Deutscher
Ausschuß für Stahlbau DASt

2/2017

Forschungsbericht

Untersuchungen zum Tragverhalten von hochfesten Schrauben unter kombinierter Zug- und Scherbeanspruchung

18095N

Urheberbezeichnung (Copyright); Haftungsausschluss

Dieses Werk und dessen Inhalte sind urheberrechtlich geschützt. Die Nutzungs- und Verwertungsrechte liegen beim Deutschen Ausschuss für Stahlbau e.V. DASt (Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf). Verstöße gegen das Urheberrecht (z.B. das unberechtigte Kopieren von Texten) sind gemäß §§ 106 ff. UrhG strafbar und wird mit Freiheitsstrafe oder Geldstrafe bestraft. Der Versuch ist ebenfalls strafbar. Daneben könne zivilrechtliche Schadensersatzund Vergütungsansprüche bestehen.

Bei der Erstellung dieses Werkes wurde mit größter Sorgfalt vorgegangen. Trotzdem können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Für fehlerhafte Angaben und deren Folgen kann daher keine Haftung übernommen werden; dies gilt nicht für Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit. Rechtsansprüche aus der Benutzung der Daten sind insoweit ausgeschlossen.

Angaben über Normen beziehen sich auf den Veröffentlichungszeitpunkt.

Für alle Hinweise und Verbesserungsvorschläge sind wir stets dankbar.

Herausgeber:
Deutscher Ausschuss für Stahlbau DASt,
Düsseldorf

Vertrieb:
Stahlbau Verlags- und Service GmbH,
Düsseldorf

Oktober 2021

Gefördert durch:

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

DASt
Deutscher Ausschuss für Stahlbau

Forschungsvereinigung	**Deutscher Ausschuß für Stahlbau e.V. DASt**
Forschungsstelle	**Technische Universität Darmstadt Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik** **Fachgebiet Stahlbau** **Prof. Dr.-Ing. Jörg Lange**
IGF-Nummer	**18095 N**
DASt-Homepage	**www.stahlbauforschung.de**

IGF
Industrielle Gemeinschaftsforschung

AiF
Forschungsnetzwerk Mittelstand

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben „Untersuchungen zum Tragverhalten von hochfesten Schrauben unter kombinierter Zug- und Scherbeanspruchung“, IGF-Projekt Nr.18095 N, der Forschungsvereinigung Deutscher Ausschuß für Stahlbau, Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Kurzfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, das Tragverhalten von Schrauben unter kombinierter Zug-Abscher-Belastung grundlegend zu erforschen. In den wenigen bisherigen Untersuchungen zu diesem Thema werden keine ausreichenden, zusammenhängenden Daten erzeugt, sodass weder die bisher in den nationalen Normenwerken Europas verankerte quadratische Interaktionsbedingung zum Nachweis von Schrauben unter kombinierter Belastung noch die in der neu eingeführten, europaweit gültigen DIN EN 1993-1-8 gegebene, bi-lineare und deutlich konservativere Nachweisregelung auf eine gesicherte Grundlage zurückgehen.

Durch eine umfangreiche Versuchsreihe an Schrauben unterschiedlicher Festigkeitsklassen mit Schaft oder mit Gewinde in der Scherfuge, die unter unterschiedlichen Zug-Abscherkraft-Verhältnissen getestet werden, werden in dieser Arbeit Versuchsergebnisse erzeugt, anhand derer die Grenzen für die ansetzbaren Traglasten für kombiniert belastete Schrauben verlässlich definiert werden können. Durch die numerische Simulation der Schrauben können das Tragverhalten und die in der Schraube hervorgerufenen Verformungen dargestellt und interpretiert werden.

Durch das Verständnis des Tragverhaltens und der darauf Einfluss nehmenden Parameter wird zum Abschluss dieser Arbeit ein Vorschlag für eine sichere und sinnvolle, zukünftige Nachweisregelung erarbeitet.

Abstract

The aim of this thesis is the analysis of the behaviour of bolts that are exposed to combined tension and shear load. In the few existing investigations on this topic no adequate coherent test data is generated. Thus neither the hitherto in national European standards given quadratic interaction rule to design bolts under a combined load nor the bi-linear, by far more conservative rule that exists in the newly established EN 1993-1-8 are based on a substantiated background.

Conducting an extensive test series on bolts of different bolt grades both with shank and with thread in the shear plane that were loaded under different ratios of tension to shear, in this thesis test results are produced, which deliver a reliable basis to determine the boundaries for the ultimate load of a bolt under combined loading. Using a numerical simulation of a combined loaded bolt the load bearing behaviour and the deformations that are caused in the bolt can be studied and interpreted.

The understanding of the bolt behaviour and its relevant parameters leads to a recommendation for a safe as well as rational future design rule.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis

Symbole und Abkürzungen

1. Einleitung **1**
1.1. Nachweisführung für Schrauben bei Zug-Abscher-Interaktion 3
1.2. Motivation und Zielsetzung der Arbeit 7

2. Schrauben im Stahlbau **11**
2.1. Eigenschaften von Schrauben 11
2.2. Normung von Schrauben 12
2.2.1. Die wichtigsten Normen zu Schrauben für den Stahlhochbau 13
2.2.2. Normen zur Bemessung von Schrauben 15
2.3. Tragverhalten und Traglasten von Schrauben 16
2.3.1. Schrauben auf Zug 16
2.3.2. Schrauben auf Abscheren 17
2.3.3. Schrauben auf Zug und Abscheren 19

3. Bisherige Untersuchungen und Stand der Forschung **21**
3.1. Möglichkeiten zur Durchführung von Interaktionsversuchen 21
3.1.1. Versuche mit nacheinander aufgebrachten Lastkomponenten 22
3.1.2. Versuche mit Belastung im Winkel zur Schraubenachse 23
3.2. Übersicht über die bestehenden Untersuchungen 24
3.2.1. Chesson u.a., USA 26
3.2.2. Bilderbeek, Niederlande 27
3.2.3. Hassler, Stuttgart 28
3.2.4. Shakir-Khalil und Ho, Versuche an Schrauben, Großbritannien . . . 29
3.2.5. Shakir-Khalil und Ho, Versuche an Anschlüssen, Großbritannien . . 30
3.2.6. Knobloch und Schmidt, Essen 31
3.3. Ergebnisse der bestehenden Versuchsreihen 32
3.3.1. Zusammenfassung der Ergebnisse von Chesson u.a. 34
3.3.2. Zusammenfassung der Ergebnisse von Bilderbeek 37
3.3.3. Zusammenfassung der Ergebnisse von Hassler 39
3.3.4. Zusammenfassung der Ergebnisse von Shakir-Khalil und Ho 40
3.3.5. Zusammenfassung der Ergebnisse von Knobloch und Schmidt 42
3.4. Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den bisherigen Versuchsreihen . . . 45

4. Eigene experimentelle Untersuchungen **49**
4.1. Versuchsziele und Konzept 49

4.2. Versuchsaufbau 50
4.2.1. Messdaten 51
4.2.2. Versuche zum zweischnittigen Abscheren 53
4.2.3. Begleitende Materialversuche 53
4.3. Versuchsprogramm 55
4.4. Versuchsdurchführung 56
4.5. Ergebnisse 57
4.5.1. Ergebnisse der Materialversuche 58
4.5.2. Verformungen 59

5. Auswertung der Ergebnisse **63**
5.1. Eigene Versuche 63
5.1.1. Versuche mit Gewinde in der Scherfuge 63
5.1.2. Versuche mit Schaft in der Scherfuge 66
5.1.3. Zusammenfassung der Beobachtungen aus den Versuchen 70
5.2. Neuauswertung der vorangegangenen Versuchsreihen 70
5.2.1. Neuauswertung der Ergebnisse von Bilderbeek 72
5.2.2. Neuauswertung der Ergebnisse von Knobloch und Schmidt 74
5.2.3. Neuauswertung sämtlicher vorangegangenen Versuche mit Gewinde in der Scherfuge 76
5.2.4. Neuauswertung sämtlicher vorangegangenen Versuche mit Schaft in der Scherfuge 76
5.3. Vergleich und Interpretation der Ergebnisse 76

6. Numerische Simulation **79**
6.1. Numerische Simulation der Schraube mit Schaft in der Scherfuge 80
6.1.1. Modellbildung und Geometrie 80
6.1.2. Elementierung 81
6.1.3. Materialgesetze 82
6.1.4. Lagerung und Lastaufbringung 84
6.1.5. Ergebnisse unter verschiedenen Lastwinkeln 88
6.1.6. Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse 96
6.2. Parameterstudien mit Schaft in der Scherfuge 98
6.2.1. Variation der Klemmlänge 99
6.2.2. Variation des Lochspiels 101
6.2.3. Zusammenfassung der Ergebnisse der Parameterstudie 104
6.3. Numerische Simulation der Schraube mit Gewinde in der Scherfuge 104
6.3.1. Schwierigkeiten bei der Modellerstellung 105
6.3.2. Geometrie und Elementierung 106
6.3.3. Weitere Randbedingungen 107
6.3.4. Ergebnisse unter reinem Zug und reiner Scherkraft 108
6.3.5. Ergebnisse unter verschiedenen Lastwinkeln 110
6.3.6. Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse 114

7. Empfehlungen für die Normung **117**
7.1. Zusammenfassung von Aufbau und Hintergrund des aktuellen Nachweisformats der DIN EN 1993-1-8 117
7.2. Ausgangsgleichung für eine verbesserte Nachweisführung 118
7.3. Möglichkeit der Überführung in eine tri-lineare Gleichung 120
7.4. Berücksichtigung der Zugtragfähigkeit des Schafts im Interaktionsnachweis . 121
7.5. Vorschlag für den Übertrag in die Norm 121

8. Zusammenfassung und Ausblick **123**

Literatur **127**

A. Einzelergebnisse der alten Versuchsreihen **131**

B. Versuchsaufbau **145**

C. Ergebnisse der Versuche an Schrauben **153**

D. Ergebnisse der Materialtests **169**

E. Neudarstellung der Versuchsergebnisse der bestehenden Versuchsreihen **175**
E.1. Versuche mit Gewinde in der Scherfuge 176
E.2. Versuche mit Schaft in der Scherfuge 179

F. Ergebnisse der Parameterstudien mithilfe der Methode der Finiten Elemente **185**
F.1. Variation der Klemmlänge 185
F.2. Variation des Lochspiels 192

Symbole und Abkürzungen

Lateinische Buchstaben

A	Nennquerschnittsfläche (Schaftquerschnittfläche) der Schraube (DIN EN 1993-1-8)
$A_{Gewinde}$	Gewindequerschnittsfläche (Spannungsquerschnitt) der Schraube
A_S	Spannungsquerschnittsfläche der Schraube (DIN EN 1993-1-8)
A_{Sch}	Schaftquerschnittsfläche der Schraube (DIN 18800-1)
A_{Schaft}	Schaftquerschnittsfläche der Schraube
A_{Sp}	Spannungsquerschnittsfläche der Schraube (DIN 18800-1)
$F_{0°}$	Traglast unter Lastwinkel 0° (aus Versuch oder numerischer Simulation)
F_{ges}	maximal erreichte Gesamt-Traglast
$F_{t,Ed}$	Beanspruchung auf Zug, Designwert (DIN EN 1993-1-8)
$F_{t,Rd}$	Beanspruchbarkeit auf Zug, Designwert (DIN EN 1993-1-8)
$F_{t,Rd,A}$	Beanspruchbarkeit des Schaftquerschnitts auf Zug, Designwert (Vorschlag)
$F_{t,Rd,S}$	Beanspruchbarkeit des Gewindequerschnitts auf Zug, Designwert (Vorschlag)
f_u	Zugfestigkeit
$f_{u,0°}$	Zugfestigkeit, zurückgerechnet aus Versuch an ganzer Schraube unter Lastwinkel 0°
$f_{u,Schaft,obs}$	tatsächlich vorhandene, mittlere Zugfestigkeit des Schaftquerschnitts
$f_{u,t}$	technische Zugfestigkeit
$f_{u,Vickers,Gewinde}$	mittlere Zugfestigkeit des Gewindequerschnitts, zurückgerechnet aus $f_{u,Zugp.}$ mithilfe von Vickershärte-Tests

$f_{u,Vickers,Schaft}$	mittlere Zugfestigkeit des Schaftquerschnitts, zurückgerechnet aus $f_{u,Zugp.}$ mithilfe von Vickershärte-Tests
$f_{u,Zugp.}$	Zugfestigkeit, aus Zugproben-Versuch
$F_{v,Ed}$	Beanspruchung auf Abscheren, Designwert (DIN EN 1993-1-8)
$F_{v,Rd}$	Beanspruchbarkeit auf Abscheren, Designwert (DIN EN 1993-1-8)
$F_{v,Rd,A}$	Beanspruchbarkeit des Schaftquerschnitts auf Abscheren, Designwert (Vorschlag)
$F_{v,Rd,S}$	Beanspruchbarkeit des Gewindequerschnitts auf Abscheren, Designwert (Vorschlag)
f_y	Streckgrenze
N	Normalkraft(-komponente)
$N_{0°}$	maximale Normalkraft, bestimmt aus Simulation unter Lastwinkel 0°
N_{max}	maximal aufnehmbare Normalkraft
$N_{max,Gewinde}$	maximal vom Gewindequerschnitt aufnehmbare Normalkraft
$N_{max,Gewinde,obs}$	im Versuch ermittelte maximal vom Gewindequerschnitt aufnehmbare Normalkraft
$N_{max,Schaft}$	maximal vom Schaftquerschnitt aufnehmbare Normalkraft
$N_{R,d}$	Beanspruchbarkeit auf Zug, Designwert (DIN 18800)
r_a	radialer Abstand
$R_{p,0,2}$	0,2%-Dehngrenze
V	Scherkraft(-komponente)
$V_{90°}$	maximale Scherkraft, bestimmt aus Simulation unter Lastwinkel 90°
$V_{a,R,d}$	Beanspruchbarkeit auf Abscheren, Designwert (DIN 18800)
V_{max}	maximal aufnehmbare Scherkraft
$V_{max,Gewinde}$	maximal vom Gewindequerschnitt aufnehmbare Scherkraft
$V_{max,Gewinde,obs}$	im Versuch ermittelte maximal vom Gewindequerschnitt aufnehmbare Scherkraft
$V_{max,Schaft}$	maximal vom Schaftquerschnitt aufnehmbare Scherkraft
$V_{max,Schaft,obs}$	im Versuch ermittelte maximal vom Schaftquerschnitt aufnehmbare Scherkraft

Griechische Buchstaben

α_a	Festigkeitskoeffizient, Verhältnis maximale Scher- zu Zugbeanspruchbarkeit (DIN 18800-1)
α_v	Festigkeitskoeffizient, Verhältnis maximale Scher- zu Zugbeanspruchbarkeit (DIN EN 1993-1-8)
γ_M	Teilsicherheitsbeiwert zur Berechnung der Bemessungswerte der Festigkeiten beim Nachweis der Tragsicherheit (DIN 18800-1)
γ_{M2}	Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchbarkeit bei Bruchversagen (DIN EN 1993-1)
ϵ_t	technische Dehnung
ϵ_w	wahre Dehnung
σ	Normalspannung
σ_{max}	maximal aufnehmbare Normalspannung
$\sigma_{max,t}$	maximal aufnehmbare, technische Normalspannung
σ_t	technische Spannung
σ_v	Vergleichsspannung nach VON MISES
σ_w	wahre Spannung
τ	Schubspannung
τ_{max}	maximal aufnehmbare Schubspannung
$\tau_{max,t}$	maximal aufnehmbare, technische Schubspannung
τ_u	plastische Schubfestigkeit

1. Einleitung

Die beiden grundlegenden Beanspruchungsarten für Schrauben im Bauwesen sind Zug und Abscheren. Die Schraube in einem Anschluss verhindert entweder, dass die beiden Bauteile, die sie verschraubt, auseinandergezogen werden oder dass sich die verbundenen Bauteile gegeneinander verschieben. Je nach Anordnung der Schrauben im Anschluss erfährt die Schraube hierdurch eine Zugbelastung in Richtung ihrer Längsachse oder eine Scherbelastung orthogonal zur Schraubenachse.

Für beide Belastungssituationen ist in Abbildung 1.1 ein Beispiel dargestellt. Abbildung 1.1 a) zeigt einen geschraubten Kopfplattenstoß, bei dem die Schrauben reinen Zug erfahren. Im Fahnenblechanschluss in Abbildung 1.1 b) werden die Schrauben ausschließlich auf Abscheren beansprucht.

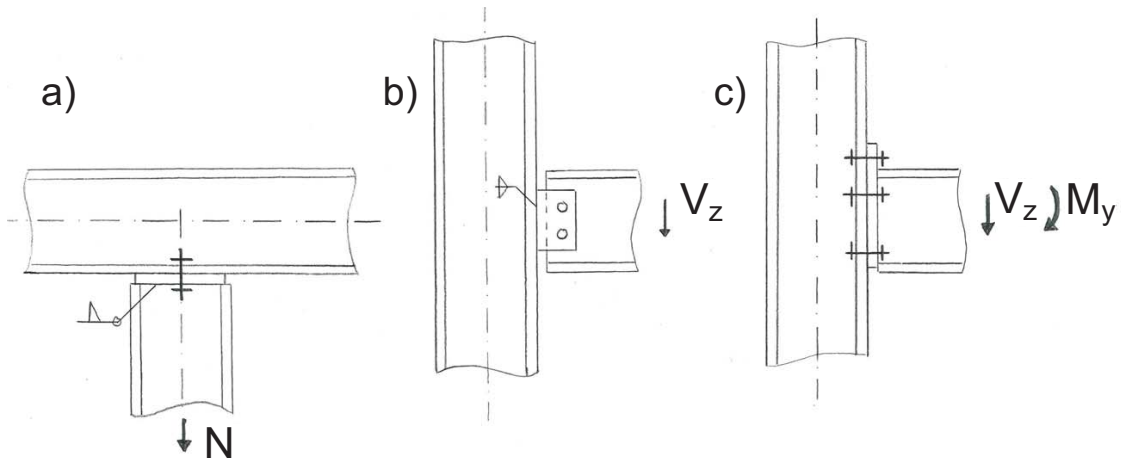


Abbildung 1.1.: Schraubanschlüsse, a) reiner Zug, b) reine Scherkraft, c) Modellbildung zur Berechnung: obere Schrauben werden nur auf Zug, untere für die gesamte Scherlast bemessen

Bei der Bemessung von üblichen Stahlbauanschlüssen ist es gängige Praxis, einzelnen Schraubengruppen jeweils nur eine Lastart „zuzuweisen“. So erfahren im geschraubten, biegesteifen Stirnplattenstoß in Abbildung 1.1 c) alle Schraubenreihen eine Scherbeanspruchung aus der Vertikalkraft V_z. Da die oberen Schraubenreihen aber außerdem eine Zugbeanspruchung aus dem Moment M_y erfahren, wird die Vertikalkraft für den Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit ausschließlich den unteren Schrauben zugewiesen. Hierbei wird die Duktilität des Baustoffs Stahl genutzt, die bis zu einem gewissen Grad eine Lastumlagerung nach Erreichen der Fließgrenze zulässt.

In einigen Anschlüssen ist ein „Zuweisen“ der Lastarten nicht mehr angebracht. Die Schraube erfährt dann eine kombinierte Beanspruchung von Zug und Abscheren und die

Beeinflussung der Traglast durch das gleichzeitige Auftreten von zwei Lastkomponenten muss durch das Führen eines Interaktionsnachweises berücksichtigt werden.

Abbildung 1.2 zeigt einen Anschluss, in dem durch die schräg angreifende Kraft die Schrauben eindeutig eine kombinierte Zug-Abscher-Belastung erfahren.

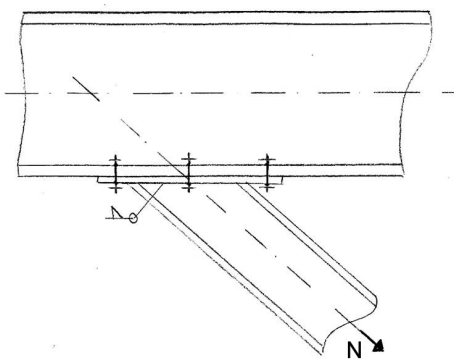


Abbildung 1.2.: Schraubanschluss mit kombinierter Zug-Abscher-Belastung

Bei größeren und komplexeren Anschlüssen wird die Betrachtung der Lastinteraktion in den Schrauben oft unumgänglich. Als Beispiel zeigt Abbildung 1.3 den Anschluss eines Riegels an eine Stütze im Kesselhaus eines Großkraftwerks. Dieser Anschluss muss sowohl vertikale und horizontale Scherkräfte übertragen, als auch große Normalkräfte und ein Biegemoment um die schwache, vertikale Riegelachse. Dabei ist der Riegel selbst 120 cm hoch und 80 cm breit, der Anschluss erfolgt mit 32 Schrauben der Größe M 36 und der Festigkeit 10.9.

Abbildung 1.3.: Anschluss im Kesselgerüst Kraftwerk Ledvice, Tschechien (Foto: Renner)

Bei solchen Dimensionen ist eine Zuweisung der Beanspruchungsarten nicht mehr gerechtfertigt: Die Verformungen, die sich einstellen müssten, um eine vorausgesetzte Lastumlagerung zu gewährleisten, werden sehr groß. Gleichzeitig verfügt zwar das Grundmaterial der Konstruktion über eine ausgeprägte Duktilität, die Lastumlagerungen bis zu einem gewissen Grad ermöglicht, die hohe Tragfähigkeit der hochfesten Schrauben wird aber durch eine Versprödung des Werkstoffs erkauft, ein Erreichen der Maximalbelastung führt hier zu einem schlagartigen Versagen.

1.1. Nachweisführung für Schrauben bei Zug-Abscher-Interaktion

Bei der Bemessung einer Schraube unter gleichzeitiger Beanspruchung auf Zug und Abscheren ist ein Interaktionsnachweis zu führen, um den gemeinsamen Einfluss der beiden wirkenden Lastkomponenten auf die Traglast zu berücksichtigen.

Ein erster Ansatz hierfür wäre, wie aus der Bemessung anderer Stahlbauteile gewohnt, die Belastungen in Spannungen umrechnen und das Bauteil „Schraube“ mithilfe der für Stahl gültigen Vergleichsspannungshypothese nach VON MISES gegen eine Grenzspannung nachweisen.

Dabei resultiert aus der Zugbelastung N eine Normalspannung σ in Richtung Schraubenlängsachse. Die aus der Scherkraft V resultierende Spannung kann vereinfacht als Schubspannung τ interpretiert werden, die in der Fläche in der Scherfuge wirkt. Die Vergleichsspannung im maßgebenden Schnitt, die mit der aufnehmbaren Grenzspannung des Schraubenwerkstoffs zu vergleichen ist, berechnet sich dann wie folgt:

$$\sigma = \frac{N}{A} \tag{1.1}$$

$$\tau = \frac{V}{A} \tag{1.2}$$

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} \leq \sigma_{max} \tag{1.3}$$

mit
A in der Scherfuge befindlicher Querschnitt

Da bei Schrauben, die in genormten Größen vorhanden sind, gerne mit tabellierten maximalen Tragfähigkeiten gearbeitet wird, können für den Nachweis auch direkt die auftretenden Kraftanteile mit diesen maximalen Tragfähigkeiten verglichen werden, was den Umweg über die Fläche spart.

