,5	64,4	2,9	20,0	1,0	12,2	19,8	0,0	39,2	21,8	37,0	6,0	4,0
23	92	146,7	140,0	3,0	20,0	1,0	70,0	160,0	0,0	39,2	22,0	37,0	9,0	4,0
23	93	138,1	200,1	3,0	20,0	1,0	100,1	119,7	0,0	39,2	21,8	37,0	6,0	4,0
23	94	170,7	200,7	2,9	20,0	1,0	100,4	159,8	0,0	39,2	21,8	37,0	6,0	4,0
23	95	193,9	200,3	2,9	20,0	1,0	100,2	200,3	0,0	39,2	21,8	37,0	6,0	4,0
23	96	199,8	200,2	3,0	20,0	1,0	100,1	280,1	0,0	39,2	21,8	37,0	9,0	4,0
23	97	246,5	52,7	20,2	20,0	1,0	26,2	29,5	0,0	40,0	21,8	37,0	6,0	4,0
23	98	233,2	63,9	20,2	20,0	1,0	32,0	29,3	0,0	40,0	21,7	37,0	6,0	4,0
23	99	257,2	87,6	20,2	20,0	1,0	43,0	29,9	0,0	40,0	21,8	37,0	6,0	4,0
23	100	256,7	104,2	20,2	20,0	1,0	52,1	29,9	0,0	40,0	21,8	37,0	6,0	4,0
23	101	261,6	119,8	20,2	20,0	1,0	59,9	30,0	0,0	40,0	21,7	37,0	6,0	4,0
23	102	276,7	140,1	20,3	20,0	1,0	70,1	29,9	0,0	40,0	21,7	37,0	6,0	4,0
23	103	272,3	159,6	20,3	20,0	1,0	79,8	29,6	0,0	40,0	21,6	37,0	6,0	4,0
23	104	62,2	28,9	10,1	12,0	1,0	14,5	24,3	0,0	35,4	13,0	37,0	9,0	4,0
23	105	85,2	36,0	10,1	12,0	1,0	19,0	23,5	0,0	35,4	13,0	37,0	9,0	4,0
23	106	88,3	45,6	10,0	12,0	1,0	22,8	23,5	0,0	35,4	13,0	37,0	6,0	4,0
23	107	84,2	52,3	10,0	12,0	1,0	26,2	23,6	0,0	35,4	13,0	37,0	6,0	4,0
23	100	86,9	62,5	10,0	12,0	1,0	31,3	23,8	0,0	35,4	13,0	37,0	6,0	4,0
23	109	93,2	71,7	10,0	12,0	1,0	35,9	23,5	0,0	35,4	12,9	37,0	6,0	4,0
23	110	91,1	81,5	10,0	12,0	1,0	40,8	23,7	0,0	35,4	13,0	37,0	6,0	4,0
23	111	97,6	95,5	10,1	12,0	1,0	47,8	23,9	0,0	35,4	13,0	37,0	6,0	4,0
23	112	47,5	71,6	10,1	12,0	1,0	35,8	11,9	0,0	35,4	12,9	37,0	5,0	4,0
23	113	74,2	71,3	10,1	12,0	1,0	35,7	17,9	0,0	35,4	13,0	37,0	6,0	4,0
23	114	111,0	71,3	10,1	12,0	1,0	35,7	29,5	0,0	35,4	13,0	37,0	6,0	4,0
23	115	129,0	72,0	10,0	12,0	1,0	36,0	35,8	0,0	35,4	13,0	37,0	6,0	4,0
23	116	142,3	71,4	10,1	12,0	1,0	35,7	41,7	0,0	35,4	13,0	37,0	6,0	4,0
23	118	118,4	57,2	10,1	24,0	1,0	28,6	48,3	0,0	35,4	26,4	37,0	9,0	4,0
23	119	167,8	71,5	10,1	24,0	1,0	35,8	47,9	0,0	35,4	26,3	37,0	9,0	4,0
23	120	162,6	91,2	10,1	24,0	1,0	45,6	47,9	0,0	35,4	26,4	37,0	6,0	4,0
23	121	174,2	105,2	10,1	24,0	1,0	52,6	48,0	0,0	35,4	26,3	37,0	6,0	4,0
23	122	172,6	123,8	10,1	24,0	1,0	61,9	48,2	0,0	35,4	26,3	37,0	6,0	4,0
23	123	182,9	143,8	10,0	24,0	1,0	71,9	48,3	0,0	35,4	26,4	37,0	6,0	4,0
23	124	193,9	167,2	10,1	24,0	1,0	83,6	48,0	0,0	35,4	26,3	37,0	6,0	4,0
23	125	192,7	191,3	10,1	24,0	1,0	95,7	52,1	0,0	35,4	26,4	37,0	6,0	4,0
23	126	56,4	47,7	5,8	20,0	1,0	23,9	39,5	0,0	33,7	22,0	37,0	9,0	4,0