Das Verhältnis von aufnehmbarer Schub- zu Normalspannung in der Vergleichsspannung nach VON MISES von $1/\sqrt{3} \approx 0,58$ wird dabei ersetzt durch das Verhältnis von maximaler Zug- zu maximaler Scherfestigkeit. Auf dieses Verhältnis wird in Kapitel 2.3.2 genauer eingegangen.

Unter Betrachtung der Vergleichsspannung nach von Mises scheint es also zunächst plausibel, für den Interaktionsnachweis von kombiniert beanspruchten Schrauben eine quadratische Funktion zu verwenden. Die mit der Revision von 1990 in die deutsche DIN 18800-1[1] eingeführte Interaktionsgleichung (Element (810), Formel (58)) wendet diesen quadratischen Ansatz an:

$$\left(\frac{N}{N_{max}}\right)^2 + \left(\frac{V}{V_{max}}\right)^2 \leq 1,0 \tag{1.4}$$

Auch die anderen europäischen Normenwerke, die ebenfalls größtenteils in den 1980er Jahren überarbeitet wurden, führten Nachweisregeln für die Bemessung von kombiniert beanspruchten Schrauben ein, die eine quadratische Interaktion enthalten oder an diese angelehnt waren. Beispielsweise überführte der British Standard[2] zur leichteren Handhabung den quadratischen Ansatz in eine tri-lineare Funktion (Chapter 6.3.4.4). Kleine Anteile einer Lastart können dadurch in der Bemessung vernachlässigt werden:

$$\begin{aligned} &\frac{N}{N_{max}} \leq 1,0 \\ &\frac{N}{N_{max}} + \frac{V}{V_{max}} \leq 1,4 \\ &\frac{V}{V_{max}} \leq 1,0 \end{aligned} \tag{1.5}$$

Mit der bauaufsichtlichen Einführung zum 1. Juli 2012 wurden auch in Deutschland die neuen Eurocodes, die einheitlichen, europaweit geltenden Normen für das Bauwesen, verbindlich und die DIN 18800 wurde durch die DIN EN 1993, den sogenannten EC 3, ersetzt. Im Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen[3] wird die Bemessung von Schrauben geregelt.

Für den Nachweis von Schrauben unter kombinierter Zug-Abscher-Belastung findet sich in Tabelle 3.4 eine Bedingung, die sich deutlich von der bisher bekannten, quadratischen Interaktionsformel unterscheidet:

$$\begin{aligned} &\frac{N}{N_{max}} \leq 1,0 \\ &\frac{N}{1,4 \cdot N_{max}} + \frac{V}{V_{max}} \leq 1,0 \end{aligned} \tag{1.6}$$

Stellt man die Funktionen der unterschiedlichen Interaktionsnachweise graphisch dar, siehe Abbildung 1.4, zeigen sich deutliche Unterschiede. Die Formel aus dem Eurocode liegt unterhalb der quadratischen Interaktion und ist im Vergleich zu ihr deutlich konservativer.

Dieser Unterschied wird noch deutlicher, wenn bei der betrachteten Schraube nicht das Schraubengewinde, sondern der Schaft in der Scherfuge liegt. Die deutsche DIN weist in

[1] DIN 18800-1:1990-11, *Stahlbauten - Teil 1: Bemessung und Konstruktion.*
[2] BS 5950-1:2000, *Structural use of steelwork in building - Part 1.*
[3] DIN EN 1993-1-8:2012-10, *EC3 -Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen.*

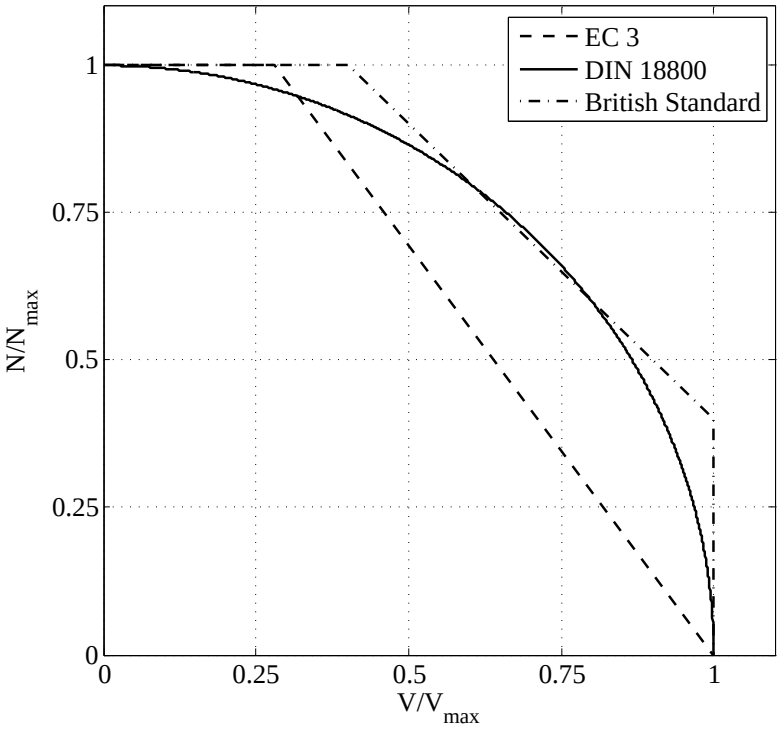


Abbildung 1.4.: Funktionen der unterschiedlichen Interaktionsnachweise im Vergleich

Element (810) darauf hin, dass für den Interaktionsnachweis „derjenige Querschnitt zugrunde zu legen ist, der in der Scherfuge liegt“[4], im Fall des Schafts in der Scherfuge folglich der Schaftquerschnitt.

Dieses Vorgehen liegt auf der Hand, denn die beiden Lastkomponenten treffen in der Scherfuge aufeinander und der hier vorhandene Querschnitt muss den Lastabtrag gewährleisten. Gleichzeitig ist aber im Nachweis sicherzustellen, dass die Zugkomponente der Belastung nicht die Zugtragfähigkeit des Gewindes überschreitet. Der Gewindequerschnitt ist deutlich kleiner (je nach Schraubengröße liegt er in etwa bei 78% der Schaftfläche), so dass bei Schrauben mit hohem Zuganteil das Versagen des Gewindes auf Zug maßgebend werden kann.

In der graphischen Darstellung der quadratischen Nachweisfunktion im Interaktionsdiagramm ist die Nachweisgrenze also beim Verhältniswert Gewinde- zu Schaftquerschnitt abzuschneiden, wie in Abbildung 1.5 geschehen.

Die Möglichkeit, den tatsächlich in der Scherfuge vorhandenen Querschnitt im Interaktionsnachweis zu berücksichtigen, ist im Eurocode komplett entfallen. Während bei der Berechnung der Grenz-Abschertragfähigkeit unterschieden wird, welcher der Querschnitte sich in der Scherfuge befindet, kann die Grenz-Zugtragfähigkeit ausschließlich mit dem für das Gewinde maßgebenden Spannungsquerschnitt berechnet werden.

Für den Fall, dass die Schraube einer reinen Zugbelastung ausgesetzt ist, ist das ersichtlich

[4]DIN 18800-1:2008-11, *Stahlbauten - Teil 1: Bemessung und Konstruktion*, S. 76.

und sinnvoll, versagt eine auf Zug belastete Schraube doch immer im schwächsten Querschnitt. Aber auch die Nachweisregel für kombiniert beanspruchte Schrauben im Eurocode erlaubt ausschließlich die Verwendung der unter Berücksichtigung des Spannungsquerschnitts ermittelten Zugtragfähigkeit der Schraube. Durch das Verwenden der Grenzabschertragfähigkeit des Schafts wird also ein Nachweis geführt, der gar keine reale Situation darstellt:

$$\frac{N}{1,4 \cdot N_{max,Gewinde}} + \frac{V}{V_{max,Schaft}} \leq 1,0 \tag{1.7}$$

Die Konsequenz dieser Vermischung zeigt sich in Abbildung 1.5, in der die Interaktionskurven bezogen auf die reinen Grenztragfähigkeiten des Schafts dargestellt werden. Der Unterschied zur bisher bekannten Nachweisführung verschiebt sich für Schrauben mit Schaft im Gewinde noch deutlich weiter zu Ungunsten der Ausnutzbarkeit.

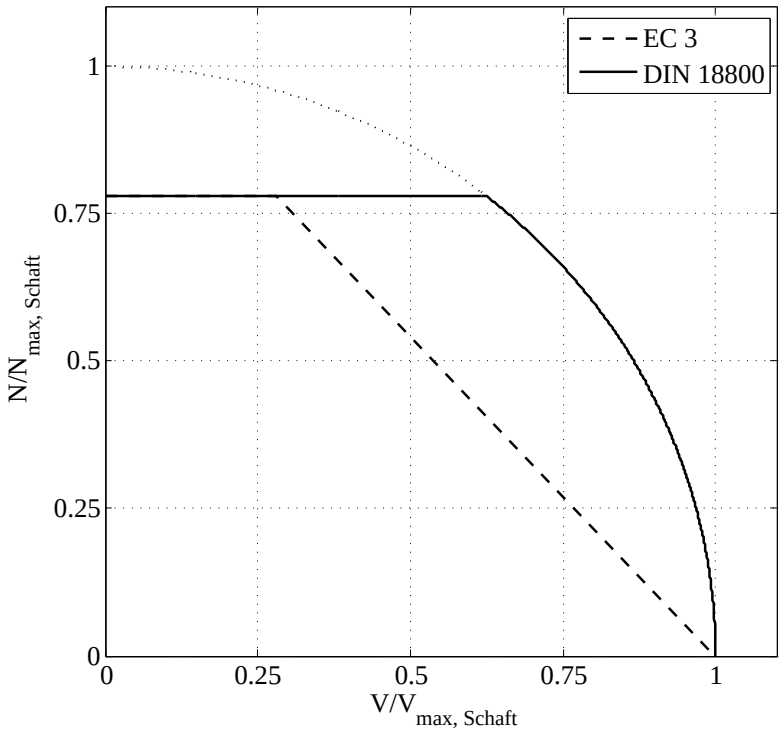


Abbildung 1.5.: Interaktionsnachweisfunktionen für die Situation „Schaft in der Scherfuge“.

Diese Diskrepanz fällt auch den Erstellern des Backgrounddokuments zum Eurocode auf[5]. Sie diskutieren daher die Möglichkeit, statt Gleichung 1.7 eine identische Gleichung mit dem Faktor 1,8 anstelle 1,4 einzuführen. Diese würde die statistischen Anforderungen an das Sicherheitsniveau auch erfüllen, wird dann aber wieder verworfen, „in order to obtain an equation with the same coefficients as in the equation for combined tension and shear

[5]Vergl. Snijder u. a., *Background report EC3, Part A (1988)*, S. 41 f.

in the thread“[6]. Damit nicht zwei identische Gleichungen mit unterschiedlichen Zahlen im Eurocode enthalten sind, wird darauf verzichtet, die Formel für die Situation des Schafts in der Scherfuge anzupassen.

1.2. Motivation und Zielsetzung der Arbeit

Die Diskrepanz zwischen den bisher gängigen Nachweisen und dem Nachweis im neu eingeführten Eurocode verblüfft, wäre doch zu erwarten, dass sich bei einem so grundlegendem Thema wie der Bemessung von Schrauben in Normenwerken eine nicht nur einfache, sondern auch gut fundierte Bemessungsregel zu findet. Dass die beiden Ansätze so weit auseinander liegen, legt die Vermutung nahe, dass mindestens einer der Ansätze diesen Anspruch nicht erfüllt.

Tatsächlich gehen sowohl die Interaktionsformeln aus der alten Deutschen DIN und den anderen europäischen Normen als auch die aus dem Eurocode auf eine erstaunlich geringe Anzahl von Versuchsergebnissen und Untersuchungen zu diesem Thema zurück. Wie im Verlauf dieser Arbeit gezeigt werden wird, ist gleichzeitig die Übertragbarkeit der betrachteten Versuche auf reale, eingebaute Schrauben teilweise fraglich.

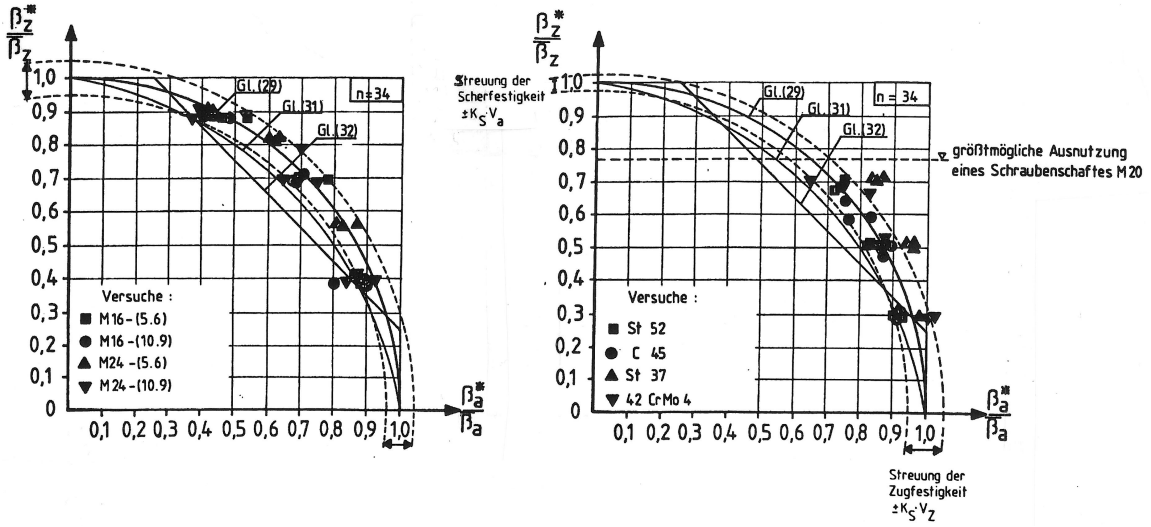


Abbildung 1.6.: Ergebnisgraphen der Versuche von Knobloch/Schmidt zum Interaktionstragverhalten[7]; links: Tests an Gewindestangen, rechts: an Rundstahlproben

Bild 1.6 zeigt die Ergebnisgraphen der bekanntesten deutschen Versuchsreihe zum Thema (auf die in Kapitel 3.3.5 noch genauer eingegangen wird). Die Ergebnisse weisen tatsächlich als quadratisch interpretierbare Zusammenhänge auf. Dass die Ergebniskurven einen ungefähren kreisförmigen Zusammenhang zeigen, reichte den Erstellern der „alten“ europäischen Normen aus, um den vermuteten quadratischen Zusammenhang als Bemessungsregel in ihre Normen aufzunehmen.

[6] Snijder u. a., *Background report EC3, Part A (1988)*, S. 42.
[7] Knobloch und Schmidt, *(1987)*

Bei der Erstellung der Eurocodes wurde ein anderer Ansatz verfolgt. Das Regelwerk wurde in den 1980er Jahren komplett neu aufgebaut. Jede einfließende Bemessungsregel sollte zunächst auf ihre Richtigkeit überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Diese Überprüfung wurde in Form einer statistischen Auswertung von zusammengetragenen und als geeignet empfundenen Versuchsdaten durchgeführt.

Als Bemessungsregel für Schrauben auf Interaktion wurden die quadratische Bedingung sowie eine vergleichbare, an die Bemessungsregel entsprechend Gleichung 1.5 aus dem British Standard angelehnte tri-linieare Bedingung vorgeschlagen. Da diese tri-lineare Bedingung etwas leichter in der Handhabung ist, weil für kleine Lastanteile der Interaktionsnachweis entfallen kann, wurde entschieden, diese Variante als Vorschlag für eine zukünftige Bemessungsregel zu übernehmen. Für die Validierung der Bemessungsregel wurden zwei Versuchsreihen[8,9] (siehe auch Kapitel 3.3.2 und 3.3.4) mit insgesamt ca. 150 Einzelversuchen (bei verschiedenen Verhältnissen von Zug- zu Scherkraft, verschiedenen Schraubenfestigkeiten und für Schrauben mit Schaft und mit Gewinde in der Scherfuge) herangezogen.

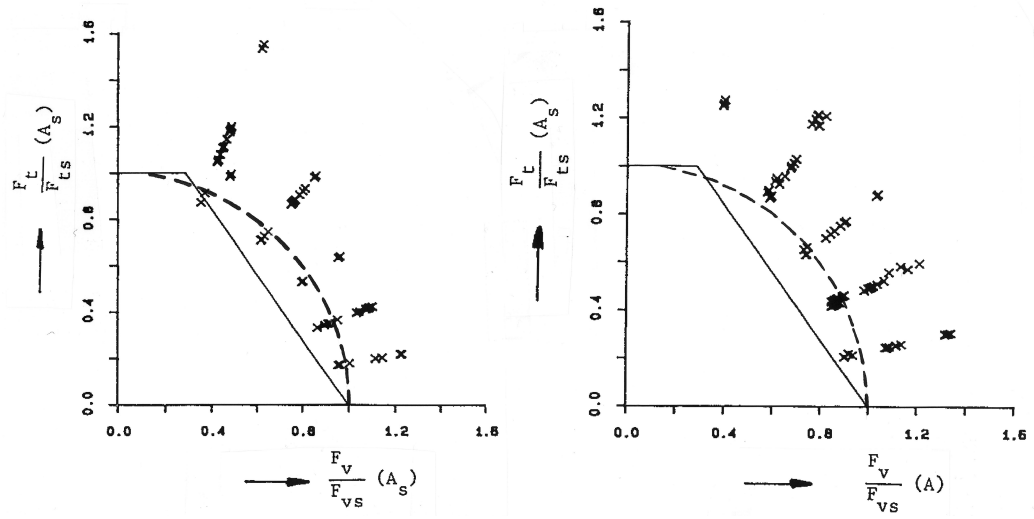


Abbildung 1.7.: Auswertungsgraphen der Validierung für den Eurocode nach Snijder u. a., *Background report EC3, Part A (1988)*, quadratische Kurve zum Vergleich ergänzt; links: Gewinde in der Scherfuge, rechts: Schaft in der Scherfuge

Das Vorgehen bei der Validierung ist in den Backgrounddokumenten zum Eurocode dargestellt[10,11,12]. Die Lesbarkeit dieser Dokumente lässt leider zu wünschen übrig: Bei der Dokumentation der Auswertung ist oft nicht klar erkennbar, welcher Wert zu welchem Versuch gehört und auf was die einzelnen Werte bezogen wurden. Bild 1.7 zeigt die Ergebnisse der Auswertung in den Backgrounddokumenten. Hier wurden alle ausgewerteten Versuche lediglich getrennt nach Versagen im Gewinde oder im Schaft in einen Graphen eingetragen

[8] Shakir-Khalil und Ho, „(1979)“.
[9] Bilderbeek, *(1971)*.
[10] Snijder u. a., *Background report EC3, Part A (1988)*.
[11] Snijder u. a., *Background report EC3, Part B (1988)*.
[12] Sedlacek und Schneider, *Background documentation to prEN 1993-1-8, third draft (2004)*.

und mit der neuen Interaktionskurve verglichen. Wird über diese Graphen die quadratische Interaktionskurve gelegt, so fällt tatsächlich auf, dass einige Werte nicht auf der sicheren Seite liegen.

Als Folge der statistischen Auswertung wurde von der tri-linearen Variante der quadratischen Funktion (vergleiche Gleichung 1.5 und Abbildung 1.4) der Bereich mit großen Scherkraftanteilen abgeschnitten und so die bi-lineare Funktion abgeleitet.

Welcher der eingetragenen Punkte in Abbildung 1.7 zu welcher Schraubenfestigkeit oder welcher Versuchsreihe gehört, lässt sich aus den Graphen leider nicht ablesen und ist auch mithilfe des Textes im Background Dokument nur bedingt nachvollziehbar.

Gleichzeitig fällt in den Graphen die große Streuung der ausgewerteten Ergebnisse auf. Diese erklärt sich daraus, dass die Versuchsergebnisse auf die Nennfestigkeiten der Schrauben bezogen wurden, anstatt auf die getesteten Festigkeiten der Versuchskörper selbst. Ob Versuchskörper mit einer solchen Materialstreuung überhaupt zur Auswertung geeignet sind, mag angezweifelt werden. In jedem Fall sollte aber die Streuung des Materials nicht mit in die Bewertung der Interaktionsgleichungen einfließen, sondern bei der Festlegung der reinen Tragfestigkeiten untersucht werden, auf die die Interaktionsbemessung letztendlich zurückgreift.

Trotz der Schwierigkeiten bei der Nachvollziehbarkeit der Entstehung der bi-linearen Interaktionsgleichung deuten die Auswertungen, die im Rahmen der Erstellung des Eurocodes vorgenommen wurden, an, dass der bisherige Umgang mit der Zug-Abscher-Interaktion in Schrauben, der die quadratische Interaktion als gegeben voraussetzte, die tatsächlichen Zusammenhänge nicht ausreichend berücksichtigt. Gleichzeitig scheint der Eurocode mit seiner statistisch begründeten Formel, der jeglicher mechanische Hintergrund fehlt, zu konservativ.

Die dürftige Grundlage an Forschungsergebnissen lässt eine fundierte Bewertung der Zusammenhänge bis heute nicht zu. Aus diesem Grund wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine eigene Versuchsreihe entwickelt und durchgeführt, bei der alle relevanten Versuchsparameter gezielt für die vorliegende Fragestellung festgelegt und ausgewertet werden können. Anhand einer anschließenden numerischen Simulation mithilfe der Methode der Finiten Elemente wird das Trag- und Verformungsverhalten von kombiniert belasteten Schrauben grundlegend beleuchtet und analysiert. Die gewonnenen Erkenntnisse aus Versuchs- und Simulationsergebnissen bieten eine umfangreiche und fundierte Basis, um zum Abschluss der Arbeit eine Empfehlung für eine zukünftige Normenregelung zu geben.

2. Schrauben im Stahlbau

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit den im Stahlhochbau typischerweise eingesetzten Sechskantschrauben mit metrischem ISO-Gewinde.

Zur besseren Einordnung werden in diesem Kapitel die Grundlagen, die für die vorliegende Untersuchung wichtigsten Merkmale und die zugrundeliegenden, aktuellen Normenwerke kurz dargestellt.

2.1. Eigenschaften von Schrauben

Grundlegend werden im Stahlbau Schrauben zunächst unterschieden durch
- die Geometrie und
- die Materialeigenschaften.

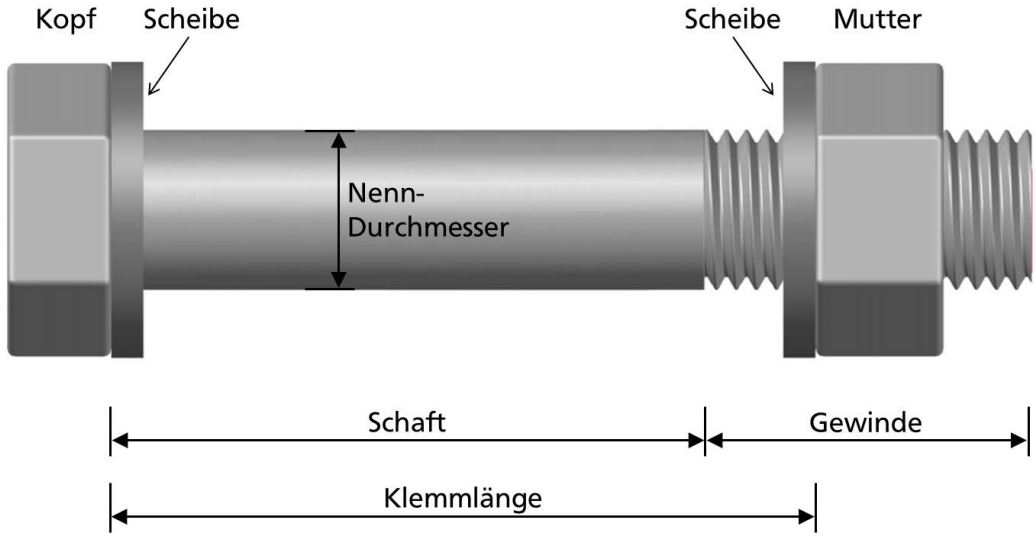


Abbildung 2.1.: Schraube - Garnitur mit Mutter und zwei Unterlegscheiben (dargestellt: EN 14399-4 — M20 x 115 — 10.9, maßstäblich)

Bei der Geometrie ist vor allem der Durchmesser der Schrauben charakteristisch. Es werden üblicherweise Schrauben mit Durchmessern von 12 bis 36 mm eingesetzt, die in 2 mm-Schritten beziehungsweise ab einem Duchmesser von 24 mm in 3 mm-Schritten genormt sind (Größere Schraubendurchmesser sind in der DASt-Richtlinie 021[1] geregelt).

Für Schrauben, die auf Abscheren, also senkrecht zu ihrer Achse, beansprucht werden, ist zudem entscheidend, ob das Gewinde in die Scherfuge hineinragt, oder ob sich dort

[1] DASt-Richtlinie 021, *Schraubenverbindungen aus feuerverzinkten Garnituren M 39 bis M 64.*

der gewindefreie Schaft befindet. Im zweiten Fall wird damit die Länge der Schraube entscheidend; der Schaftanteil ist so lang zu wählen, dass der Schaftquerschnitt in der Scherfuge liegt und gleichzeitig kurz genug, dass zum Aufdrehen der Mutter ausreichend Gewinde vorhanden ist.

Für verschiedene Schraubenlängen sind die Verhältnisse von Schaft zu Gewinde normativ vorgegeben. Daneben können auch Schrauben mit Vollgewinde zum Einsatz kommen.

Die Festigkeit der Schraube wird durch die Festigkeitsklasse angegeben. In Deutschland werden vor allem die Festigkeitsklassen 4.6, 5.6, 8.8 und 10.9 verwendet, in Europa sind zudem noch die Klassen 4.8, 5.8 und 6.8 für den Einsatz im Stahlhochbau normativ zugelassen. Die Benennung der Festigkeitsklasse enthält die Materialkennwerte, die erste Zahl gibt die nominelle Mindestzugfestigkeit f_u an (in $1/100 \cdot N/mm^2$), die zweite das 10fache des Verhältnisses der nominellen Streckgrenze f_y (bei hochfesten Schrauben der 0,2%-Dehngrenze $R_{p,0,2}$) zur nominellen Mindestzugfestigkeit.

Tabelle 2.1.: Übersicht über die in Deutschland gängigen Schrauben-Festigkeitsklassen nach DIN EN 1993-1-8[2], Tabelle 3.1

Festigkeitsklasse	4.6	5.6	8.8	10.9
Mindestzugfestigkeit f_u	400 N/mm^2	500 N/mm^2	800 N/mm^2	1000 N/mm^2
Streckgrenze f_y bzw. 0,2%-Dehngrenze $R_{p,0,2}$	240 N/mm^2	300 N/mm^2	640 N/mm^2	900 N/mm^2
Verhältnis $\frac{f_y \text{ bzw. } R_{p,0,2}}{f_u}$	60 %	60 %	80 %	90 %

Damit entspricht zum Beispiel die Festigkeitsklasse 4.6 in ihren Vorgaben für Streckgrenze und Zugfestigkeit in etwa einem Baustahl S235. Die Schrauben der Festigkeitsklassen 8.8 und 10.9 erreichen ihre hohe Festigkeit durch Vergütung. Über Stahlzusammensetzung und Art der Vergütung sagen die Bezeichnungen der Festigkeitsklassen nichts aus.

2.2. Normung von Schrauben

Durch die verschiedenen Anwendungsfelder und Entwicklungen bei Schrauben gibt es eine beachtliche Menge unterschiedlicher in Deutschland gültiger Normen, die die Anforderungen an Geometrie und Material von Schrauben regeln. Da die Schraube im Stahlbau ursprünglich als Ersatz für Niete gesehen wurde, hat die klassische Stahlbauschraube nur ein sehr kurzes Gewinde, sodass der Großteil des Schraubenlochs mit einem durchgehenden Querschnitt gefüllt ist.

Dies hat zur Folge, dass eine Vielzahl unterschiedlicher Schraubenlängen hergestellt werden muss, um die verschiedenen Klemmlängen abzudecken. Stahlbauschrauben sind daher in Abstufungen von 5 mm Länge genormt.

Seit der Überarbeitung von 1990[3] ist es auch nach der deutschen DIN zulässig, dass das Schraubengewinde weiter in das Schraubenloch hineinragt und auch in der Scherfuge liegt.

[2] DIN EN 1993-1-8:2012-10, *EC3 -Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen*, S. 24
[3] DIN 18800-1:1990-11, *Stahlbauten - Teil 1: Bemessung und Konstruktion.*

Ein Nachteil daraus für die Lochleibungstragfähigkeit konnte nicht festgestellt werden[4].

Dadurch ist es nun auch im Stahlhochbau zulässig, ursprünglich für den Maschinenbau vorgesehene Schrauben zu verwenden, die über einen längeren Gewindeanteil verfügen und damit flexibler einsetzbar sind, aber immer noch die Lage des Schafts in der Scherfuge erlauben[5]. Eine noch größere Flexibilität wird durch den Einsatz von Vollgewindeschrauben erreicht.

2.2.1. Die wichtigsten Normen zu Schrauben für den Stahlhochbau

Die im Stahlhochbau eingesetzten Schrauben sind üblicherweise Sechskantschrauben mit metrischem Gewinde. Die folgende Aufzählung umfasst die wichtigsten Normen, in denen diese gängigsten Schrauben beschrieben werden. Zu weiteren, seltener verwendeten Schrauben wie Passschrauben, Senkkopfschrauben oder Schrauben mit anderen Kopfgeometrien existieren gesonderte Normen.

DIN 7990[6]

„Sechskantschrauben mit Sechskantmutter für Stahlkonstruktionen“
ist die Norm, die die ursprünglich für den Stahlhochbau entwickelten Stahlbauschrauben regelt. Sie gilt für Schrauben der Festigkeiten 4.6 und 5.6 mit Schaft und Durchmessern von 12 bis 30 mm. Sie regelt die Geometrien für Schraubenlängen in 5 mm-Schritten.
Die Gewindelänge beträgt nur ca. die anderthalbfache Mutterhöhe. Die Schrauben werden zusammen mit Muttern nach DIN EN ISO 4032[7] oder 4034[8] und Scheiben nach DIN 7989-1[9] eingesetzt.

DIN EN ISO 4014[10]

„Sechskantschrauben mit Schaft“
regelt die ursprünglich im Maschinenbau eingesetzten Schrauben mit Schaft, deren Gewindeanteil länger ist, was ihren Einsatz flexibler macht. Sie gilt für Schrauben der Festigkeitsklassen 5.6 bis 10.9 und für alle im Stahlhochbau gängigen Durchmesser (12 bis 36 mm).
Die Gewindelänge beträgt hier grob das dreifache der Mutterhöhe und die Toleranzen zwischen minimaler und maximaler Gewindelänge sind deutlich größer. Schrauben nach dieser Norm sind ab einer Länge von 70 mm nur noch in 10 mm-Schritten genormt.

DIN EN ISO 4017[11]

„Mechanische Verbindungselemente - Sechskantschrauben mit Gewinde bis Kopf“
regelt Schrauben mit Vollgewinde. Auch hier gilt die Norm für die Festigkeitsklassen 5.6 bis

[4] Hasselmann und Valtinat, *(2002)*.
[5] Steurer, *(1996)*.
[6] DIN 7990:2008-04, *Sechskantschrauben mit Sechskantmutter für Stahlkonstruktionen.*
[7] DIN EN ISO 4032:2013-04, *Schraubenmuttern – Produktklassen A und B.*
[8] DIN EN ISO 4034:2013-04, *Schraubenmuttern – Produktklasse C.*
[9] DIN 7989:2001-04, *Scheiben für Stahlkonstruktionen.*
[10] DIN EN ISO 4014:2011-06, *Sechskantschrauben mit Schaft.*
[11] DIN EN ISO 4017:2014-10, *Sechskantschrauben mit Gewinde bis Kopf.*

10.9 und alle im Stahlhochbau gängigen Durchmesser.

Normengruppe DIN EN 14399

„Hochfeste planmäßig vorspannbare Schraubenverbindungen für den Metallbau“
umfasst die Regelungen für hochfeste Schrauben mit Schaft, Festigkeitsklasse 8.8 oder 10.9, die planmäßig vorgespannt werden können mit Durchmessern zwischen 12 und 36 mm. Die Gewindelänge ist etwas länger als bei Schrauben nach DIN 7990. Auch die weiteren Geometrieparameter wie Kopfhöhe oder Schlüsselweite unterscheiden sich leicht.
Für Schrauben, die planmäßig vorgespannt werden sollen, gelten ausführlichere Regelungen, da die Anforderungen für einen sicheren Einsatz deutlich höher sind. Die Norm umfasst 6 Einzelteile. Im Teil 1[12] sind die allgemeinen Anforderungen enthalten. Die in Deutschland hauptsächlich verwendeten Schrauben des HV-Systems mit Festigkeitsklasse 10.9 sind im Teil 4: „System HV – Garnituren aus Sechskantschrauben und -muttern“[13] beschrieben. Es werden grundsätzlich Garnituren aus Schraube und Mutter gemeinsam genormt und diese müssen als Set ausgeliefert werden, da ein gezieltes Aufbringen der Vorspannkraft nur bei kontrolliertem Zusammenspiel möglich ist. Als zusätzliche Sicherung gegen plötzliches Versagen ist die Mutterhöhe von HV-Schrauben so gewählt, dass beim Anziehen kurz vor Erreichen der eigentlichen Schraubentraglast das Gewinde abstreift.
Vorgespannte Verbindungen müssen grundsätzlich mit Scheiben unter Mutter und Kopf ausgeführt werden. Die den HV-Schrauben zugehörigen Scheiben sind in den Normteil 6[14] geregelt.
Die Normengruppe enthält neben den Geometrieangaben eine Vielzahl an Vorschriften zur Prüfung und Kennzeichnung der Schraubengarnituren.

DIN EN ISO 898-1[15]

„Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus Kohlenstoffstahl und legiertem Stahl – Teil 1: Schrauben mit festgelegten Festigkeitsklassen – Regelgewinde und Feingewinde“
enthält alle mechanischen, chemischen und physikalischen Angaben. Für alle Festigkeitsklassen sind die zulässigen Legierungsanteile und Mindest-Anlasstemperaturen zur Vergütung angegeben, außerdem die zu erreichenden mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Grundmaterials und der fertigen Schrauben sowie die Testverfahren, mit denen diese zu garantieren sind.

In Bild 2.2 sind die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen der vier Schrauben-Festigkeitsklassen 4.6, 5.6, 8.8 und 10.9 zum Vergleich schematisch dargestellt. Dabei sind die nach Tabelle 3 der Norm vorgegebenen Mindestwerte für die Streckgrenze f_y oder die 0,2%-Dehngrenze $R_{p,0,2}$,

[12] DIN EN 14399-1:2006-06, *Hochfeste planmäßig vorspannbare Schraubenverbindungen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen.*
[13] DIN EN 14399-4:2006-06, *Hochfeste planmäßig vorspannbare Schraubenverbindungen – Teil 4: System HV.*
[14] DIN EN 14399-6:2006-06, *Hochfeste planmäßig vorspannbare Schraubenverbindungen – Teil 6: Flache Scheiben mit Fase.*
[15] DIN EN ISO 898-1:2013-05, *Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen – Teil 1: Schrauben mit festgelegten Festigkeitsklassen.*

die Mindestzugfestigkeit f_u und die prozentuale Bruchdehnung, die an einer abgedrehten Probe gemessen wird, mit aufgetragen.

Die deutliche Versprödung, die mit der Steigerung der Festigkeit einhergeht, ist gut zu erkennen. Auch das Lüdersplateau, das bei niederfesten Schraubenfestigkeiten auftritt, fehlt bei den hochfesten Materialien.

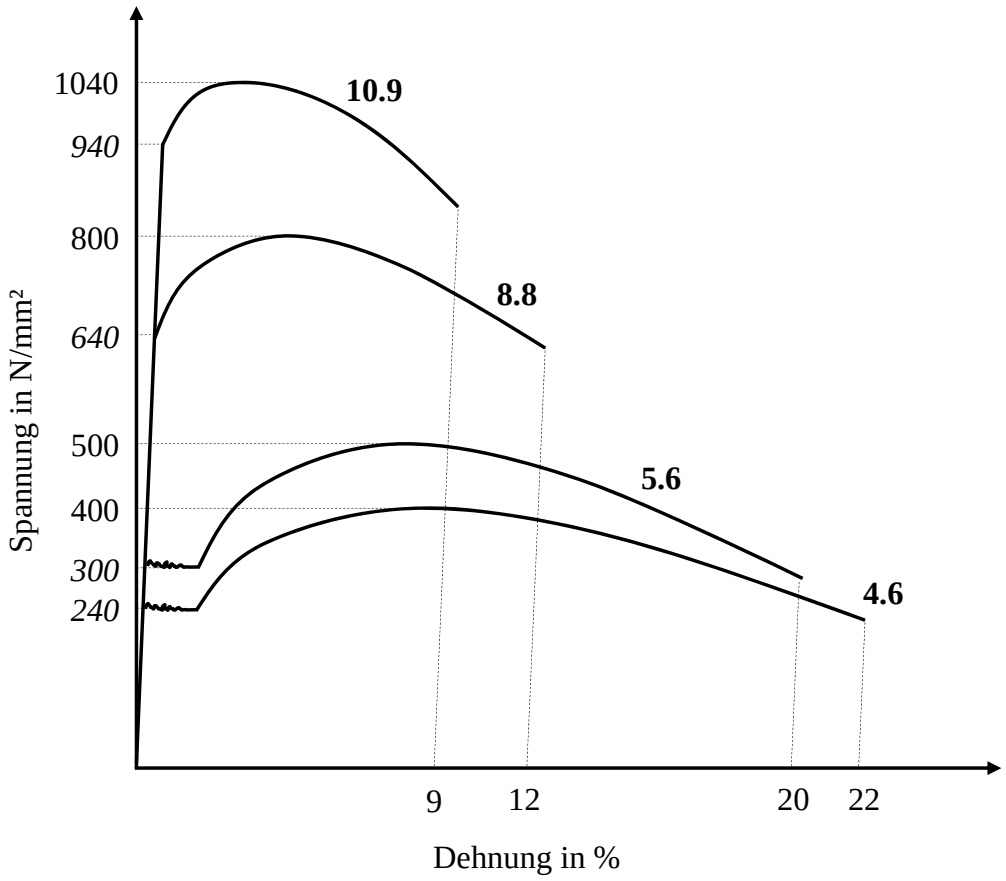


Abbildung 2.2.: Spannungs-Dehnungs-Beziehungen der gängigen Festigkeitsklassen im Vergleich, Mindestwerte nach DIN EN ISO 898-1, Tabelle 3[16]

2.2.2. Normen zur Bemessung von Schrauben

Die letztendlich in der Bemessung zu berücksichtigenden Randbedingungen und die normativen Widerstände der Schrauben sind in der jeweils gültigen Bemessungsnorm geregelt. In Deutschland und Europa ist die **DIN 1993-1-8**[17] *„Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen“* die hierfür geltende Norm. Bis

[16] DIN EN ISO 898-1:2013-05, *Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen – Teil 1: Schrauben mit festgelegten Festigkeitsklassen*, S. 13

[17] DIN EN 1993-1-8:2012-10, *EC3 -Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen.*

zu ihrer baurechtlichen Einführung galt in Deutschland die **DIN 18800-1**[18] *„Stahlbauten - Bemessung und Konstruktion“.*

2.3. Tragverhalten und Traglasten von Schrauben

2.3.1. Schrauben auf Zug

Eine Schraube mit gängiger Stahlbauschraubengeometrie wie oben beschrieben und mit homogenem Material wird unter Belastung in ihrer Längsachse in ihrem schwächsten Querschnitt, also im Gewinde, versagen.

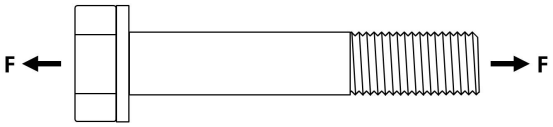


Abbildung 2.3.: Schraube mit axialer Belastung

Die maximale reine Zugtragfähigkeit von Schrauben lässt sich direkt aus der Bruchgrenze f_u und der Querschnittsfläche des Gewindes bestimmen.

$$N_{max} = f_u \cdot A_s \tag{2.1}$$

Durch die Behinderung der Querkontraktion, die das Gewinde auf den Kernquerschnitt ausübt, ist die tatsächlich aufnehmbare Last größer als die Traglast des Kernquerschnitts. Vereinfacht wird deshalb der fiktive Spannungsquerschnitt A_s verwendet, der sich aus der Mittlung von Flanken- und Kerndurchmesser ergibt. Dadurch können die komplexe Gewindegeometrie und die auftretenden Spannungsspitzen und Verfestigungen aus der Kerbwirkung vernachlässigt werden.[19]

Ist die Anzahl der freien Gewindegänge unter der Mutter sehr gering, wird der Effekt aus der Querkontraktionsbehinderung verstärkt. Es kommt zu einer Vergrößerung der aufnehmbaren Kraft, da die Entlastungswirkung durch die benachbarten Gewindegänge entfällt[20]. Diese Traglaststeigerung wird im Nachweis vernachlässigt, kann aber bei Versuchen mit auf Zug belasteten Schrauben entscheidend sein, da bei zu geringer freier Gewindelänge eine höhere Bruchlast erreicht wird.

Die normative Beanspruchbarkeit, die im Nachweis anzusetzen ist, wird noch mit Sicherheitsbeiwerten und Korrekturfaktoren abgemindert. In der DIN EN 1993-1-8 Tabelle 3.4[21] wird die maximale Zugbeanspruchbarkeit $F_{t,Rd}$ (tension, resistance design) bestimmt mit

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_u \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \tag{2.2}$$

[18] DIN 18800-1:2008-11, *Stahlbauten - Teil 1: Bemessung und Konstruktion.*
[19] Genauere Hintergründe zu A_s finden sich z.B. in Steurer, *(1996)*, S. 13 ff oder Petersen, *(1997)*, S. 493.
[20] Kloos und Thomala, *(2007)*, S141 ff.
[21] DIN EN 1993-1-8:2012-10, *EC3 -Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen.*

Dabei ist $\gamma_{M2} = 1,25$ der Sicherheitsbeiwert, der in DIN EN 1993-1-8[22] für alle gegen die Bruchlast abgegrenzten Stahlbauteile verwendet wird und dem γ_{M2} in DIN EN 1993-1-1[23], dem „Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchbarkeit von Querschnitten bei Bruchversagen infolge Zugbeanspruchung“, entspricht.

In der DIN 18800-1[24] wurde die Zugbeanspruchbarkeit $N_{R,d}$ in Element (809) ermittelt mit

$$N_{R,d} = min \begin{cases} A_{Sp} \cdot \frac{f_u}{1{,}25 \cdot \gamma_M} \\ A_{Sch} \cdot \frac{f_y}{1{,}1 \cdot \gamma_M} \end{cases} \tag{2.3}$$

Der Spannungsquerschnitt wurde hier A_{Sp} genannt. In der DIN 18800-1 gab es nur einen Teilsicherheitsbeiwert für den Materialwiderstand $\gamma_M = 1,1$. Zusammen mit dem Korrekturfaktor 1,25, der hier unter dem Bruchstrich steht, ergab sich somit beinahe die gleiche Zugbeanspruchbarkeit wie nach DIN EN 1993-1-8.

Die DIN 18800-1 gab allerdings noch eine zweite Grenze an, die Fließen im Schraubenschaft verbot. Hierin wird der Querschnitt des Schraubenschafts (hier A_{Sch} genannt) mit der Streckgrenze f_y multipliziert. Der Korrekturfaktor beträgt hier nur 1,1. Für Schrauben der niedrigen Festigkeitsklassen 4.6 und 5.6 wird dieser Wert maßgebend, da das Verhältnis von Streckgrenze zu Zugfestigkeit geringer ist. Durch den Wegfall dieser Grenze lässt der Eurocode im Vergleich zur DIN 18800-1 für niederfeste Schrauben eine um ca. 13% höhere Zugbeanspruchbarkeit zu.

2.3.2. Schrauben auf Abscheren

Wird eine Schraube orthogonal zu ihrer Achse belastet, so schert sie in der Scherfuge/den Scherfugen ab.

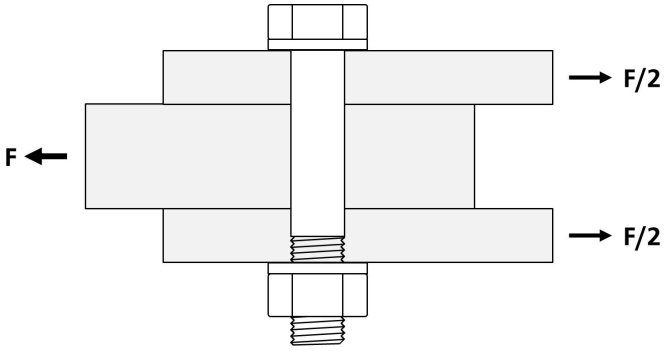


Abbildung 2.4.: Schraube mit Belastung senkrecht zu ihrer Achse, zweischnittig

Dabei hängt die Tragfähigkeit einer Schraube von der Anzahl der Scherfugen, der sogenannten „Schnittigkeit“, und vom in der Scherfuge befindlichen Querschnitt (Schaft oder Gewinde) ab. Üblicherweise wird die Abschertragfähigkeit pro Scherfuge betrachtet.