23	127	78,6	59,9	5,8	20,0	1,0	30,0	40,0	0,0	33,7	21,9	37,0	9,0	4,0
23	128	94,6	75,8	5,8	20,0	1,0	37,5	39,7	0,0	33,7	21,9	37,0	6,0	4,0
23	129	94,1	87,9	5,8	20,0	1,0	43,9	40,3	0,0	33,7	21,8	37,0	6,0	4,0
23	130	88,8	88,3	5,9	20,0	1,0	44,2	40,3	0,0	33,7	21,9	37,0	6,0	4,0
23	131	86,1	103,8	5,8	20,0	1,0	51,9	39,6	0,0	33,7	22,0	37,0	6,0	4,0
23	132	93,7	104,6	5,9	20,0	1,0	52,3	40,8	0,0	33,7	21,9	37,0	6,0	4,0
23	133	88,5	120,0	5,8	20,0	1,0	60,0	39,9	0,0	33,7	22,0	37,0	6,0	4,0
23	134	91,0	120,1	5,9	20,0	1,0	60,1	40,7	0,0	33,7	21,9	37,0	6,0	4,0
23	135	91,2	139,8	5,8	20,0	1,0	69,9	39,5	0,0	33,7	21,9	37,0	6,0	4,0
23	136	92,8	160,0	5,9	20,0	1,0	80,0	39,7	0,0	33,7	22,0	37,0	6,0	4,0
23	137	59,3	48,2	5,9	20,0	1,0	24,1	38,7	0,0	33,7	20,0	37,0	9,0	4,0
23	138	80,7	60,1	5,9	20,0	1,0	30,1	38,8	0,0	33,7	20,0	37,0	9,0	4,0
23	139	86,2	75,9	5,9	20,0	1,0	38,0	38,6	0,0	33,7	20,0	37,0	6,0	4,0
23	140	87,8	88,0	5,9	20,0	1,0	44,0	38,8	0,0	33,7	20,0	37,0	6,0	4,0
23	141	85,6	104,0	5,9	20,0	1,0	52,0	38,9	0,0	33,7	20,0	37,0	6,0	4,0
23	142	88,3	120,0	5,9	20,0	1,0	60,0	39,9	0,0	33,7	20,0	37,0	6,0	4,0
23	143	91,0	139,9	5,9	20,0	1,0	69,9	38,9	0,0	33,7	20,0	37,0	6,0	4,0
23	144	91,6	159,9	5,9	20,0	1,0	80,0	38,9	0,0	33,7	20,0	37,0	6,0	4,0
23	145	103,9	47,8	6,1	20,0	1,0	23,9	40,2	0,0	62,1	21,9	46,0	9,0	4,0
23	146	157,6	60,1	6,2	20,0	1,0	30,1	40,2	0,0	62,1	21,9	46,0	9,0	4,0
23	147	153,9	76,1	6,2	20,0	1,0	38,0	40,2	0,0	62,1	22,0	46,0	6,0	4,0
23	148	197,9	88,2	6,2	20,0	1,0	44,1	40,2	0,0	62,1	21,9	46,0	6,0	4,0
23	149	161,0	103,9	6,0	20,0	1,0	52,0	40,2	0,0	62,1	21,9	46,0	6,0	4,0
23	150	157,7	120,2	6,1	20,0	1,0	60,1	40,0	0,0	62,1	21,9	46,0	6,0	4,0
23	151	167,3	139,9	6,2	20,0	1,0	69,9	40,1	0,0	62,1	22,0	46,0	6,0	4,0
23	152	166,5	160,1	6,0	20,0	1,0	80,0	40,1	0,0	62,1	22,0	46,0	6,0	4,0
23	153	143,6	48,4	6,1	20,0	1,0	24,2	39,6	0,0	85,0	21,9	69,0	9,0	4,0
23	154	199,4	60,4	6,1	20,0	1,0	30,2	40,1	0,0	85,0	21,9	59,0	6,0	4,0
23	155	191,9	76,0	6,1	20,0	1,0	38,0	40,0	0,0	85,0	22,0	69,0	6,0	4,0
23	156	199,7	88,2	6,1	20,0	1,0	44,1	40,0	0,0	85,0	22,0	69,0	6,0	4,0
23	157	204,2	104,1	6,2	20,0	1,0	52,1	40,5	0,0	85,0	22,0	69,0	6,0	4,0
23	158	208,8	120,3	6,2	20,0	1,0	60,2	40,2	0,0	85,0	21,9	69,0	6,0	4,0
23	159	205,0	140,4	6,1	20,0	1,0	70,2	40,0	0,0	85,0	22,0	69,0	5,0	4,0
23	160	206,7	160,1	6,1	20,0	1,0	80,1	39,8	0,0	85,0	21,9	69,0	6,0	4,0
23	161	209,2	120,3	10,2	20,0	1,0	60,2	40,0	0,0	35,4	22,0	37,0	6,0	3,0
23	162	217,4	119,9	10,2	20,0	1,0	60,0	40,4	0,0	35,4	21,9	37,0	6,0	3,0
23	163	213,2	119,7	10,2	20,0	1,0	59,8	40,1	0,0	35,4	22,0	37,0	6,0	3,0

## 12.5 Anhang 5

Experimentelle Versuchsergebnisse aufbereitet aus BGD „Report London 43“ [25].

Rep	No.	Pu	b	t	d	n	e2	e1	p	R	d1	St	V	C
43	1	154,4	72,0	9,8	20,0	1,0	36,0	40,0	0,0	41,3	22,0	43,0	8,0	3,0
43	2	155,9	72,0	9,8	20,0	1,0	36,0	40,0	0,0	41,3	22,0	41,0	8,0	3,0
43	3	153,4	60,0	9,9	20,0	1,0	30,0	40,0	0,0	41,3	22,0	43,0	9,0	3,0
43	4	151,5	60,0	9,8	20,0	1,0	30,0	40,0	0,0	41,3	22,0	43,0	9,0	3,0
43	5	144,0	60,0	9,8	20,0	1,0	30,0	40,0	0,0	41,3	22,0	43,0	9,0	3,0
43	6	163,4	72,0	9,7	20,0	1,0	36,0	40,0	0,0	41,3	22,0	43,0	8,0	3,0
43	7	160,4	72,0	9,0	20,0	1,0	36,0	40,0	0,0	41,3	22,0	43,0	8,0	3,0
43	8	160,9	72,0	9,7	20,0	1,0	36,0	40,0	0,0	41,3	22,0	43,0	8,0	3,0
43	9	93,4	44,0	9,8	12,0	1,0	22,0	24,0	0,0	41,3	14,0	43,0	8,0	3,0
43	10	93,9	44,0	9,9	12,0	1,0	22,0	24,0	0,0	41,3	14,0	43,0	8,0	3,0

## 12.6 Anhang 6

Experimentelle Versuchsergebnisse aufbereitet aus „A complete study of bearing stress in single bolt connections“ [55].

No	Pu	b	t	d	n	e2	e1	p2	R	d1	St	V
M101	42,5	64,0	12,0	24,0	1,0	32,0	32,0	0,0	151,0	26,0	S235	Shear
M102	42,5	64,0	12,0	24,0	1,0	32,0	39,0	0,0	192,0	26,0	S235	Net cross section (high bearing stress)
M103	42,5	64,0	12,0	24,0	1,0	32,0	52,0	0,0	202,0	26,0	S235	Net cross section
M104	42,5	64,0	12,0	24,0	1,0	39,0	26,0	0,0	125,0	26,0	S235	Shear
M105	42,5	64,0	12,0	24,0	1,0	39,0	32,0	0,0	164,0	26,0	S235	Shear
M106	42,5	64,0	12,0	24,0	1,0	39,0	39,0	0,0	197,0	26,0	S235	Shear/splitting
M107	42,5	64,0	12,0	24,0	1,0	39,0	52,0	0,0	283,0	26,0	S235	Net cross section (high bearing stress)
M108	42,5	64,0	12,0	24,0	1,0	39,0	65,0	0,0	279,0	26,0	S235	Net cross section
M109	42,5	64,0	12,0	16,0	1,0	27,0	18,0	0,0	84,0	18,0	S235	Shear
M110	42,5	64,0	12,0	16,0	1,0	27,0	22,0	0,0	104,0	18,0	S235	Shear
M111	42,5	64,0	12,0	16,0	1,0	27,0	27,0	0,0	129,0	18,0	S235	Shear
M112	42,5	64,0	12,0	16,0	1,0	27,0	36,0	0,0	182,0	18,0	S235	Net cross section (high bearing stress)
M113	42,5	64,0	12,0	16,0	1,0	27,0	45,0	0,0	188,0	18,0	S235	Net cross section
M201	42,5	64,0	12,0	20,0	2,0	53,0	33,0	53,0	359,0	22,0	S235	Block shear
M202	42,5	64,0	12,0	20,0	2,0	53,0	55,0	53,0	493,0	22,0	S235	Block shear
M203	42,5	64,0	12,0	20,0	2,0	27,1	33,0	81,0	348,0	22,0	S235	Shear/partial net c.s
M204	42,5	64,0	12,0	20,0	2,0	27,1	55,0	81,0	455,0	22,0	S235	Partial net c.s
M205	42,5	64,0	12,0	20,0	2,0	33,0	33,0	66,0	353,0	22,0	S235	Shear
M206	42,5	64,0	12,0	20,0	2,0	33,0	55,0	66,0	469,0	22,0	S235	Net cross section