[22] DIN EN 1993-1-8:2012-10, *EC3 -Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen.*
[23] DIN EN 1993-1-1:2012-10, *EC3 - Teil 1-1: allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.*
[24] DIN 18800-1:2008-11, *Stahlbauten - Teil 1: Bemessung und Konstruktion.*

Die maximale reine Abschertragfähigkeit pro Scherfuge lässt sich mit der in der Scherfuge vorhandenen Querschnittsfläche A (Schaftquerschnitt oder Spannungsquerschnitt) und der plastischen Schubfestigkeit τ_u des Schraubenmaterials bestimmen. Die plastische Schubfestigkeit wird nicht direkt angegeben, sondern über den Festigkeitskoeffizienten α_v (in der DIN 18800-1 α_a), das Verhältnis von Schubfestigkeit zur Zugfestigkeit f_u.

Damit ergibt sich die Abschertragfähigkeit zu

$$V_{max} = \alpha_v \cdot f_u \cdot A \tag{2.4}$$

Die Scherfestigkeit wird über Scherversuche bestimmt. Diese werden zweischnittig ausgeführt, da bei einschnittigen Konstellationen durch die Verdrehung der Schrauben zu ihrer Achse kein reines Abscheren vorliegt. Bei einschnittigen Versuchen werden dadurch höhere Versagenslasten erzielt.

Die Scherfestigkeit ist abhängig vom plastischen Verformungsvermögen des Werkstoffs. Da das plastische Verformungsvermögen für den genormten Stahl von Stahlschrauben aber mit der Zugfestigkeit korreliert, ist die Verwendung eines Festigkeitskoeffizienten, der die Schubfestigkeit zur Zugfestigkeit f_u in Bezug setzt, gerechtfertigt[25]. Für die gängigen Festigkeitsklassen liegt der tatsächliche Festigkeitskoeffizient in etwa zwischen 0,6 und 0,8, niederfeste Schrauben erreichen dabei höhere Festigkeitskoeffizienten.

In der DIN EN 1993-1-8 wird der Festigkeitskoeffizient α_v unabhängig von der Festigkeitsklasse auf 0,6 gesetzt. Lediglich für Schrauben mit Gewinde in der Scherfuge und der Festigkeitsklasse 10.9 oder den in Deutschland unüblichen Festigkeitsklassen 4.8, 5.8 und 6.8 ist er mit 0,5 anzusetzen.

Die maximal ansetzbare Abschertragfähigkeit je Scherfuge $F_{v,Rd}$ wird nach DIN EN 1993-1-8 Tabelle 3.4 berechnet mit

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_u \cdot A}{\gamma_{M2}} \tag{2.5}$$

Für A ist der in der Scherfuge befindliche Querschnitt einzusetzen, der Sicherheitsbeiwert $\gamma_{M2} = 1,25$ ist der Gleiche, der auch für die Zugbeanspruchbarkeit zu berücksichtigen ist.

Die Berechnungsformel der Abschertragfähigkeit $V_{a,R,d}$ der DIN 18800-1 sieht identisch aus

$$V_{a,R,d} = \frac{\alpha_a \cdot f_u \cdot A}{\gamma_M} \tag{2.6}$$

verwendet aber auch hier den Sicherheitsbeiwert γ_M=1,1, ohne, wie bei der Zugtragfähigkeit, einen weiteren Korrekturfaktor anzuwenden, so dass sich höhere Tragfähigkeiten ergeben. Der Festigkeitskoeffizient (hier α_a) ist für die Festigkeitsklassen bis 8.8 mit 0,6 angegeben, für die Festigkeitsklasse 10.9 ist er bei „Schaft in der Scherfuge“ mit 0,55, bei „Gewinde in der Scherfuge“ mit 0,44 anzusetzen.

[25] Knobloch, *(1990)*, Kapitel 4.

2.3.3. Schrauben auf Zug und Abscheren

Treten Zug und Abscheren gleichzeitig in einer Schraube auf, so muss zur Ermittlung der Tragfähigkeit eine Interaktion zwischen beiden Komponenten berücksichtigt werden. Die maximal aufnehmbare Abscherlast wird gegenüber einer reinen Belastung auf Abscheren durch das Auftreten einer zusätzlichen Zuglast vermindert und umgekehrt.

Für die Nachweisführung wird ein Kombinationsnachweis benötigt, der die Interaktion der beiden Belastungen berücksichtigt. Die Interaktionsbedingungen aus DIN EN 1993-1-8 und DIN 18800-1 sind bereits in Kapitel 1.1 dargestellt und diskutiert worden. Beide Normenwerke verwenden in ihren Interaktionsbedingungen die oben beschriebenen maximalen Tragfähigkeiten.

3. Bisherige Untersuchungen und Stand der Forschung

Schrauben für den Stahlhochbau unter reinem Zug oder reiner Scherbelastung waren und sind Gegenstand zahlreicher, umfangreicher Versuchsreihen und Untersuchungen (siehe z.B. die Arbeiten von Steurer[1] oder Knobloch[2]). Die Anzahl der Untersuchungen zu Schrauben unter kombinierter Zug-Abscher-Last ist jedoch überschaubar.

Dies mag zunächst verwundern, lässt sich aber auf drei Gründe zurückführen[3]: Erstens liegt es nahe, zunächst die grundlegenden Trageigenschaften unter reinen Belastungen verlässlich und vollständig zu untersuchen und zu beschreiben. Zweitens ist in kleineren, alltäglichen Anschlüssen das gleichzeitige Auftreten von Zug und Abscheren bei der Bemessung einer Schraube ein Sonderfall (was natürlich nicht bedeutet, dass seine Betrachtung vernachlässigt werden kann). Drittens ist die Durchführung von Versuchen an Schrauben mit kombinierter Last vergleichsweise aufwendig, da vor allem die Einleitung der zwei Lastanteile in die kleinen Probekörper einen aufwendigen Versuchsaufbau erfordert.

Teilweise sind die vorhandenen Versuchsreihen Unterversuchsreihen von größeren Studien. Bis auf eine Studie aus den 1980er Jahren wurden alle bestehenden Versuchsreihen in den 1960er und 70er Jahren durchgeführt.

Nachfolgend sollen zunächst die Möglichkeiten zur technischen Umsetzung von Interaktionsversuchen und die sich ergebenden Schwierigkeiten erläutert werden. Anschließend werden die vorliegenden Studien beschrieben und zusammengefasst.

3.1. Möglichkeiten zur Durchführung von Interaktionsversuchen

Ziel des Interaktionsversuchs ist es, das Tragverhalten der Schraube selbst, isoliert vom Anschluss in dem sie die Last erfährt, zu untersuchen. Die Konzeption des Versuchsaufbaus muss also ermöglichen, dass die Schraube mit den zu untersuchenden Lastkomponenten möglichst wirklichkeitsnah belastet wird.

Es lassen sich drei Wege zur Lastaufbringung unterscheiden. Diese sind in Abbildung 3.1 dargestellt.

Werden die beiden Lastkomponenten nacheinander aufgebracht, kann zunächst die Zugkraft aufgebracht werden, die ein definiertes Level der Zugausnutzung hervorruft. Anschließend wird durch eine Scherlast die Schraube zum Abscheren gebracht und damit die hierfür benötigte Scherkraft bestimmt (Abbildung 3.1, links). Als zweiter Weg wäre die Umkehrung der Reihenfolge der Lastaufbringung denkbar (Abbildung 3.1 , Mitte). Dieser Weg ist allerdings nur theoretischer Natur, da eine zuerst aufgebrachte Scherkraft den Probekörper

[1] Steurer, *(1996)*.
[2] Knobloch, *(1990)*.
[3] Renner und Lange, *(2014)*.

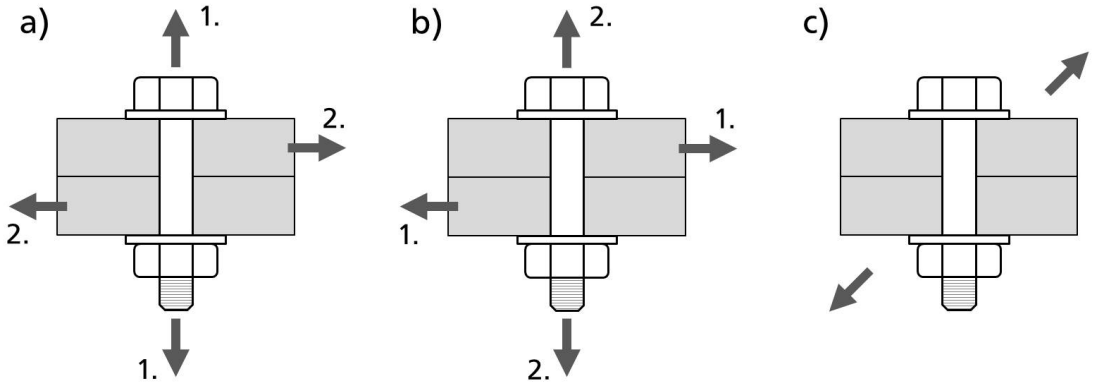


Abbildung 3.1.: Wege zur Lastaufbringung: a) zuerst Zug-, dann Scher-Komponente, b) zuerst Scher-, dann Zug-Kompontente, c) schräg angreifende Last [4]

soweit verformen würde, dass ein anschließendes Aufbringen einer Zuglast behindert wäre. Als dritte Möglichkeit kann die Last in einem Winkel zur Schraubenachse aufgebracht werden (Abbildung 3.1, rechts). Für die Aufteilung in Zug- und Abscherkomponente kann die so bestimmte Versagenslast vektoriell zerlegt werden.

3.1.1. Versuche mit nacheinander aufgebrachten Lastkomponenten

Um eine Zugkomponente einzuleiten, muss die Schraube an Kopf und Mutter gefasst und auseinandergezogen werden. Da der zur Verfügung stehende Platz durch die geringen Klemmlängen das Greifen schwierig macht, wird in den Versuchsreihen, die die Lastkomponenten getrennt voneinander aufbringen, dieses Problem der Lasteinleitung umgangen, indem anstelle von Schrauben Rundstäbe oder Gewindestangen als Probekörper verwendet werden. Diese können in die gängigen Zugprüfrahmen eingespannt werden.

Die Scherkraft muss durch zwei oder mehr Scherplatten mit Schraubenloch aufgebracht werden, durch die der Probekörper geführt wird. Das Verschieben der Platten gegeneinander erzeugt die Scherkraft in der Probe.

Für eine Versuchsanordnung mit Stangen als Probekörper ist das Aufbringen einer einschnittigen Scherlast schwer möglich, da die zwei Platten die Stange aus dem Zugrahmen herausziehen würden. In den Versuchsreihen, die Stangen als Probekörper verwendeten, wurden daher immer zweischnittige Schervorrichtungen verwendet.

Abbildung 3.2 zeigt das Prinzip dieser Tests. Die beiden Lastanteile werden unabhängig voneinander aufgebracht. Zunächst wird die Zugkraft bis zu einem definierten Ausnutzungsgrad der reinen Zugtragfähigkeit aufgebracht. Anschließend wird durch Verfahren der mittleren Platte die Stange bis zum Versagen auf Abscheren belastet und damit die zugehörige, aufnehmbare Scherlast ermittelt.

[4] Renner und Lange, *(2013)*

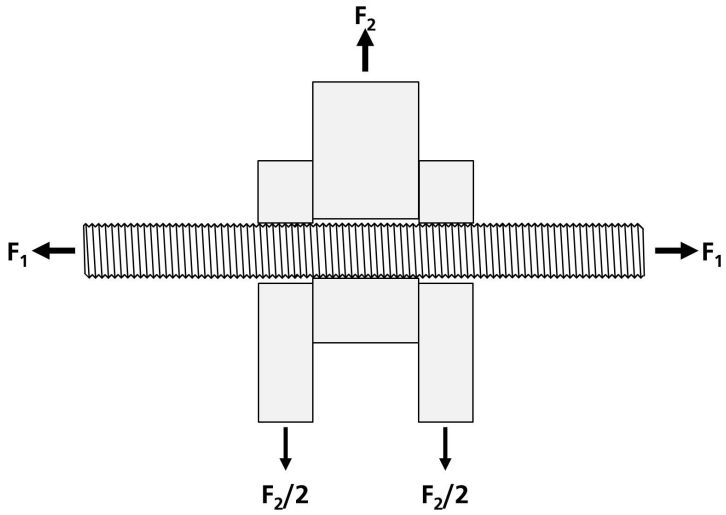


Abbildung 3.2.: Prinzip der Tests an Rundstäben oder Gewindestangen mit zweischnittiger Schervorrichtung

3.1.2. Versuche mit Belastung im Winkel zur Schraubenachse

Anschlüsse, in denen die Schrauben eine reine Zug- oder eine kombinierte Last erfahren, sind in den seltensten Fällen zwei- oder mehrschnittig. Normalerweise verhindert eine auf Zug belastete Schraube das Auseinandergehen zweier miteinander verschraubter Platten. Muss zusätzlich eine Verschiebung der Platten zueinander verhindert werden, bekommt die Schraube eine kombinierte Last. Relativ zur Schraubenachse gesehen werden die beiden Platten schräg auseinander gezogen, wie in Abbildung 3.3 dargestellt.

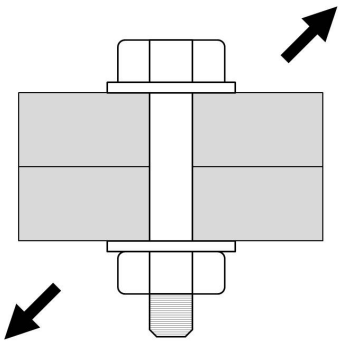


Abbildung 3.3.: Schraube verschraubt zwei Platten, die schräg auseinander gezogen werden. Die Schraube erfährt eine kombinierte Last.

Übertragen auf einen Interaktionsversuch bedeutet das, dass nach diesem Prinzip die Tests an echten Schrauben (anstelle von Stangen) als Garnitur verschraubt mit Mutter durchgeführt werden können. Die auseinanderziehende Kraft wird zur späteren Betrachtung

in einen Zug- und einen Scheranteil zerlegt. Über die Änderung des Winkels der angreifenden Kraft können verschiedene Zug-zu-Scherkraft-Verhältnisse erzielt werden, von einem Winkel von 0° zur Schraubenachse, was reinem Zug entspricht, bis zu einem Winkel von 90°, was reinem, einschnittigem Abscheren entspricht.

Die Einleitung der Kraft in die Platte erfordert im Versuchsaufbau den größten Konstruktionsaufwand. Dieser wird vor allem dadurch gesteigert, dass für jeden zu testenden Winkel eine andere Lasteinleitung realisiert werden muss.

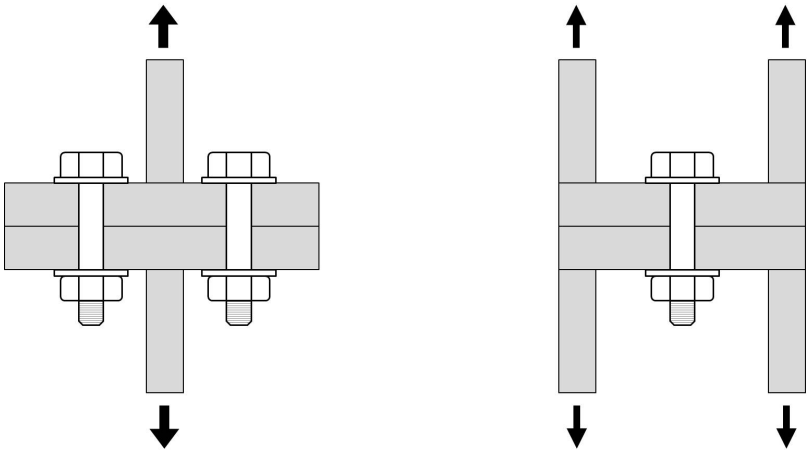


Abbildung 3.4.: Einleitung der Last in die Platten, links: T-Stummel mit zwei Schrauben, rechts: U-Stummel zum Testen von nur einer Schraube

Prinzipiell kann die Lasteinleitung über zwei „T-Stummel“ geschehen, wie in Abbildung 3.4 links dargestellt, was aber den Nachteil hat, dass immer zwei Schrauben gleichzeitig getestet werden müssen. Alternativ kann die Konstruktion als „U-Stummel“ erfolgen (Abbildung 3.4 rechts), so dass nur eine Schraube getestet wird. Dadurch wird die Konstruktion der Lasteinleitung aufwendiger.

Die Variante des Versuchsaufbaus mit einem T-Stummel wurde nur in einer der bestehenden Versuchsserien umgesetzt. Die beiden größten Studien, die Tests an Schraubengarnituren durchführten, verwendeten eine Apparatur, die auf dem Konzept des U-Stummels basiert.

3.2. Übersicht über die bestehenden Untersuchungen

Insgesamt liegen fünf Arbeiten mit Versuchsreihen zu kombiniert belasteten Schrauben vor.

Die ersten beiden Studien, durchgeführt Mitte und Ende der 1960er Jahre in den USA und in den Niederlanden (Chesson u.a.[5] und Bilderbeek[6]), führten Versuche mit Schraubengarnituren durch. Die Versuchsaufbauten basierten auf dem im vorangegangenen Kapitel beschriebenen U-Stummel-Prinzip. Die ähnlich konstruierten Versuchsaufbauten sind in den Abbildungen 3.5 und 3.6 zu sehen.

[5] Chesson u. a., „(1965)“.
[6] Bilderbeek, *(1971)*.

Eine kleinere Studie wurde Mitte der 1970er Jahre in Großbritannien von Shakir-Khalil und Ho[7] durchgeführt. Auch hier wurden die Tests an Schraubengarnituren durchgeführt, allerdings beruhte die Versuchskonstruktion (Abbildung 3.8) auf dem T-Stummel-Prinzip, was sie vereinfachte gegenüber Chessons und Bilderbeeks Versuchsaufbauten, aber zur Folge hatte, dass immer zwei Schrauben gleichzeitig getestet werden mussten, was die Interpretation des Versagensmechanismus erschwert.

Shakir-Khalil und Ho sind die einzigen, die auch eine kleine Versuchsreihe an ganzen Anschlüssen durchführten, bei denen sie die Schrauben am Zugflansch eines Stirnplattenstoßes zwischen zwei Trägern untersuchten. Der Aufbau ist in Abbildung 3.9 zu sehen.

In Deutschland wurden bisher zwei Studien zum Interaktionstragverhalten von Schrauben durchgeführt (Hassler[8] und Knobloch und Schmidt[9]). In beiden wurden nicht Schrauben sondern Rundstahl- oder Gewindestangen als Probekörper verwendet und die Versuche nach dem in Abbildung 3.2 gezeigten Verfahren durchgeführt.

Hasslers Tests fanden Anfang der 1970er Jahre statt. Knobloch und Schmidt führten Mitte der 1980er Jahre eine Vielzahl von Versuchen zum Tragverhalten von Schrauben unter reiner Scherbelastung durch. Dieses Forschungsvorhaben[10,11,12] war Teil der grundlegenden Überarbeitung der Nachweisführung von Schrauben für die Neuauflage der deutschen DIN 18800[13]. In diesem Rahmen wurde auch eine kleinere Studie zum kombinierten Tragverhalten mit durchgeführt, um eine Aussage für eine mögliche Bemessungsregel in der Norm treffen zu können.

Auf den folgenden Seiten werden die einzelnen Versuchsreihen mit allen relevanten Daten zusammengefasst. Auf die Ergebnisse und deren Auswertung in den einzelnen Arbeiten wird im Anschluss eingegangen.

[7] Shakir-Khalil und Ho, „(1979)“.
[8] Hassler, *(1973)*.
[9] Knobloch und Schmidt, *(1987)*.
[10] Knobloch und Schmidt, *(1987)*.
[11] Knobloch und Schmidt, *(1990)*.
[12] Knobloch, *(1990)*.
[13] DIN 18800-1:1990-11, *Stahlbauten - Teil 1: Bemessung und Konstruktion*.

3.2.1. Chesson u.a., Illinois, USA[14]

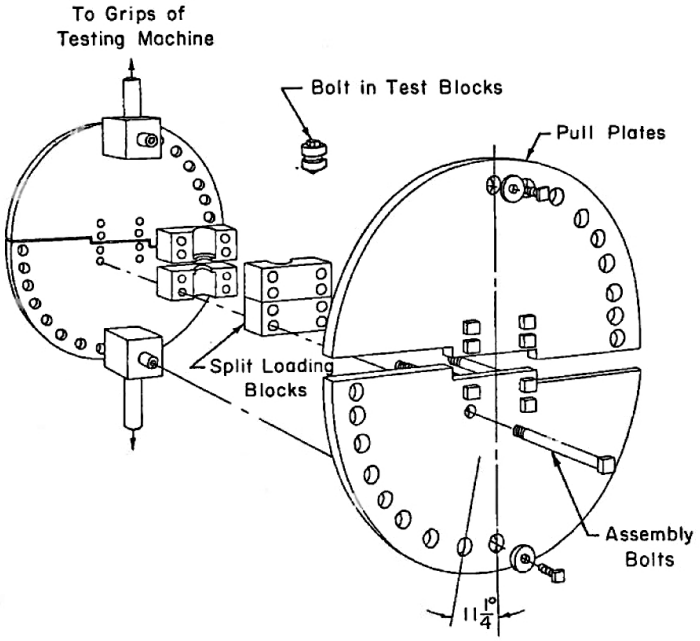


Abbildung 3.5.: Versuchsaufbau Chesson u.a., Schraube in austauschbarem Block zwischen zwei Platten, Variation des Kraftwinkels durch Nutzung anderer Scheibenrandlöcher zur Lasteinleitung

Versuche:	1-schnittig an Schraubengarnituren, insgesamt 115 Versuche
Festigkeiten:	amerikanische Schraubenfestigkeiten: A325 low hardness, A325 high hardness, A354 BD (A325: f_y 531 - 607 $\frac{N}{mm^2}$, f_u 724 - 827 $\frac{N}{mm^2}$ A354 BD: f_y 683 - 752 $\frac{N}{mm^2}$, f_u 793 - 862 $\frac{N}{mm^2}$)
Durchmesser:	3/4 inch (19,05 mm, A = 2,850 cm^2, A_S = 2,4219 cm^2) 1 inch (25,4 mm, A = 5,067 cm^2, A_S = 4,306 cm^2)
getestete Winkel:	0° (reiner Zug), 11, 25°, 22, 5°, 33, 75°, 45°, 67, 5°, 90° (reines Abscheren, 1-schnittig)
Zugproben:	nein
Härteverteilung:	nein
Abscheren 2-schnittig:	nein
Besondere Tests:	• Variation des Blockmaterials • Variation der Klemmlänge

[14] Chesson u. a., „(1965)“.

3.2.2. Bilderbeek, Delft, Niederlande[15]

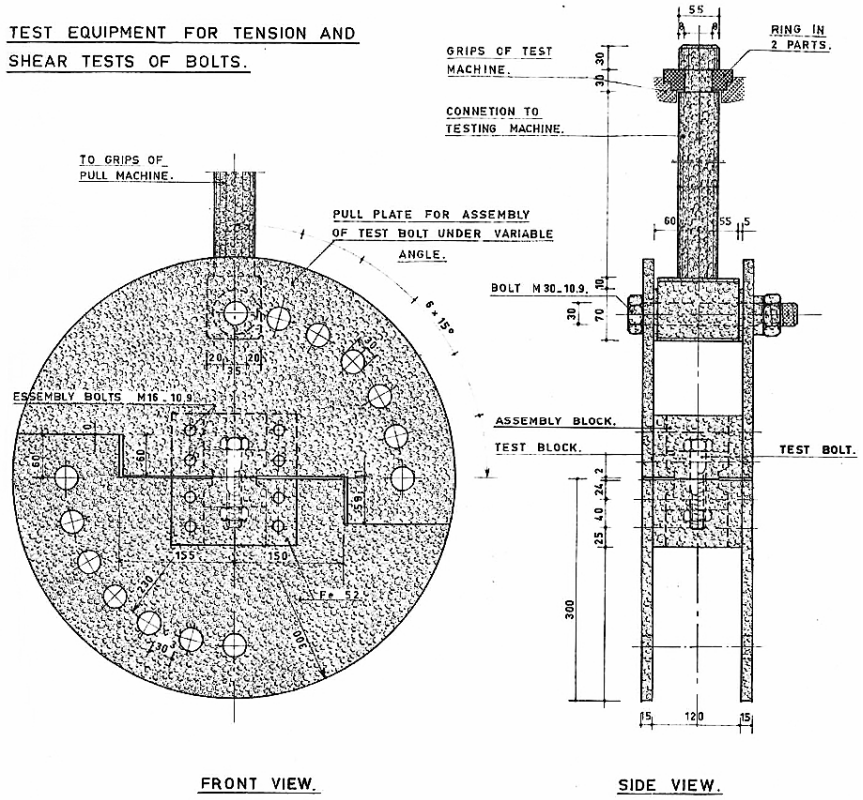


Abbildung 3.6.: Versuchsaufbau Bilderbeek, gleiches Prinzip wie Chesson (Abb. 3.5)

Versuche:	1-schnittig an Schraubengarnituren, insgesamt 175 Versuche
Festigkeiten:	4.6, 8.8 und 10.9
Schraubentyp:	M 12 und M 20
getestete Winkel:	0° (reiner Zug), 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90° (reines Abscheren, 1-schnittig)
Zugproben:	ja
Härteverteilung:	nein
Abscheren 2-schnittig:	teilweise, aber nicht plausibel zuordenbar
Besondere Tests:	• Variation des Blockmaterials • einige Versuche mit Vorspannung

[15] Bilderbeek, *(1971)*.

3.2.3. Hassler, Stuttgart[16]

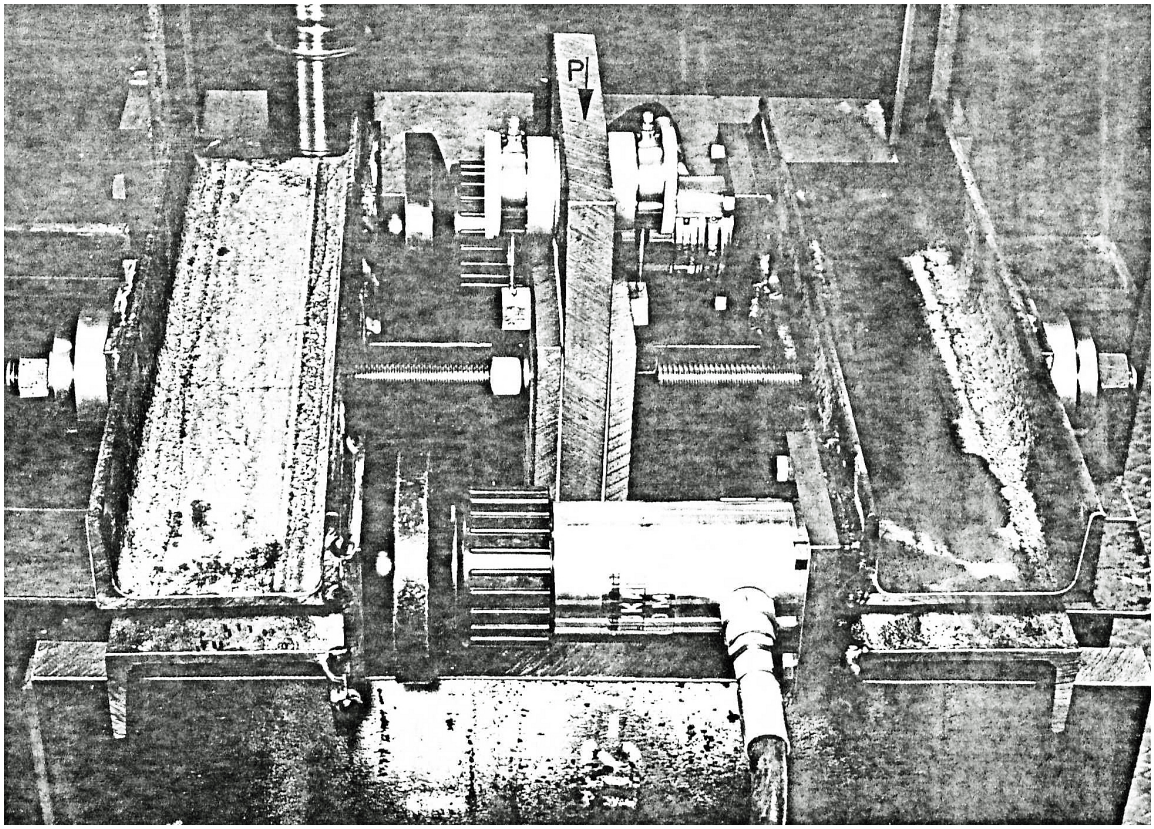


Abbildung 3.7.: Versuchsaufbau Hassler, Aufbringen der Zuglast auf eingespannte Gewindestange durch Pressen im Rahmen, dann Aufbringen der Abscherlast zweischnittig durch Verschieben der mittleren Platte

Versuche:	2-schnittig an aus Rundstahl gefertigten Probekörpern, insgesamt 25 Versuche
Festigkeit:	4.6
Durchmesser:	24 mm
getestete Verhältnisse:	reiner Zug, 75% Zug, 50% Zug, 25% Zug, reines Abscheren
Zugproben:	an Rundstäben ⌀24 mm, bevor Gewinde aufgeschnitten wurde
Härteverteilung:	nein
Besonderheit:	• ausschließlich Schaft in Scherfugen

[16] Hassler, *(1973)*.

3.2.4. Shakir-Khalil und Ho, Versuche an Schrauben, Manchester, Großbritannien[17]

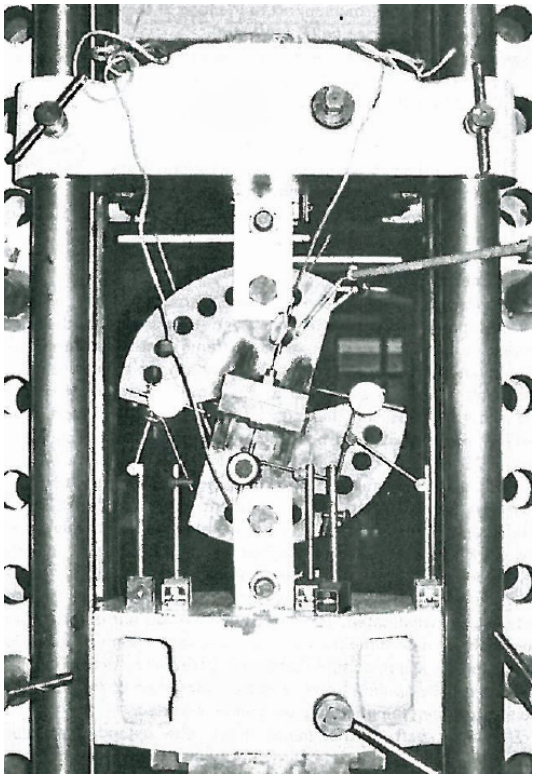


Abbildung 3.8.: Versuchsaufbau Shakir-Khalil und Ho, T-Stummel mit zwei Schrauben, Variation des Kraftwinkels durch Nutzung anderer Löcher zur Lasteinleitung

Versuche:	1-schnittig an Schraubengarniturpaaren, insgesamt 51 Versuche
Festigkeit:	4.6
Schraubentyp:	M 20
getestete Winkel:	0° (reiner Zug), 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90° (reines Abscheren, 1-schnittig)
Zugproben:	ja
Härteverteilung:	nein
Abscheren 2-schnittig:	nein
Besonderheit:	• Testaufbau testet immer 2 Schrauben gleichzeitig (T-Stummel) • für „Gewinde in Scherfuge“ Gewinde nachgeschnitten

[17] Shakir-Khalil und Ho, „(1979)“.

3.2.5. Shakir-Khalil und Ho, Versuche an Anschlüssen, Manchester, Großbritannien[18]

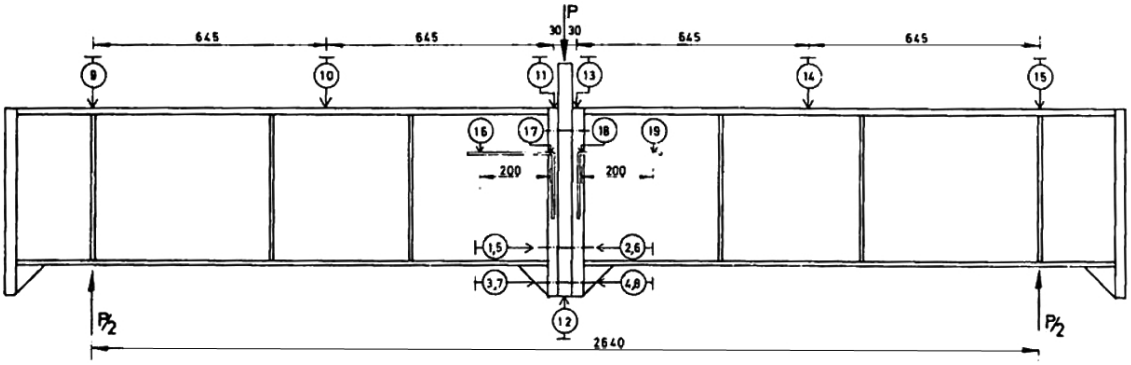


Abbildung 3.9.: Versuchsaufbau Anschlussversuche Shakir-Khalil und Ho, biegesteifer Stirnplattenstoß mit dazwischen geschraubter Platte zur Lasteinleitung, obere Schrauben in Langlöchern (nur Lagesicherung), dadurch Zug und Abscheren in unteren 4 Schrauben, Variation des Verhältnisses durch Variation der Stützweite

Versuche:	2-schnittig im Anschluss mit jeweils 4 Schrauben, insgesamt 5 Versuche
Festigkeit:	4.6
Schraubentyp:	M 20
theoretische Zug-Abscher-Verhältnisse:	1:0,27 ($\sim 15°$), 1:0,47 ($\sim 25°$), 1:0,84 ($\sim 40°$) und 0,7:1 ($\sim 55°$)
Zugproben:	ja
Härteverteilung:	nein

[18] Shakir-Khalil und Ho, „(1979)“.

3.2.6. Knobloch und Schmidt, Essen[19]

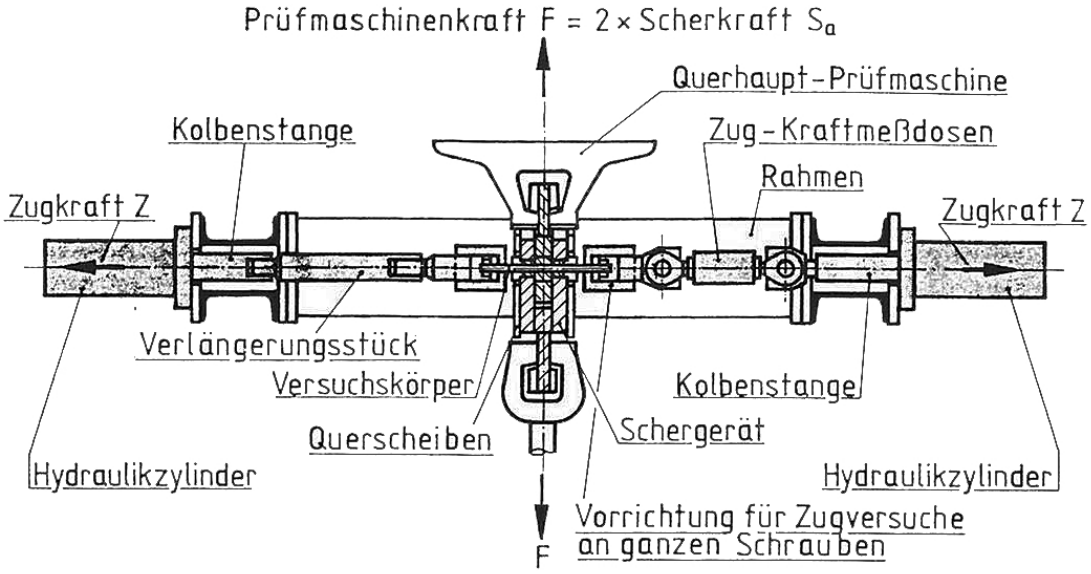


Abbildung 3.10.: Versuchsaufbau Knobloch und Schmidt, Aufbringen der Zuglast auf eingespannte Stange, dann Aufbringen der Abscherlast zweischnittig durch Scherapparat

Versuche:	2-schnittig an Rundstahl- und Gewindestangen, insgesamt 68 Versuche
Festigkeiten:	Rundstahl: St 37-2 (∼ 4.6), St 52-3 (∼ 5.6), C 45 (∼ 8.8) und 42 CrMo 4 (∼ 10.9) Gewindestangen: ∼ 5.6 und ∼ 10.9, Material nicht normgerecht
Durchmesser:	Rundstahl: ⌀ 20 mm, Gewindestangen: M 16 und M 24
getestete Verhältnisse:	reiner Zug, reines Abscheren, Rundstahl: ∼ 70%, ∼ 60%, ∼ 50% und ∼ 30% Zug, Gewinde: ∼ 80%, ∼ 70%, ∼ 55% und ∼ 40% Zug
Zugproben:	ja
Härteverteilung:	nein

[19] Knobloch und Schmidt, *(1987)*.

3.3. Ergebnisse der bestehenden Versuchsreihen

Als Versuchsergebnisse werden in den einzelnen Studien die jeweiligen Versagenslasten oder auch -spannungen der Einzelversuche aufgelistet. Bei den Versuchen an Rundstahl- und Gewindestangen setzen sich diese Versagenslasten aus Wertepaaren von zunächst aufgebrachter Zugkraft und anschließend zum Versagen führender Scherkraft zusammen. Bei den Versuchen an Schraubengarnituren, die unter verschiedenen Winkeln getestet wurden, ist jeweils der Wert der Bruchlast entscheidend, der mit dem zugehörigen Winkel in eine Zug- und eine Scher-Komponente zerlegt werden kann.

Zur Vergleichbarkeit und für die spätere Aufarbeitung (siehe Kapitel 5) sind im Anhang A alle Ergebnisse der Einzelversuche neu aufgeführt – wo nötig umgerechnet in Kräfte der Einheit kN. Die angegebenen Werte beziehen sich außerdem stets auf die Versagenslast einer Scherfuge. Besonderheiten der jeweiligen Versuche wie z.B. unterschiedliche Festigkeiten der Scherplatten oder eine auf die Schraube zuvor aufgebrachte Vorspannung sind dort ebenfalls hervorgehoben.

Alle Autoren stellen ihre Versuchsergebnisse in Interaktionsdiagrammen dar, um das Verhalten interpretieren zu können. In Abbildung 3.12 sind die Ergebnisdiagramme der einzelnen Studien zum Vergleich zusammengefasst dargestellt. Alle Diagramme sind außerdem noch einmal jeweils einzeln im Anhang A vorhanden.

Alle Darstellungen tragen die Zug-Komponente auf der Ordinate und die Scher-Komponente auf der Abszisse auf. Bei dieser Art der Darstellung kann für jeden Versuch die Traglast getrennt nach ihren Komponenten eingezeichnet werden. Bei den Versuchsreihen mit getrennter Lasteinleitung existieren direkt Wertepaare von Zugkraft und zugehöriger Scherlast, bei der der Probekörper versagt. Für Schrauben, die unter verschiedenen Lasteinleitungswinkeln getestet wurden, wird die Traglast zunächst zerlegt in ihre Zug- und ihre Scher-Komponente. Das Prinzip der Darstellung zeigt Abbildung 3.11.

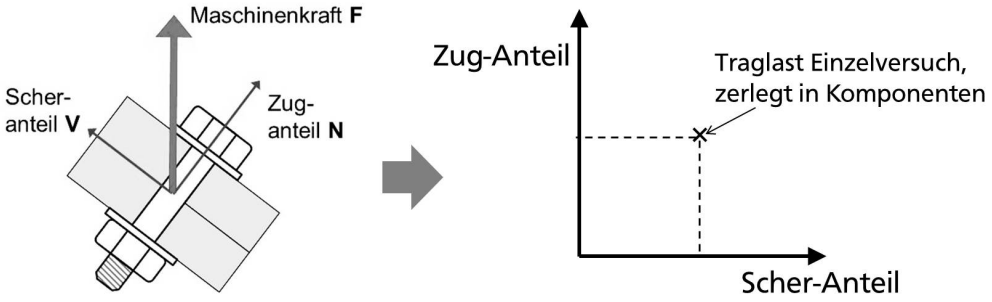
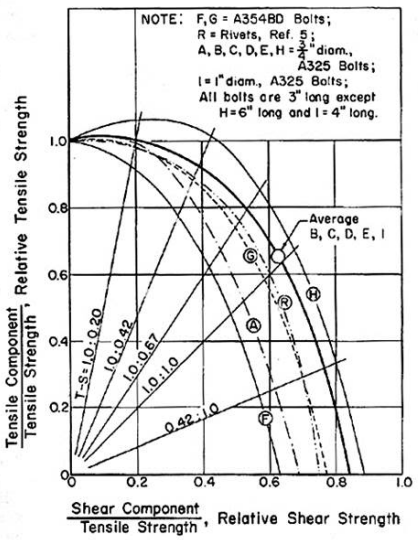


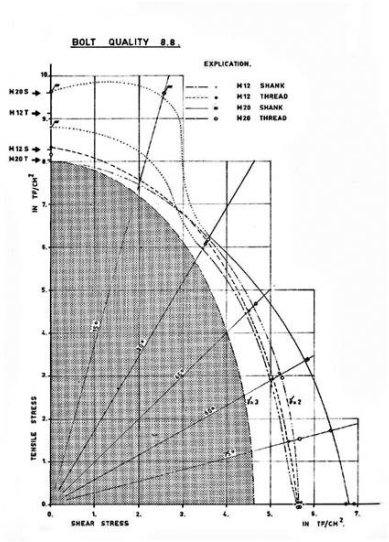
Abbildung 3.11.: Prinzip der Ergebnisdarstellung von Interaktionsversuchen in Diagrammen

Die Diagramme der einzelnen Versuchsreihen unterscheiden sich durch die Wahl der Achsenskalierung. So tragen einige der Autoren direkt die gemessenen Kräfte (Shakir-Khalil und Ho) oder die mithilfe der Querschnittsfläche zurückgerechneten Spannungen (Bilderbeek und Hassler) auf den Achsen auf. Chesson u.a. und Knobloch und Schmidt verwenden bezogene Darstellungen, um eine Vergleichbarkeit auch zwischen Serien verschiedener Festigkeiten zu ermöglichen. Chesson u.a. beziehen sowohl die Zug-

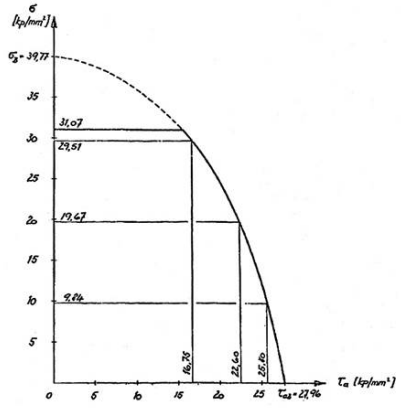
CHESSON u.a. (1965)



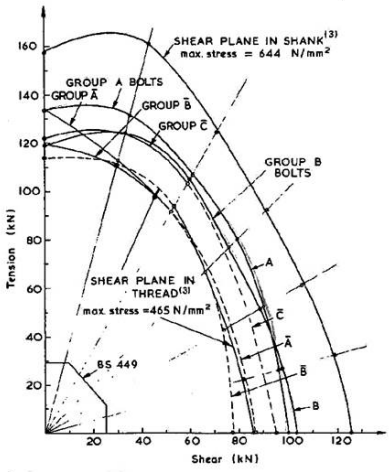
BILDERBEEK (1971)



HASSLER (1973)



SHAKIR-KHALIL und HO (1979)



KNOBLOCH und SCHMIDT (1987)

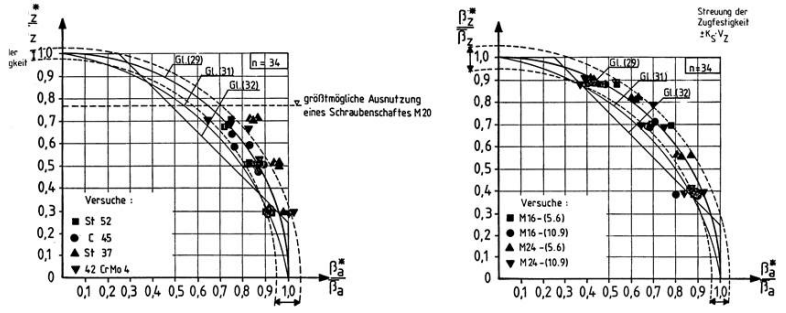


Abbildung 3.12.: Übersicht über die unterschiedlichen Auswertungsdiagramme der verschiedenen Versuchsreihen (alle Diagramme einzeln siehe Anhang A)

als auch die Scher-Komponente auf die reine Zugtragfähigkeit des Gewindes, die in den Versuchen unter reinem Zug ermittelt wurde, unabhängig davon, ob das Versagen im Gewinde oder im Schaft stattfand. KNOBLOCH und SCHMIDT ermitteln für die Rundstähle und Gewindestangen die Zugtragfähigkeiten aus Versuchen an Zugproben und beziehen die Zug-Komponente jeweils auf den zugehörigen Versuchswert. Die Scher-Komponente wird hier nicht auf die Zugfestigkeit bezogen, sondern auf die in reinen Scherversuchen ermittelte Scherfestigkeit.