## 12.7 Anhang 7

Experimentelle Versuchsergebnisse aufbereitet aus „Behaviour of single bolt bearing on high strength steel plate“ [64].

No	Pu	b	t	d	n	e2	e1	p2	R	d1	St	V
SD-10-30-550	757,0	156,0	10,0	24,0	1,0	78,0	26,0	0,0	183,0	26,0	S550	TO (Bending)
SD-12-30-550	757,0	156,0	10,0	24,0	1,0	78,0	31,2	0,0	226,0	26,0	S550	TO (Bending)
SD-15-30-550	757,0	156,0	10,0	24,0	1,0	78,0	39,0	0,0	292,0	26,0	S550	TO (Bending)
SD-20-30-550	757,0	156,0	10,0	24,0	1,0	78,0	52,0	0,0	382,0	26,0	S550	TO (Shearing)
SD-25-30-550	757,0	156,0	10,0	24,0	1,0	78,0	65,0	0,0	456,0	26,0	S550	TO (Shearing)
SD-15-15-550	757,0	78,0	10,0	24,0	1,0	39,0	39,0	0,0	271,0	26,0	S550	SP
SD-15-11-550	757,0	57,2	10,0	24,0	1,0	28,6	39,0	0,0	242,0	26,0	S550	N
SD-15-08-550	757,0	41,6	10,0	24,0	1,0	20,8	39,0	0,0	125,0	26,0	S550	N
SD-10-30-690	859,0	156,0	10,0	24,0	1,0	78,0	26,0	0,0	210,0	26,0	S690	TO (Bending)
SD-12-30-690	859,0	156,0	10,0	24,0	1,0	78,0	31,2	0,0	249,0	26,0	S690	TO (Bending)
SD-15-30-690	859,0	156,0	10,0	24,0	1,0	78,0	39,0	0,0	332,0	26,0	S690	TO (Bending)
SD-20-30-690	859,0	156,0	10,0	24,0	1,0	78,0	52,0	0,0	437,0	26,0	S690	TO (Shearing)
SD-25-30-690	859,0	156,0	10,0	24,0	1,0	78,0	65,0	0,0	542,0	26,0	S690	TO (Shearing)
SD-15-15-690	859,0	78,0	10,0	24,0	1,0	39,0	39,0	0,0	317,0	26,0	S690	SP
SD-15-11-690	859,0	57,2	10,0	24,0	1,0	28,6	39,0	0,0	284,0	26,0	S690	N
SD-15-08-690	859,0	41,6	10,0	24,0	1,0	20,8	39,0	0,0	149,0	26,0	S690	N
SD-10-30-890	1064,0	156,0	10,0	24,0	1,0	78,0	26,0	0,0	262,0	26,0	S890	TO (Bending)
SD-12-30-890	1064,0	156,0	10,0	24,0	1,0	78,0	31,2	0,0	328,0	26,0	S890	TO (Bending)
SD-15-30-890	1064,0	156,0	10,0	24,0	1,0	78,0	39,0	0,0	416,0	26,0	S890	TO (Bending)
SD-20-30-890	1064,0	156,0	10,0	24,0	1,0	78,0	52,0	0,0	550,0	26,0	S890	TO (Bending)
SD-25-30-890	1064,0	156,0	10,0	24,0	1,0	78,0	65,0	0,0	662,0	26,0	S890	TO (Bending)
SD-15-15-890	1064,0	78,0	10,0	24,0	1,0	39,0	39,0	0,0	392,0	26,0	S890	SP
SD-15-11-890	1064,0	57,2	10,0	24,0	1,0	28,6	39,0	0,0	347,0	26,0	S890	N
SD-15-08-890	1064,0	41,6	10,0	24,0	1,0	20,8	39,0	0,0	183,0	26,0	S890	N