In den meisten Fällen werden in den Diagrammen nur die Mittelwerte der einzelnen Versuche einer Serie und eines Zug-Scherkraft-Verhältnisses dargestellt. Bis auf KNOBLOCH und SCHMIDT ergänzen alle Autoren den gedachten Verlauf zwischen den Ergebnispunkten durch ellipsenförmige oder Ellipsen-ähnliche Kurven, um die Anschaulichkeit und Übersichtlichkeit zu erhöhen und um zu ihrer späteren Interpretation des Zusammenhangs überzuleiten.

Alle Autoren schlussfolgern ausnahmslos aus ihren Versuchsergebnissen einen ellipsenförmigen bzw. quadratischen Zusammenhang zwischen Zug- und Scherkraftanteil.

3.3.1. Zusammenfassung der Ergebnisse von Chesson u.a.[20]

Die Versuche von CHESSON u.a. wurden mit einer für Interaktionsversuche speziell entwickelten Versuchskonstruktion (Abbildung 3.5) an Schrauben mit Festigkeiten nach einer mittlerweile veralteten, amerikanischen Norm durchgeführt. Um den Einfluss von Schaft oder Gewinde in der Scherfuge testen zu können, konnten bei der Versuchskonstruktion durch den Einsatz unterschiedlich dicker Scherplatten Schrauben der gleichen Geometrie mit unterschiedlicher Scherfugenlage getestet werden.

Bei CHESSON u.a. wurden alle Schrauben vor dem Versuch vorgespannt. CHESSON u.a. gingen davon aus, dass die Vorspannung keinen Einfluss auf die Tragfähigkeit hat und nutzten sie, um die Verformungen zu verringern.

Von den insgesamt vier verschiedenen Schraubentypen, die für die verschiedenen Serien verwendet wurden, wurde zunächst die Zugfestigkeit in sogenannten „Laboratory tension tests“[21] an je drei Schrauben ermittelt. Ob diese Tests an ganzen Schrauben oder an abgedrehten Proben stattfanden und wie sie durchgeführt wurden, ist nicht dokumentiert. Die Ergebnisse der Tests wurden als Kräfte angegeben, sind also Zugtraglasten von ganzen Schrauben. Diese weichen jedoch deutlich von den Ergebnissen der 0°-Versuche ab.

Zum Vergleich sind die Ergebnisse der „Laboratory tension tests“ und der 0°-Versuche der Versuchsserien in Tabelle 3.1 gegenübergestellt. CHESSON u.a. gehen auf diese Unterschiede nicht ein. Es kann nur vermutet werden, dass es sich bei den „Laboratory tension tests“ tatsächlich um abgedrehte Proben handelt. Mit dieser Annahme ließe sich aus dem Vergleich folgern, dass die hier verwendeten Schrauben über ein inhomogenes Material verfügten. Dieses kann über den Querschnitt inhomogen sein, sodass der in den abgedrehten Proben zurückbleibende innere Kern eine andere Festigkeit hat als die weiter außen liegenden Materialschichten, was z.B. aus einem ungleichmäßigem Abkühlprozess bei der Schraubenherstellung und -vergütung resultieren kann. Auch kann es durch das Aufdrehen des Gewindes zu Aufhärtungen in diesem Bereich kommen, so dass eine auf Zug im Gewinde

[20] CHESSON u. a., „(1965)“.
[21] CHESSON u. a., „(1965)“, S. 159.

Tabelle 3.1.: Vergleich der von Chesson u.a. ermittelten Zugtragfähigkeiten aus „Laboratory tension tests“ und 0°-Versuchen, Mittelwerte in kN

Stahlsorte:	A 354 BD		A 325				A 325	A 325 gehärtet	A 325
Durchmesser	3/4"		3/4"				3/4"	3/4"	1"
Schraubenlänge	3"		3"				6"	3"	3"
$N_{max,\ tension\ test}$	222,9		178,4				181,9	209,2	312,3
Serie	***F***	**G**	***A***	**B**	**D**	**E**	**H**	**C**	**I**
$N_{max,\ 0°-Versuch}$	*240*	247,5	*168,7*	183,8	181,9	178,0	187,6	219,1	306,5
Abweichung	7,7%	11,0%	-5,4%	3,0%	2,0%	-0,2%	3,1%	4,7%	-1,9%

versagende, ganze Schraube mehr trägt, als sich aus der Vorhersage der Tragfähigkeit mithilfe eines Resultats aus einer Zugprobe aus dem Schaft auf den Spannungsquerschnitt ergäbe.

Die Unterschiede in den Traglasten bei den 0°-Versuchen an identischen Schrauben erwähnen Chesson u.a. in der Auswertung. Da an Schrauben mit identischen Geometrien sowohl die Situation Schaft als auch Gewinde in der Scherfuge getestet wurden (das amerikanische Gewinde ist hierfür ausreichend lang), ragte das Gewinde unterschiedlich weit in das Klemmpaket hinein. Bei Schrauben, bei denen das Gewinde bis in die Scherfuge ragte (in Tabelle 3.1 kursiv dargestellt), war damit der freie Gewindeteil unter der Mutter länger. Bei Schrauben mit Schaft in der Scherfuge hingegen waren nur wenige freie Gewindegänge vorhanden. Eine geringe Anzahl von freien Gewindegängen führt zu leicht erhöhten Traglasten, da durch nur wenige benachbarte Gewindegänge die durch das Gewinde verursachte Querkontraktionsbehinderung verstärkt wird (siehe Kapitel 2.3). Dadurch lassen sich diese Unterschiede erklären.

Aus ihren Ergebnissen leiteten Chesson u.a. Interaktionsgleichungen ab. Für die Kurven, die sie in ihrem Ergebnissdiagramm darstellen (Abbildung 3.12 und A.1), beziehen sie die Werte einer Versuchsreihe immer auf den Mittelwert des Ergebnisses der jeweiligen Reihe unter dem Winkel 0°. Bezugswert ist also die Zugtragfähigkeit des Gewindequerschnitts unter der jeweiligen Klemmlänge[22].
Damit ergaben sich für Chesson u.a. folgende maximale Traglasten:

Für Schrauben der Festigkeit A325 und Schaft in der Scherfuge:

$$\frac{x^2}{(0,83)^2} + y^2 = 1,0 \tag{3.1}$$

Für Schrauben der Festigkeit A325 und Gewinde in der Scherfuge:

$$\frac{x^2}{(0,64)^2} + y^2 = 1,0 \tag{3.2}$$

[22] die bei mit kurzem freien Gewinde getesteten Schrauben zudem die Traglasterhöhung durch die verstärkte Querkontraktionsbehinderung enthält

Für Schrauben der Festigkeit A354D und Schaft in der Scherfuge:

$$\frac{x^2}{(0,75)^2} + y^2 = 1,0 \tag{3.3}$$

Für Schrauben der Festigkeit A354D und Gewinde in der Scherfuge:

$$\frac{x^2}{(0,55)^2} + y^2 = 1,0 \tag{3.4}$$

Dabei ist die Variable x jeweils das Verhältnis von Scher-Komponente und die Variable y das Verhältnis von Zug-Komponente zur reinen Gewinde-Zugtragfähigkeit unter dem Winkel 0°:

$$x = \frac{V}{N_{max,Gewinde}} \tag{3.5}$$

$$y = \frac{N}{N_{max,Gewinde}} \tag{3.6}$$

Chesson u.a. verglichen die erarbeiteten Gleichungen mit den zu der Zeit in den USA bestehenden Normen und stellten fest, dass diese weit auf der sicheren Seite liegen. Eine weitere Empfehlung gaben sie nicht.

Folgende weitere Beobachtungen ergeben sich aus den Tests von Chesson u.a.:

- **Das Material der Scherplatten hatte keinen Einfluss auf die Ergebnisse.** Chesson u.a. fassten die Ergebnisse der Serien B, D und E, in denen unterschiedliche Blockmaterialien getestet wurden, im Ergebnisdiagramm zu einer Kurve zusammen.
- **Der Durchmesser der Schrauben hatte keinen Einfluss auf die kombinierte Tragwirkung.** Auch die Ergebnisse der Serie I, die einen größeren Schraubendurchmesser hatte, wurden in die eben genannte Kurve mit eingerechnet.
- **Das Verhältnis von aufnehmbarer Scherkraft zu aufnehmbarer Zugkraft wurde bei höherfestem Schraubenmaterial kleiner.** Die Kurven der Serien mit höherfesten Schrauben F (Gewinde in der Scherfuge) und G (Schaft in der Scherfuge) liegen im Diagramm unter den Vergleichskurven mit weniger festen Schrauben. Daraus resultieren die Unterschiede in den Interaktionsgleichungen, die oben genannt sind.
- **Eine Vergrößerung der Klemmlänge erhöhte die Traglast leicht.** Die Kurve der Serie H, bei der die Klemmlänge beinahe verdreifacht wurde, liegt im Diagramm oberhalb der Vergleichskurve.

3.3.2. Zusammenfassung der Ergebnisse von Bilderbeek[23]

Auch die von Bilderbeek beschriebenen Versuche fanden mit einem speziell konstruierten Versuchsaufbau (Abblidung 3.6) statt, der dem von Chesson u.a. sehr ähnelte. Im Unterschied zu Chesson u.a. wurden hier jedoch für die Versuche mit Gewinde in der Scherfuge Schrauben mit Vollgewinde verwendet. Bilderbeek testete Schrauben der Festigkeitsklassen 4.6, 8.8 und 10.9 mit Durchmessern von 12 und 20 mm und spannte einige der Schrauben vor, um auch den Einfluss der Vorspannung untersuchen zu können.

Bilderbeek setzte schon vor Beginn seiner Auswertung voraus, dass ein quadratischer Zusammenhang zwischen Schub- und Normalspannung in den Schrauben herrscht, der dem Schema folgt:

$$\sigma_i^2 = \sigma^2 + \gamma \cdot \tau^2 \tag{3.7}$$

wobei σ_i die (Vergleichs-)Zugfestigkeit ist und γ der Faktor, der den stärkeren Einfluss der Schubspannung berücksichtigt. Die Anteile σ und τ leitete er aus der aus der Gesamttraglast berechneten Spannung her, dafür bezog er die Gesamtlast auf die versagende Querschnittsfläche (Schaft- oder Spannungsquerschnitt) und zerlegte die entstehende Spannung vektoriell in Schub- und Normalspannungsanteil.

In erster Linie stellte Bilderbeek seine Untersuchung an, „um [der Frage] nachzugehen, inwiefern der theoretische Wert 0,58 in $\bar{\tau} = 0,58 \cdot \bar{\sigma}$ aus $\sigma_i^2 = \sigma^2 + 3 \cdot \tau^2$ mit der Praxis übereinstimmt“.[24]

Für die Bestimmung der Zugfestigkeit σ_i wendete Bilderbeek drei verschiedene Wege an: Für seinen ersten Wert σ_{i1} verwendete er den Mittelwert der Ergebnisse der 0°-Versuche, indem er die Bruchlast durch den Spannungsquerschnitt der jeweiligen Schraube teilte (dies entspricht dem von Chesson u.a. verwendeten Vergleichswert). Den zweiten Wert σ_{i2} ermittelte er unter der von ihm frei getroffenen Annahme, dass der γ-Wert aus Gleichung 3.7 für die Winkel 30° und 90° identisch ist. Damit erhält man mit den Versuchsergebnissen unter diesen beiden Winkeln zwei Gleichungen mit den Unbekannten γ und σ_{i2} und kann diese somit bestimmen. Der dritte Wert σ_{i3} wurde durch Versuche an abgedrehten Zugproben mit einem Durchmesser von 8 mm bestimmt, die aus Schrauben der gleichen Serie hergestellt wurden.

Alle von Bilderbeek ermittelten Zugfestigkeiten sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst.

Die drei unterschiedlichen von Bilderbeek bestimmten Werte für die Zugfestigkeit σ_i variieren sehr stark, je nachdem ob es sich um Gewinde- oder Schaftschrauben handelt und um welche Festigkeitsklasse.

Die drei Werte sind bei den untersuchten Gewindeschrauben vergleichsweise homogen, mit Ausnahme des Wertes σ_{i3} – der Zugprobenfestigkeit – der Schrauben M 12 8.8, der eine ungewöhnliche Verfestigung im Schraubeninnern aufzeigt.

Die Unterschiede bei den Schaftschrauben zwischen den σ_{i1}-Werten aus den 0°-Versuchen und den σ_{i3}-Werten aus den Zugproben lassen sich zumindest teilweise durch die schon in 3.3.1 beschriebenen Gründe für eine nicht über die Schraube konstante Festigkeit erklären, zumal die Unterschiede bei den niederfesten Schrauben deutlicher sind als bei den hochfesten,

[23] Bilderbeek, *(1971)*.

[24] „om na te gaan in hoeverre de theoretische waarde 0,58 in $\bar{\tau} = 0,58 \cdot \bar{\sigma}$ uit $\sigma_i^2 = \sigma^2 + 3 \cdot \tau^2$, overeenstemt met de praktijk.“ (Übers. Verf.), Bilderbeek, *(1971)*, S.4.

Tabelle 3.2.: Von Bilderbeek auf drei Wegen ermittelte Zugfestigkeit in kN/cm^2

	Gewinde in der Scherfuge				Schaft in der Scherfuge					
Größe:	M 12	M 20	M 12	M 20	M 12	M 20	M 12	M 20	M 12	M 20
Festigkeit:	4.6	4.6	8.8	8.8	4.6	4.6	8.8	8.8	10.9	10.9
σ_{i1}	45,5	46,5	83,6	81,6	57,0	64,4	88,1	96,3	100,6	109,3
σ_{i2}	48,4	48,1	78,4	79,8	48,2	47,3	76,1	71,1	90,1	90,8
σ_{i3}	44,8	47,5	91,2	80,6	47,9	62,2	82,9	96,4	105,0	108,0

σ_{i1}: Zugfestigkeit, ermittelt aus 0°-Versuchen (Versagen im Gewinde)
σ_{i2}: Zugfestigkeit, berechnet aus Ergebnissen der 30°- und 90°-Versuche
σ_{i3}: Zugfestigkeit, aus Versuchen an Zugproben mit Ø 8 mm

die in der Regel sorgfältiger und damit homogener gefertigt werden. Diese Unsicherheiten bedeuten aber auch, dass beide Werte σ_{i1} und σ_{i3} nicht als die tatsächliche Zugfestigkeit des in der Scherfuge befindlichen Schaftquerschnitts verstanden werden können.

Die Idee, den Wert der Festigkeit über die Beziehung aus Gleichung 3.7 zu bestimmen, ist zumindest kreativ, wenn auch angezweifelt werden kann, wie zielführend sie ist. Bei den Schaftschrauben liegt der aus den 30°- und 90°-Versuchen ermittelte Wert σ_{i2} deutlich unter den beiden anderen. Bei den Gewindeschrauben zeigt sich keine eindeutige Tendenz.

Mit allen drei bestimmten Festigkeiten ermittelte Bilderbeek für jeden einzelnen Schraubentyp und jeden getesteten Winkel einen zugehörigen γ-Wert. Diese sind in Bilderbeek, *(1971)* Anhang I-3 bis I-6 aufgelistet. Auf eine komplette Wiedergabe dieser Werte wird hier verzichtet, da der Erkenntnisgewinn daraus gering ist. Zusammenfassend lässt sich bei diesen Werten beobachten, dass sie für Gewindeschrauben einigermaßen konstant für die unterschiedlichen Winkel sind, bei Schaftschrauben deutlich mehr schwanken. Beinahe alle ermittelten γ-Werte liegen aber unter dem Wert 3 aus Gleichung 3.7, bei Gewindeschrauben und niederfesten Schrauben liegen sie deutlich näher bei oder sogar unterhalb von 2.

Deshalb verglich Bilderbeek die ausgewerteten Versuchsergebnisse in seinen Ergebnisdiagrammen, von denen er jeweils eines für jede der drei getesteten Festigkeiten erstellte (Abbildung 3.12 und A.2, A.3 und A.4), mit den beiden Kurven, die sich ergeben, wenn in die quadratische Gleichung 3.7 für γ die Werte 3 oder 2 einsetzt und als Zugfestigkeit σ_i die Mindestzugfestigkeit der jeweiligen Schrauben-Festigkeitsklasse verwendet wird:

$$\sigma_i^2 = \sigma^2 + 3 \cdot \tau^2 \tag{3.8}$$

und

$$\sigma_i^2 = \sigma^2 + 2 \cdot \tau^2 \tag{3.9}$$

Um die in den Diagrammen aufgetragenen Spannungen zu errechnen, teilte Bilderbeek die jeweiligen Traglastanteile parallel und senkrecht zur Schraubenachse durch die jeweils versagende Fläche, also den Schaft- oder den Spannungsquerschnitt. Da bei Schaftschrauben unter 0° und 15° das Versagen nicht im Schaft, sondern im Gewinde auftrat, verwendete er hier für die Spannungsberechnung den Spannungsquerschnitt – auch für die Berechnung der Schubspannung, obwohl diese an der versagenden Stelle gar nicht auftritt. Dadurch erhielten seine Kurven für Schaftschrauben im Bereich dieser Winkel eine Ausbuchtung.

Eine Empfehlung für eine Nachweisformel gab Bilderbeek nicht. Er wies lediglich darauf hin, dass der aus der Gleichung $\sigma_i^2 = \sigma^2 + 3 \cdot \tau^2$ stammende Wert für $\bar{\tau} = 0,58 \cdot \bar{\sigma}$ niedrig ist[25].

Ansonsten lassen sich bei den von Bilderbeek ausgewerteten Versuchen die gleichen Beobachtungen treffen, die schon bei Chesson u.a. auffielen:

- Das Material der Scherplatten hatte keinen Einfluss auf das Interaktionstragverhalten.
- Der Durchmesser der Schrauben hatte keinen Einfluss auf das Interaktionstragverhalten.
- Das Verhältnis von aufnehmbarer Scherkraft zu aufnehmbarer Zugkraft wurde bei höherfestem Schraubenmaterial kleiner.

Über den Einfluss der Klemmlänge lässt sich aus den hier ausgewerteten Versuchen keine Aussage ableiten. Diese ist zwar teilweise unterschiedlich, aber nur im geringen Maße, so dass kein Einfluss feststellbar ist.

Ein weiterer Aspekt kann aus den von Bilderbeek ausgewerteten Versuchen abgeleitet werden:

- **Ob eine Schraube vorgespannt ist oder nicht hatte keinen Einfluss auf die Traglast**

3.3.3. Zusammenfassung der Ergebnisse von Hassler[26]

Hassler war der Erste, der sich in Deutschland an eine Aussage zur Berücksichtigung der Interaktion bei der Nachweisführung von Schrauben heranwagte. Ausgehend von Chessons u.a. Ergebnissen ging er direkt davon aus, dass ein ellipsenförmiger Zusammenhang besteht. Um die „zugehörigen Ordinaten“[27] der Ellipse zu bestimmen, führte er eine sehr kleine eigene Versuchsreihe durch, verwendete hier aber keine Schrauben, sondern zur Vereinfachung der Versuchsanordnung (Abbildung 3.7) Ersatz-Probekörper aus Rundstahlstangen, ausschließlich der Festigkeitsklasse 4.6. Nach dem in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Prinzip testete er diese mithilfe eines Zugrahmens und einer Schermaschine. Zum Zweck der Befestigung im Zugrahmen wurden in beide Enden der Rundstahlproben Gewinde geschnitten. Die in der Schermaschine befindliche Mitte der Stangen war gewindefrei und simulierte somit die Situation des Schraubenschafts in der Scherfuge.

Die Probekörper wurden alle aus „ein und demselben Werkstoff entsprechend Festigkeitsklasse 4.6“[28] gefertigt. Bei dieser Versuchsserie konnten direkt die reinen Zug-Tragfähigkeiten – sowohl des Gewindes als auch des Schaftes - bestimmt werden, indem an Stücken jeweils mit und ohne Gewinde Zugversuche durchgeführt wurden. Die Unsicherheiten bei den Bezugswerten für die spätere Auswertung bestehen hier also nicht. Zudem liegt auch direkt die Scher-Tragfähigkeit der Probekörper unter reinem, zweischnittigen Abscheren vor.

[25] Vergl. Bilderbeek, *(1971)*, S. 25.
[26] Hassler, *(1973)*.
[27] Hassler, *(1973)*, S. 3.
[28] Hassler, *(1973)*, S. 3.

Hassler setzte die Übertragbarkeit von den Ergebnissen an Rundstählen unter einer zweischnittigem Scherbelastung auf Schrauben voraus. Keine Angaben machte er dazu, wie die aufgebrachte Zuglast während der Versuche kontrolliert wurde: Für alle Wertepaare unter kombinierter Belastung gab er jeweils auf 2 Kommastellen genau die zum jeweiligen Zugbelastungslevel gehörige Kraft in der Einheit Megapond an (auf eine Kommastelle genau in der Einheit kN). Bei Knobloch und Schmidt (siehe Kapitel 3.3.5), die einen ähnlichen Versuchsaufbau nutzten, schwanken die tatsächlich aufgebrachten Zugkräfte hingegen deutlich.

Hassler trug die Mittelwerte seiner Ergebnisse als auf den Vollquerschnitt wirkende Spannungen in ein Diagramm ein (siehe Abbildung 3.12 und A.5). Der Verlauf wird durch die Grenzzugspannung im Gewinde begrenzt. Durch die Ergebnisse legte er eine Kurve, die einer Ellipse ähnelt. Bei genauer Betrachtung fällt auf, dass die Kurve die Achsen nicht orthogonal schneidet und somit keiner vollständigen Viertelellipse entspricht.

Für die Empfehlung eines Nachweises verglich Hassler diese Kurve mit den zu diesem Zeitpunkt normativ zulässigen Spannungen aus der DIN 1050[29]. Dort war eine Interaktion nicht vorgesehen, es wurde lediglich abhängig vom Lastfall eine zulässige Normalspannung $zul\ \sigma$ und eine zulässige Schubspannung $zul\ \tau_a$ für alle Schrauben nach DIN 7990[30] angegeben. Dividiert durch die anzusetzende Bruchsicherheit von ν_B=2,5 erreichte Hasslers Ergebniskurve nicht für alle Zug-Scherlast-Kombinationen diese Spannungen, sodass er für einen Nachweis empfahl, ab einer Schubspannungskomponente größer 80% der zulässigen Schubspannung die zulässige Zugspannung linear abzumindern:

$$\begin{aligned} &für\ \tau_a \leq 0,8 \cdot zul\ \tau_a\ gilt\ \sigma \leq zul\ \sigma \\ &für\ \tau_a > 0,8 \cdot zul\ \tau_a\ gilt\ \sigma \leq 5 \cdot zul\ \sigma \left(1 - \frac{\tau_a}{zul\ \tau_a}\right) \end{aligned} \tag{3.10}$$

Die sehr große Scherlast, ab der Hassler eine Interaktion fordert, liegt an der sehr niedrigen normativen Grenze für $zul\ \sigma$ ($\sim$1/4 der Zugfestigkeit). Diese bewirkt, dass eine Interaktion hier im Vergleich erst bei sehr großen Schubspannungen zum Tragen kommt. Deshalb ging Hassler in seiner Empfehlung nicht weiter auf die Möglichkeit eines quadratischen Ansatzes als Nachweisgrenze ein.

Eine mögliche Übertragbarkeit dieser Bemessungsregel auf hochfeste Schrauben, welche zum Zeitpunkt seiner Veröffentlichung noch nicht direkter Bestandteil der Bemessungsnorm DIN 1050 waren (hier wurde lediglich auf die vorläufige Richtlinie für HV-Verbindungen verwiesen[31]), diskutierte Hassler nicht.

3.3.4. Zusammenfassung der Ergebnisse von Shakir-Khalil und Ho[32]

Die Versuchsreihe von Shakir-Khalil und Ho war ebenfalls sehr klein. Der Versuchsaufbau (Abbildung 3.8), der zwei Schrauben gleichzeitig testete, war zwar deutlich weniger aufwendig als die Aufbauten von Chesson u.a. und Bilderbeek, dafür konnte nicht ausgeschlossen

[29] DIN 1050:1968-06, *Stahl im Hochbau.*
[30] DIN 7990:2008-04, *Sechskantschrauben mit Sechskantmutter für Stahlkonstruktionen.*
[31] Vergl. DIN 1050:1968-06, *Stahl im Hochbau*, S. 7.
[32] Shakir-Khalil und Ho, „(1979)“.

werden, dass sich die Maschinenkraft nicht gleichmäßig auf beide Schrauben aufteilt. Zudem musste der Versuch immer nach Versagen der ersten Schraube beendet und das Ergebnis als Bruchlast beider Schrauben herangezogen werden.

Schakir-Khalil und Ho testeten ausschließlich Schrauben der Größe M 20 und der Festigkeit 4.6 in drei verschiedenen Längen (Serie A mit 100 mm Schraubenlänge, B mit 90 mm und C mit 140 mm). Dabei blieb die Klemmlänge konstant (geschätzt 60 mm, eine Angabe fehlt), die Anzahl der freien Gewindegänge variierte. Zur Erzeugung einer Situation mit Gewinde in der Scherfuge und um die Schrauben der Serie C testen zu können, die mit einer ursprünglichen Schaftlänge von 88 mm nicht in den Aufbau gepasst hätten, wurde das Gewinde länger geschnitten.

Auch Shakir-Khalil und Ho führten Zugversuche an abgedrehten Proben durch, die Zugproben hatten einen Durchmesser von 5 mm. Wird die Gewindetragfähigkeit aus den hier gemessenen Zugfestigkeiten errechnet, so ergibt sich ein teilweise gravierender Unterschied zu den Ergebnissen der 0°-Versuche. Die Werte sind in Tabelle 3.3 gegenübergestellt.

Tabelle 3.3.: Vergleich Festigkeiten aus Versuchen an Zugproben Ø 5 mm und 0°-Versuche von Shakir-Khalil und Ho

	Serie A	Serie B	Serie C
obere Fließgrenze	411 N/mm^2	255 N/mm^2	375 N/mm^2
untere Fließgrenze	366 N/mm^2	242 N/mm^2	340 N/mm^2
Zugfestigkeit	452 N/mm^2	432 N/mm^2	432 N/mm^2
$N_{max,\ berechnet\ aus\ Zugfestigkeit}$	110,7 kN	105,8 kN	105,8 kN
$N_{max,\ 0°-Versuch}$	133,7 kN	118,8 kN	122 kN

Auch hier schienen die Schrauben großen Inhomogenitäten über ihren Querschnitt und über ihre Länge zu unterliegen, wie schon bei den Versuchen von Chesson u.a. und Bilderbeek diskutiert. Die deutlichsten Unterschiede zwischen 0°-Versuch und errechneter Gewindetragfähigkeit aus Zugprobe zeigten sich bei den Schrauben der Serie A. Da hier nur 3 freie Gewindegänge unter der Mutter vorhanden waren, kam eindeutig auch eine Laststeigerung aus der verstärkten Querkontraktionsbehinderung hinzu.

Shakir-Khalil und Ho testeten Schrauben der Serie A und B jeweils mit Schaft in der Scherfuge und in den Vergleichsserien $\bar{A}$ und $\bar{B}$ mit identischen Schrauben, aber bis über die Scherfuge hinaus geschnittenem Gewinde. Versuche unter reinem Zug wurden jeweils nur für die Ursprungsschrauben ohne weiter aufgeschnittenes Gewinde durchgeführt und als Referenzgröße auch für diese Versuche verwendet.

In ihrem Ergebnisdiagramm (siehe Abbildung 3.12 und A.6) zeichneten Shakir-Khalil und Ho direkt Kurven aus den Mittelwerten der Traglasten als Kräfte. Den Effekt der verstärkten Querkontraktionsbehinderung kann man besonders gut bei der Kurve zur Versuchsreihe $\bar{A}$ erkennen, bei der der Wert unter reinem Zug deutlich nicht zum restlichen Verlauf der Ergebniskurve passt.

Ihre Ergebnisse verglichen Shakir-Khalil und Ho mit der zu diesem Zeitpunkt in Großbritannien gültigen Interaktionsbedingung (vergl. Abbildung A.6) und stellten fest, dass diese mit Sicherheiten zwischen 3,7 und 4,5 sehr konservativ ist. Eine weitere, tiefer gehende Interpretation oder Empfehlung zur zukünftigen Bemessung von Schrauben unter

kombinierter Belastung blieb aus.

Neben den Versuchen an Schrauben führten Shakir-Khalil und Ho auch eine Serie von fünf Versuchen an geschraubten Verbindungen durch. Sie sind die einzigen, die nicht nur Schrauben oder Ersatzprobekörper einzeln, sondern auch Schrauben in einer Anschlusssituation untersuchten. Den Versuchsaufbau zeigt Abbildung 3.9. Dabei wurden zwei I-Profile in der Mitte durch einen biegesteifen Stirnplattenstoß verbunden und als Einfeldträger gelagert. Zwischen die beiden Stirnplatten wurde eine dritte Platte geschraubt, die zur Lasteinleitung diente, auf sie wirkte die Prüfkraft als Einzellast. Im oberen Bereich des Anschlusses wurden zur Lagesicherung zwei Schrauben angeordnet, die sich aber in vertikalen Langlöchern befanden, um nicht am Lastabtrag mitzuwirken. Im Zugbereich waren die Platten mit jeweils zwei Schrauben ober- und unterhalb des Zugflansches verbunden.

Durch Variation der Spannweite wurden in den unteren Schrauben verschiedene Verhältnisse von Zug zu Abscheren erzeugt. Zur Auswertung wurde eine gleichmäßige Verteilung sowohl der Scher- als auch der Zugkräfte auf alle vier Schrauben angenommen. Mithilfe der Ergebnisse der zuvor durchgeführten Tests mit Schrauben der gleichen Serie, allerdings mit aufgeschnittenem Gewinde und deutlich kürzerer Klemmlänge, Serie $\bar{\text{C}}$, versuchten die Autoren, die Bruchlast der Versuche vorherzusagen.

Die gemessenen Traglasten der Versuche lagen ungefähr 10% über der so vorhergesagten Tragfähigkeit. Die Autoren führten dies auf die Nichtberücksichtigung der Reibung zurück, durch die ein Teil der Querkraft abgetragen wird. Allerdings gelang es ihnen nicht, den Anteil der Reibung rechnerisch auszuschließen: Besonders bei Kombinationen mit hohem Zuganteil hat der Scherkraftanteil in der Schraube nur einen geringen Anteil an der Traglast und kann somit nicht als alleiniger Grund für die höheren aufnehmbaren Kräfte herhalten. Denkbar ist, dass vor allem bei diesen Versuchen, bei denen die Schrauben im Gewinde versagen, wieder die verstärkte Querkontraktionsbehinderung eine Rolle spielte, außerdem könnte die größere Klemmlänge einen Einfluss haben.

Aufgrund der spärlichen vorliegenden Informationen zu den Versuchen kann hier nur spekuliert werden. Für eine weiterführende Analyse der Ergebnisse reichen die vorliegenden Informationen nicht aus.

3.3.5. Zusammenfassung der Ergebnisse von Knobloch und Schmidt[33]

Das in den 1980er Jahren durchgeführte DASt-Gemeinschaftsprogramm SCHRAUBENVERBINDUNGEN hatte zum Ziel, für die Erstellung künftiger Normen (Neuauflage der DIN 18800, Erstellung des Eurocodes 3) Erkenntnisse über die Tragfähigkeit und das Tragverhalten von Schrauben zu untersuchen und „auf einheitlicher experimenteller Grundlage“[34] abzusichern.

In diesem Rahmen wurden an der Universität Essen die Forschungsthemen 1.02 „Reine Scherversuche“ und 1.03 „kombinierte Scher-Zugversuche“ bearbeitet. Beide sind zusammen im Forschungsbericht „Tragfähigkeit und Tragverhalten stahlbauüblicher Schrauben unter reiner Scherbeanspruchung und unter kombinierter Scher- Zugbeanspruchung“[35] dokumentiert.

[33] Knobloch und Schmidt, *(1987)*.
[34] Knobloch und Schmidt, *(1987)*, S.1.
[35] Knobloch und Schmidt, *(1987)*.

Zum Verhalten unter kombinierter Scher- Zugbeanspruchung wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt: Eine mit Schaft und eine mit Gewinde in der Scherfuge. Dabei wurden keine Schraubengarnituren getestet, sondern, wie schon bei Hassler, Stangen als Ersatz-Probekörper, die in einem Zugrahmen auf einen gewissen Ausnutzungsgrad der Zugtragfähigkeit vorgespannt wurden und anschließend mit einer zweischnittigen Schervorrichtung zum Versagen gebracht wurden.

Für die Simulation des Schafts in der Scherfuge wurden Rundstahlstangen mit Durchmesser 20 mm aus Stählen mit den Schrauben-Festigkeitsklassen vergleichbaren Eigenschaften verwendet: St 37-2, St 52-3, C 45 und 42 CrMo 4 (vergütet) als Äquivalente für 4.6, 5.6, 8.8 und 10.9. Für die Simulation des Gewindes in der Scherfuge wurden Gewindestangen der Größen M 16 und M 24 in den Festigkeiten 5.6 und 10.9 verwendet.

Knobloch und Schmidt bestimmten die Zugfestigkeit ihrer Probekörper ausschließlich an abgedrehten Proben. Dafür wurden aus den Rundstahlstangen Zugproben mit Durchmesser 14 mm gefertigt, aus den Gewindestangen mit Durchmesser 8 mm bzw. 12 mm.

Zu den Ergebnissen der Zugproben aus Rundstahlstangen schrieben Knobloch und Schmidt: „Bruchdehnungen, Zugfestigkeiten und Verhältniswerte Streckgrenze/Zugfestigkeit sind den „simulierten“ Schrauben- Festigkeitsklassen ähnlich genug, um aus den Ergebnissen der Scher- und der kombinierten Scher- Zugversuche im Sinne der vorliegenden Grundlagen-Zielsetzung bezogene Aussagen für „stahlbauübliche“ Schrauben ableiten zu dürfen.“[36]. Die Mittelwerte aus je fünf Versuchen für die Fließgrenze bzw. 0,2 %-Dehngrenze und die Zugfestigkeit sowie die Bruchdehnungen zeigt Tabelle 3.4. Leider verzichteten Knobloch und Schmidt auf die Darstellung von Spannungs-Dehnungskurven, weswegen das tatsächliche Materialverhalten nicht genauer bewertet werden kann.

Tabelle 3.4.: Von Knobloch und Schmidt an Zugproben ermittelte Materialkennwerte der untersuchten Rundstahlstangen, Mittelwerte aus fünf Versuchen

	Rundstahlproben			
Material:	St 37-2	St 52-3	C 45	42 CrMo 4
Fließgrenze:	235 N/mm^2	409 N/mm^2	-	-
0,2%-Dehngrenze:	-	-	615 N/mm^2	708 N/mm^2
Zugfestigkeit:	372 N/mm^2	529 N/mm^2	689 N/mm^2	923 N/mm^2
Bruchdehnung:	41,4%	32,4%	14,2%	17,8%

Die an den Zugproben aus Gewindestangen gemessenen Werte entsprachen für keine der getesteten Stangen den normativ geforderten Mindestfestigkeiten oder Bruchdehnungen. „Die Verwendbarkeit der Ergebnisse der mit den Gewindestangen durchgeführten kombinierten Scher- Zugversuche für die vorliegende Grundlagen-Zielsetzung wird nach Meinung der Verfasser durch die geschilderte werkstoffliche Unzulänglichkeit nicht eingeschränkt, da die ausreichend (bzw. fast ausreichend) hohen Bruchdehnungswerte ein Tragverhalten gewährleisten, das dem „stahlbauüblicher“ Schrauben im Prinzip ähnlich ist“[37].

Die Mittelwerte der ermittelten Materialkennwerte sind in Tabelle 3.5 zu sehen. Auch

[36] Knobloch und Schmidt, *(1987)*, S. 19.
[37] Knobloch und Schmidt, *(1987)*, S. 21.

hier fehlen Materialkurven. Die Tatsache, dass Knobloch und Schmidt aber auch für die Gewindestangenproben der Festigkeitsklasse 5.6 eine 0,2%-Dehngrenze anstelle einer Fließgrenze angaben, lässt darauf schließen, dass hier kein Fließplateau vorhanden war.

Tabelle 3.5.: Von Knobloch und Schmidt an Zugproben ermittelte Materialkennwerte der untersuchten Gewindestangen, Mittelwerte aus 3 Versuchen

	Gewindestangen			
Material:	5.6	5.6	10.9	10.9
Durchmesser:	16 mm	16 mm	24 mm	24 mm
0,2%-Dehngrenze:	$526\,N/mm^2$	$400\,N/mm^2$	$573\,N/mm^2$	$781\,N/mm^2$
Zugfestigkeit:	$726\,N/mm^2$	$430\,N/mm^2$	$739\,N/mm^2$	$935\,N/mm^2$
Bruchdehnung:	18,6%	18,9%	10,5%	13,6%

Knobloch und Schmidt vermuteten hinter den ermittelten Materialkennwerten, dass für beide Festigkeitsklassen bei der Herstellung der Gewindestangen das gleiche, mittelfeste Halbzeug verwendet worden sein könnte, das, um die Festigkeitsklasse 10.9 zu erreichen, „durch geeignete thermische oder/und mechanische Behandlung „hochzutrimmen““[38] versucht wurde.

Auf die Möglichkeit, dass das Material inhomogen über die Querschnittsdicke sein könnte, gehen Knobloch und Schmidt nicht ein. Dabei könnte gerade ein nachgestellter, augenscheinlich nicht erfolgreicher Vergütungsprozess diese Effekte, die bei allen anderen Studien zu beobachten waren, noch verstärken. Da Knobloch und Schmidt keine reinen Zugversuche an nicht abgedrehten Proben vornahmen, ist es nicht möglich einzuschätzen, inwieweit solche Effekte hier eine Rolle spielten.

Für die Versuche unter kombinierter Zug- und Scherbelastung sollte die Zuglast auf einem bestimmten Level konstant gehalten werden. Der jeweils dokumentierte Wert ist „der über die Versuchsdauer gemittelte Wert der unvermeidbar geringfügig schwankenden „konstanten“ Zugkraft.“[39] In Tabelle A.5 im Anhang A sind alle Einzelwerte der Versuche von Knobloch und Schmidt aufgelistet – umgerechnet in die Versagenskräfte in kN. Man erkennt hier, dass die tatsächlichen Zugkraft-Level oft von den geplanten abwichen. Die zugehörigen Scher-Versagenslasten streuen allerdings teilweise noch mehr, als nur aus einem geringfügig anderen Zugkraft-Level zu erwarten wäre.

Knobloch und Schmidt berechneten für ihre Auswertung für alle Versuche bezogene Werte, indem sie die jeweils aufgebrachte Zugspannung auf die aus den Zugproben ermittelte Zugfestigkeit und die zugehörige Scher-Versagenslast auf die in reinen Scherversuchen ermittelte reine Schertraglast bezogen. Alle Einzelversuchsergebnisse wurden in die Ergebnisdiagramme eingetragen, von denen Knobloch und Schmidt jeweils eines für die Situationen Schaft bzw. Gewinde in der Scherfuge erstellten, siehe Abbildung 3.12 und A.7.

In diese Graphen ist auch die quadratische Interaktionsgleichung eingezeichnet:

$$\left(\frac{\beta_Z^*}{\beta_Z}\right)^2 + \left(\frac{\beta_a^*}{\beta_a}\right)^2 = 1 \tag{3.11}$$

[38] Knobloch und Schmidt, *(1987)*, S. 21.
[39] Knobloch und Schmidt, *(1987)*, S. 36.

wobei β_Z und β_a die reinen aufnehmbaren Zug- bzw. Scherspannungen sind und β_Z^* und β_a^* die jeweiligen Bruchspannungen des Einzelversuchs. Zusätzlich wurde die Streuung der Zugfestigkeit und die Streuung der Scherfestigkeit an den jeweiligen Achsen angetragen und das hieraus „zu erwartende Streuband gestrichelt eingezeichnet."[40]. Knobloch und Schmidt zeichneten außerdem zwei mögliche Interaktionsgleichungen mit ein, die für den Großteil der Versuchsergebnisse auf der sicheren Seite lägen:

$$\left(\frac{\beta_Z^*}{\beta_Z}\right)^{1,7} + \left(\frac{\beta_a^*}{\beta_a}\right)^{1,7} = 1 \tag{3.12}$$

und

$$\frac{\beta_Z^*}{\beta_Z} + \frac{\beta_a^*}{\beta_a} = 1,25 \tag{3.13}$$

$$mit\ \beta_Z^*/\beta_Z \leq 1\ und\ \beta_a^*/\beta_a \leq 1$$

Eine solche Interaktionsgleichung hielten sie aber für „über-konservativ"[41], da sie die Streuung der Materialfestigkeiten doppelt berücksichtigen würde. Da die meisten der Versuchsergebnisse nicht signifikant zur unsicheren Seite aus dem oben erwähnten Streuband fielen[42], empfahlen Knobloch und Schmidt in ihrem Kapitel „Vorschläge für Normregelungen"[43] eine quadratische Nachweisformel nach dem Schema von Gleichung 3.12 aufzunehmen.

Im Ausblick seiner Dissertation[44] wies Knobloch jedoch darauf hin, dass für eine endgültige Bewertung des Sachverhalts zu wenig Versuchsdaten vorliegen oder zumindest eine ausführlichere Auswertung der anderen vorhandenen Versuchsreihen erfolgen muss. „Die im Entwurf DIN 18800/1 angegebene Interaktionsbeziehung (die quadratische Gleichung, Anm. d. Verf.) dürfte aber zuverlässig sein."[45]

3.4. Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den bisherigen Versuchsreihen

Alle, die bisher zur Zug-Abscher-Interaktion bei Schrauben geforscht haben, unterstellten schon vor Beginn ihrer eigenen Versuchsserien, dass ein quadratischer bzw. ellipsenförmiger Zusammenhang besteht.

Dies scheint plausibel aus dem bekannten Zusammenhang zwischen Normalspannung und Schubspannung nach von Mises, siehe Gleichung 1.3 in Kapitel 1.1. Auch kennen

[40] Knobloch und Schmidt, *(1987)*, S. 66.
[41] Knobloch und Schmidt, *(1987)*, S. 67.
[42] Vergl. Knobloch und Schmidt, *(1987)*, S. 66.
[43] Knobloch und Schmidt, *(1987)*, S. 69 f.
[44] Vergl. Knobloch, *(1990)*, S. 187.
[45] Knobloch, *(1990)*, S. 187.

die Autoren die jeweils vorangehenden Studien (angefangen auch mit den an Nieten durchgeführten Studien, die den Versuchen von Chesson u.a. vorangingen[46]), die jeweils aus ihren Ergebnissen Ellipsen-ähnliche Ergebniskurven produzierten und in ihren Berichten darstellten.

Zum Zeitpunkt, als die ersten Studien durchgeführt wurden, ging es um das Festlegen von normativen Grenzen für die Verwendung von Schrauben und für Schrauben unter kombinierter Belastung um den Vergleich mit den bis dahin sehr weit auf der sicheren Seite liegenden, normativ gegebenen, reinen Tragfähigkeitsgrenzen. Die Feststellung, dass ein quadratischer bzw. elliptischer Zusammenhang besteht, reichte als Antwort auf die Zielsetzungen der Versuchsserien aus.

Die meisten der älteren Untersuchungen verglichen ihre tatsächlichen Versuchswerte mit den Mindestfestigkeiten der entsprechenden Schraubenklassen. Wenn die getesteten Schrauben eine höhere Zugfestigkeit als die Mindestzugfestigkeit hatten, verzerrte dies den Vergleich mit einer möglichen Interaktionskurve zusätzlich.

Dabei hätte spätestens Bilderbeek auffallen müssen, dass der quadratische Ansatz nicht zutreffend ist: Wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben, ermittelte er auf mehreren Wegen für verschiedene Lastwinkel die Werte γ in der Gleichung $\sigma_i^2 = \sigma^2 + \gamma \cdot \tau^2$ und stellte fest, dass diese für Schrauben mit Gewinde nahezu unabhängig vom Lastwinkel sind, bei Schrauben mit Schaft in der Scherfuge hingegen variieren. Wäre die quadratische Gleichung zutreffend, dürfte das nicht der Fall sein.

Nur in der neuesten Untersuchung von Knobloch und Schmidt werden die Versuchsergebnisse bezogen dargestellt, und zwar nicht nur auf die reine Zugtragfähigkeit, sondern nach Komponenten aufgeteilt auf die reine Zug- und auf die reine Schertragfähigkeit. Dadurch gelingt es, Materialschwankungen aus dem Vergleich mit möglichen Interaktionsfunktionen herauszurechnen. Knobloch widmete große Teile seiner Dissertation der Untersuchung des Tragverhaltens von Schrauben unter reiner Scherlast[47]. Dadurch war er sensibilisiert für die Unterschiede, die beim Festigkeitskoeffizienten α – dem Verhältnis von Scher- zu Zugtragfähigkeit – abhängig von Schraubengüte und Herstellungsart, aber auch von der Anzahl der Scherfugen, mit der die Schraube getestet wurde, auftreten können.

Leider kamen die Interaktionstragversuche in den Untersuchungen von Knobloch und Schmidt etwas kurz. Das Hauptaugenmerk ihrer Forschungen lag eindeutig auf dem reinen Scher-Tragverhalten. Dadurch geriet eine genauere Betrachtung der Ergebnisse der Versuche unter kombinierter Last ins Hintertreffen. Die Versuchsergebnisse selbst streuten sehr stark, die Zugfestigkeit, die als Bezugsgröße herangezogen wurde, wurde ausschließlich an abgedrehten Proben ermittelt. Eine detaillierte Betrachtung der Einzelergebnisse oder zumindest der einzelnen Festigkeiten separat entfiel in der Aufarbeitung der Versuche komplett. So sind die guten Ansätze für eine mögliche Auswertung von Knobloch und Schmidt nicht konsequent zu Ende geführt und die Verwendbarkeit der Versuchsergebnisse bleibt fraglich. Die Empfehlung von Knobloch und Schmidt, die quadratische Interaktion in die Normgebung zu übernehmen, geht nur auf sehr grobe Betrachtungen zurück.

Eine Neuauswertung der vorangegangenen Versuchsreihen mit den von Knobloch und Schmidt vorgeschlagenen Methoden ist aber zunächst auch nicht möglich, da die Bezugs-

[46] Cox und Munse, *(1952)*.
[47] Vergl. Kap. 4 Knobloch, *(1990)*, S. 71 ff.

werte der tatsächlichen Zugfestigkeit des in der Scherfuge befindlichen Querschnitts oder die mit zwei Scherfugen ermittelte Scherfestigkeit nicht vorliegen.

Dass der quadratische bzw. elliptische Zusammenhang nicht bedingungslos als richtig unterstellt werden kann, fiel erst auf, als für die Erstellung des Eurocodes die vorgeschlagenen Nachweisfunktionen mittels einer statistischen Auswertung von Versuchsergebnissen auf ihre Anwendbarkeit überprüft wurden. Wie in Kapitel 1.2 beschrieben, wurden hier lediglich die Versuche von Bilderbeek[48] und Shakir-Khalil und Ho[49] ausgewertet. Wie dabei mit den zuvor erwähnten Materialunsicherheiten umgegangen wurde, wird in den Background Dokumenten[50,51,52] nicht erwähnt. Außerdem fand keinerlei weiterführende Betrachtung statt, was der Grund für die Unterschiede zu der zu erwarteten quadratischen Beziehung ist. Es wurde lediglich die vorgeschlagene Formel so abgeändert, dass sie den statistischen Sicherheitsanforderungen genügt.

Trotz der Tatsache, dass die bisherigen Versuche keine eindeutige Aussage über den tatsächlichen Zusammenhang von Zug- und Scher-Komponente zulassen, lassen sich doch einige Beobachtungen für das Tragverhalten unter kombinierter Last zusammenfassen:

- Zug- und Schertragfähigkeit bei Schrauben beeinflussen sich bei gleichzeitigem Auftreten gegenseitig.
- Es hat einen entscheidenden Einfluss, ob das Gewinde oder der Schaft einer Schraube in der Scherfuge liegt.
- Der Durchmesser der Schraube hat keinen merklichen Einfluss auf das Interaktionstragverhalten der Schrauben bei kombinierter Zug-Scher-Beanspruchung.
- Die Festigkeit des Stahls der Scherplatten hat keinen merklichen Einfluss auf das Interaktionstragverhalten der Schrauben bei kombinierter Zug-Scher-Beanspruchung.
- Ob eine Schraube vorgespannt ist oder nicht, hat keinen merklichen Einfluss auf die maximale Traglast unter kombinierter Zug-Scher-Beanspruchung.
- Die Klemmlänge der Schraube scheint einen – wenn auch sehr geringen – Einfluss auf die maximale Traglast unter kombinierter Zug-Scher-Beanspruchung zu haben.
- Die Festigkeitsklasse der Schraube hat einen Einfluss auf das Interaktionstragverhalten, insofern als dass das Verhältnis von maximaler Scher- zu maximaler Zuglast vom Material der Schraube abhängig ist.

[48] Bilderbeek, *(1971)*.
[49] Shakir-Khalil und Ho, „(1979)“.
[50] Snijder u. a., *Background report EC3, Part A (1988)*.
[51] Snijder u. a., *Background report EC3, Part B (1988)*.
[52] Sedlacek und Schneider, *Background documentation to prEN 1993-1-8, third draft (2004)*.

4. Eigene experimentelle Untersuchungen

Zur Untersuchung des Tragverhaltens unter kombinierter Zug-Ascher-Last wurde eine eigene Versuchsreihe entwickelt und durchgeführt, da die bisherigen Untersuchungen kein eindeutiges Bild zeigten. Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, lassen zwar einige der Ergebnisse darauf schließen, dass ein quadratischer Zusammenhang nicht vorausgesetzt werden kann, dennoch scheint sich keiner der Autoren dieses Phänomens bewusst gewesen zu sein. Für eine genaue Betrachtung des tatsächlichen Zusammenhangs fehlen wichtige Informationen, vor allem über die tatsächlichen Materialbeschaffenheiten.

In der eigenen Versuchsreihe konnten gezielt die für die vorliegende Fragestellung relevanten Parameter untersucht und gemessen werden. Durch die Erfahrungen aus den bestehenden Versuchen konnten Schlüsse für eine geeignete Versuchsanordnung und ein sinnvolles Versuchsprogramm gezogen werden. Mithilfe der bei der eigenen Untersuchung gewonnen Erkenntnisse kann im Anschluss auch eine Neubetrachtung der bestehenden Ergebnisse erfolgen.

4.1. Versuchsziele und Konzept

Die eigenen Versuche wurden an Schraubengarnituren durchgeführt. Ob Versuchsergebnisse aus Versuchen an Ersatzkörpern wie Rundstahlstangen und Gewindestäben direkt auf Schrauben übertragen werden können, ließ sich aus den bestehenden Ergebnissen nicht eindeutig ableiten.

Basierend auf den Erfahrungen der bestehenden Versuchsreihen wurde festgelegt, folgende Parameter zu untersuchen:

- **Gewinde oder Schaft in der Scherfuge**
- **unterschiedliche Schraubenfestigkeiten**, getestet werden die Festigkeitsklassen 4.6, 8.8 und 10.9
- **die Belastungssituationen reiner Zug** (Belastungswinkel 0° zur Schraubenachse), **reines Abscheren** (90°) und **vier Zug-Scherkraft-Kombinationen** (15°, 30°, 45° und 67,5°)
- **zweischnittiges Abscheren** zur Bestimmung des Festigkeitskoeffizienten α

Die bisherigen Versuche haben gezeigt, dass diese gewählten Lastwinkel für eindeutige Aussagen ausreichen und dass andere mögliche Parameter keinen oder nur einen geringen Einfluss haben. Die folgenden Parameter wurden konstant gehalten:

- **der Schraubendurchmesser** (M 20)
- **die Klemmlänge** (88 mm)
- **das Material der Scherplatten**(S 355)
- **das Lochspiel** (1 mm)

Um später sicherstellen zu können, dass diese Parameterwahl tatsächlich ohne Einfluss auf die Ergebnisse war, können diese Punkte im Anschluss an die Versuche durch die Modellierung mithilfe der Methode der Finiten Elemente (**siehe Kapitel 6)** noch einmal überprüft werden.

Da bisherige Versuche zeigten, dass die Vorspannung keinen Einfluss auf die Traglasten besitzt, wurde diese in den vorliegenden Untersuchungen nicht standardmäßig aufgebracht. Dennoch wurde der Versuchsaufbau so konzipiert, dass eine Vorspannung aufgebracht und eine Klein-Serie mit vorgespannten Schrauben durchgeführt werden konnte.

Die Schrauben wurden, wo möglich, aus ein und derselben Produktionsserie entnommen. Bei Schrauben mit unbekanntem Herstellungsprozess wurde durch Tests sichergestellt, dass das Materialverhalten aller getesteten Schrauben identisch ist.

Da nicht mit einer größeren Streuung zu rechnen war, wurden drei Versuche je Situation geplant.

4.2. Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau wurde nach dem in Kapitel 3.1.2 gezeigten U-Stummel-Prinzip konstruiert. Gegenüber den Versuchskonstruktionen von Chesson u.a. oder Bilderbeek wurde er aber weiterentwickelt.

Mit den dort verwendeten Versuchsaufbauten konnten durch Wechsel des Lasteinleitungspunktes alle unterschiedlichen Winkel getestet werden. Dafür mussten diese Versuchsaufbauten allerdings sehr groß und aufwendig konstruiert werden, um unter allen Winkeln die Last in den Probekörper leiten zu können.

Durch die Auflösung in drei einzelne Versuchskonstruktionen, die jeweils zum Testen unter zwei verschiedenen der gewählten Lastwinkel eingesetzt werden konnten, wurde die Konstruktion deutlich vereinfacht und zudem die Handhabung erleichtert, da die einzelnen Versuchskonstruktionsteile weniger als 15 kg wogen.

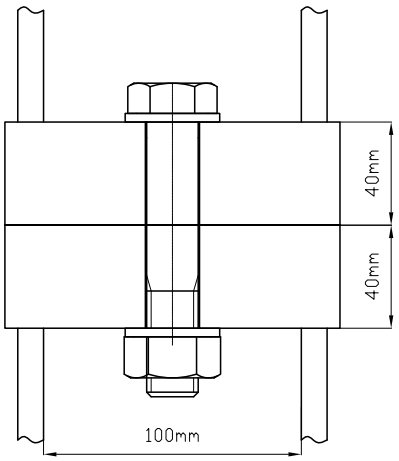


Abbildung 4.1.: Geometrie des U-Stummels im Versuchsaufbau

Die größer gewählte Öffnung zwischen den Lasteinleitungsplatten (Siehe Abbildung 4.1) ermöglichte das Aufbringen einer gezielten Vorspannung auf die zu testende Schraube. Da die Last über Biegung von den seitlichen Platten in die Schraube gelangen musste, bedurften die durch die Versuchskonstruktionen verbundenen Kopfplatten einer Mindestdicke. Die sich hieraus ergebende Plattendicke von 40 mm führte zusammen mit den 4 mm dicken Unterlegscheiben zu einer Klemmlänge von 88 mm.

Abbildung 4.2 zeigt die drei unterschiedlichen Versuchskonstruktionen, die aus je zwei durch die zu prüfende Schraube verbundenen Hälften bestehen. Die Laschen, die in die Zugprüfmaschine eingespannt wurden, bestimmten den jeweils getesteten Lastwinkel zur Schraubenachse. Die Kraftrichtung war dadurch richtungstreu zur Schraubenachse.

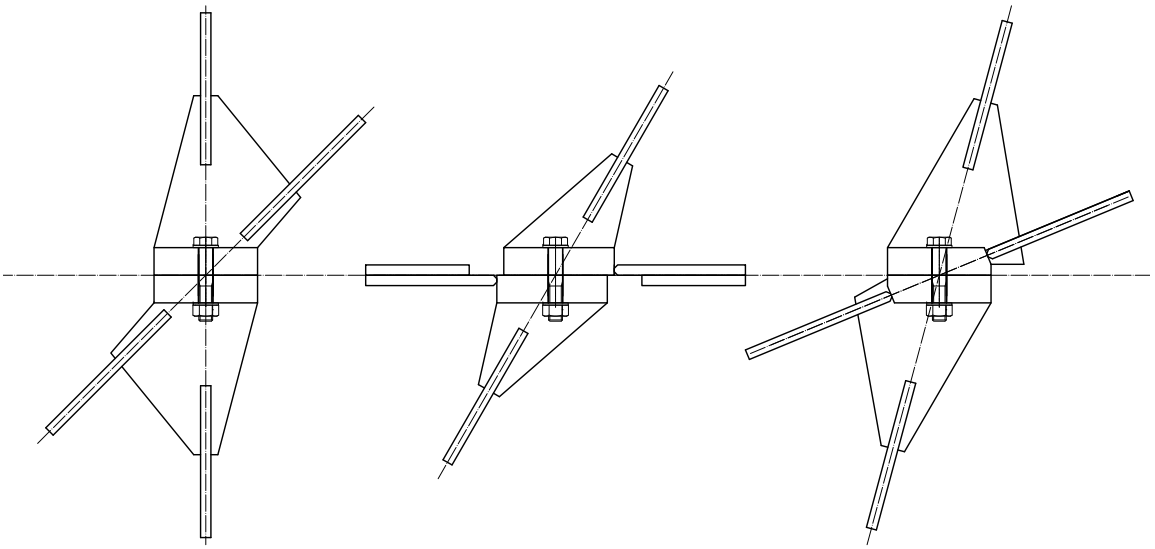


Abbildung 4.2.: Darstellung der drei Versuchskonstruktionen, jeweils bestehend aus zwei mit der zu prüfenden Schraube zu verschraubenden Hälften. Links: Winkel 0° und 45°, Mitte: 30° und 90°, rechts: 15° und 67,5°

Abbildung 4.3 zeigt eine der Versuchskonstruktionen in die Prüfmaschine eingespannt. Die Konstruktionszeichnungen und weitere Details sind in Anhang B dargestellt.

4.2.1. Messdaten

Die Versuche wurden weggesteuert durchgeführt. Für die spätere Auswertung ist vor allem die Versagenslast der Schraube von Interesse, die direkt aus der Maschinenkraft abgelesen werden kann. Neben der Maschinenkraft wurde zudem der Maschinenweg aufgezeichnet. Dieser enthält neben der Verformung der getesteten Schraube auch die Verformungen der Versuchskonstruktion.

Da Längung und Scherweg der Schraube nicht direkt an der Schraube gemessen werden konnten, wurden durch zwei seitliche Wegaufnehmer die Verschiebungen der Kopfplatten zueinander rechts und links der Konstruktion gemessen. An den anderen beiden Seiten der

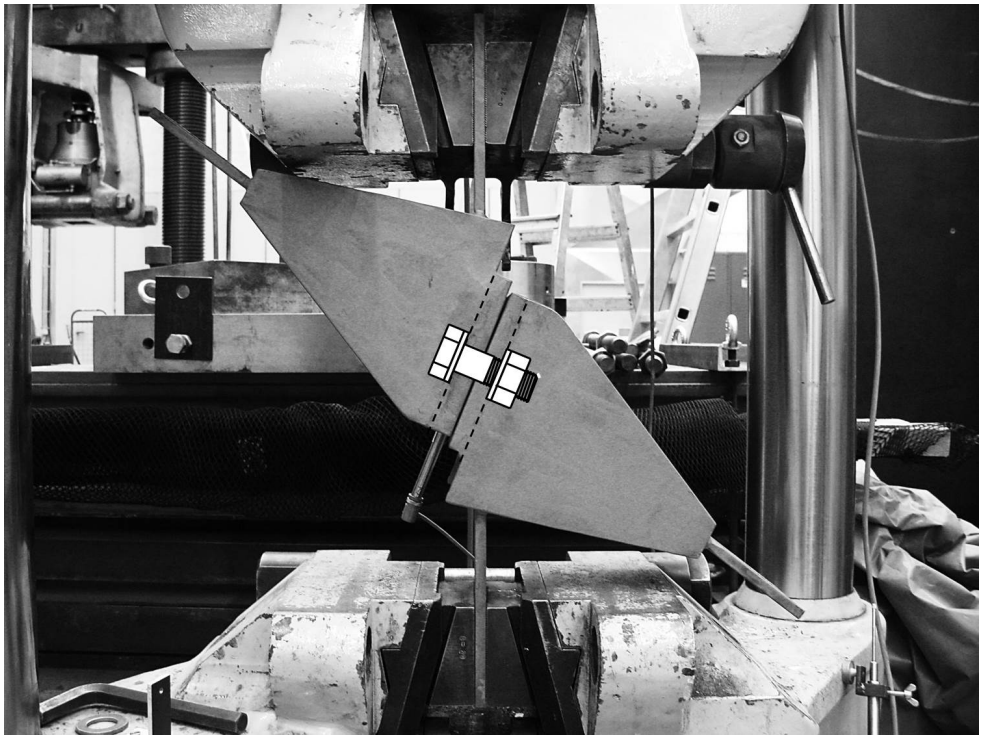


Abbildung 4.3.: Versuchskonstruktion eingespannt in Zugprüfmaschine für Test unter Winkel 67,5° mit graphisch dargestellter Schraube

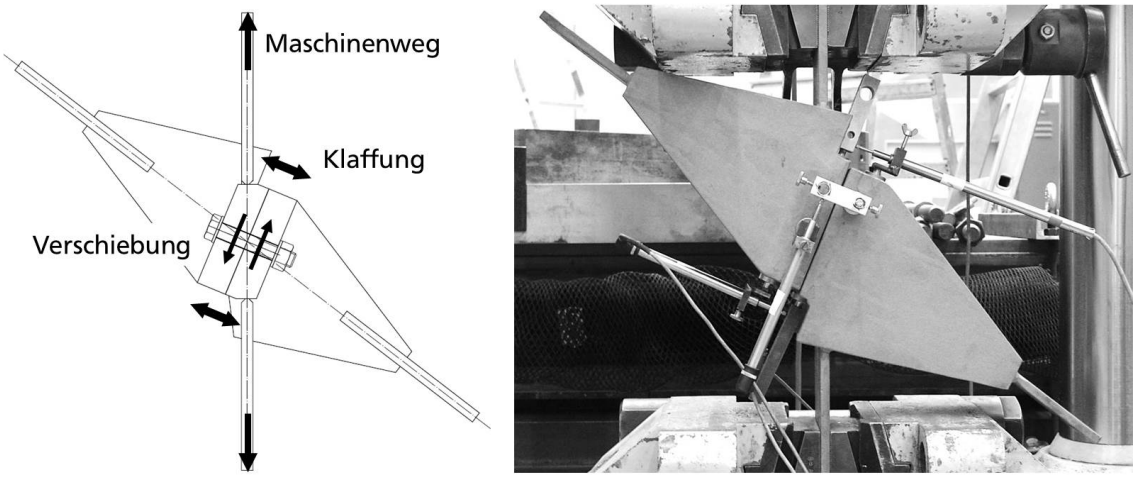


Abbildung 4.4.: Gemessene Wege, links: Prinzipskizze der Weganteile, rechts: Versuchskonstruktion mit Wegaufnehmern für Verschiebung und Klaffung

Konstruktion wurde mit zwei weiteren Wegaufnehmern die Klaffung zwischen den Platten gemessen.

Die Verschiebungsmessungen dienten zur Kontrolle, ob im Versuch keine ungewollten Stützkräfte auftreten. Auch eine Tendenz des Verhältnisses von Klaffung zu Schiebeweg konnte aus den gewonnenen Daten abgelesen werden, für eine quantitative Auswertung waren sie durch die seitliche Anbringung nicht hinreichend genau.

Vor Versagen der Schraube mussten die Wegaufnehmer von der Versuchskonstruktion entfernt werden, um nicht beschädigt zu werden. Abbildung 4.4 zeigt die an der Versuchskonstruktion angebrachten Wegaufnehmer und schematisch die Aufteilung der Wege in Verschiebung und Klaffung.

4.2.2. Versuche zum zweischnittigen Abscheren

Um eindeutige Referenzwerte für die reine Schertragfähigkeit zu bekommen, wurden zusätzlich zu den 90°-Versuchen Abscherversuche mit zwei Scherfugen durchgeführt. Die Versuche mit nur einer Scherfuge eignen sich hierfür nicht, da, wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben, durch die Verdrehung der Schraubenachse bei einschnittiger Lasteinleitung kein reines Abscheren vorliegt und die aufnehmbare Last etwas größer ist.

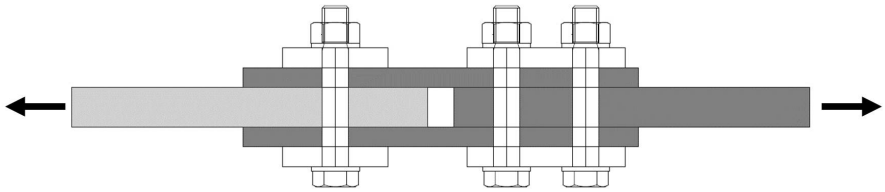


Abbildung 4.5.: Versuchsaufbau für zweischnittige Abscherversuche

Das Prinzip der Testvorrichtung zeigt Abbildung 4.5. Dabei ist links die zu testende Schraube dargestellt. Die beiden äußeren Laschen werden durch zwei weitere Schrauben zusammengehalten. Dadurch konnte der Versuchsaufbau nach dem Bruch der Schraube gelöst werden, ohne ihn zu zerstören. Durch Futterbleche wurde eine ähnliche Klemmlänge (90 mm) wie in den Interaktionsversuchen erreicht. Detaillierte Angaben der Versuchskonstruktion finden sich in Anhang B.

4.2.3. Begleitende Materialversuche

Bei der Auswertung der Versuche spielt die Kenntnis der Zugfestigkeit des sich in der Scherfuge befindenden Materials eine entscheidende Rolle. Bei den getesteten Schrauben mit Vollgewinde kann diese direkt aus den 0°-Versuchen entnommen werden.

Bei Schrauben mit Schaft kann nicht direkt vorausgesetzt werden, dass die bei 0° gemessene Zugfestigkeit auch die Festigkeit des Schafts widerspiegelt, da die Schraube hier im Gewinde versagt. Zum einen können bei der Herstellung der Schrauben durch das Aufdrehen des Gewindes Verhärtungen in diesem Bereich entstehen. Zum anderen kann es, wenn nur wenige Gewindegänge unter der Mutter frei sind, durch die Verstärkung der Querkontraktionsbehinderung hier zu einer Erhöhung der Versagenslast kommen.

Um mit der tatsächlichen Zugfestigkeit des Schafts arbeiten zu können, wurden von allen Schrauben mit Schaft drei Zugproben nach DIN EN ISO 898-1[1] aus dem Schaft hergestellt und getestet. Die Geometrie der Rundproben kann Abbildung 4.6 entnommen werden.

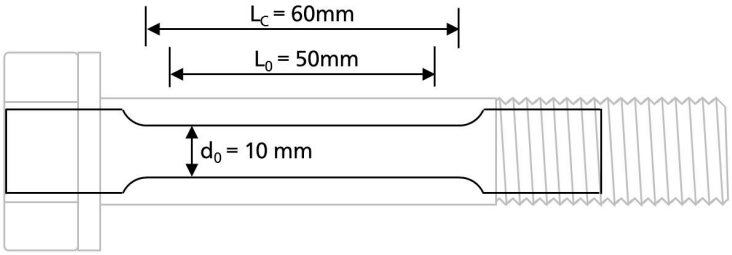


Abbildung 4.6.: Zugprobe aus Schraubenschaft zur Bestimmung der Materialeigenschaften

Stimmte die im 0°-Versuch ermittelte Bruchlast nicht mit der aus dem Zugversuch zurückgerechneten Bruchlast des Gewindes überein, wurden zusätzlich zu den Zugproben Vickershärte-Tests sowohl am Schaft- als auch am Gewindequerschnitt durchgeführt.

Abbildung 4.7.: Scheiben aus Schaft (links) und Gewinde (Mitte) zur Vickershärte-Prüfung, Aufteilung in Ringe zur Rückrechnung von Zugprobenquerschnitt (grau hinterlegt) auf Gesamtquerschnitt (rechts)

Die hierfür aus den Schrauben geschnittenen Scheiben sind in Abbildung 4.7 zu sehen. Die Scheiben aus dem Schaft wurden jeweils in acht, die aus dem Gewinde in sieben Ringe zerlegt. In allen Ringen wurde mit dem Mittel aus drei Vickershärtepunkten jeweils die Bruchfestigkeit bestimmt.

Zur Skalierung der Ergebnisse der Vickershärteprüfung kann die in den Zugproben ermittelte Bruchfestigkeit dienen. Dazu wurde die wie oben beschrieben ermittelte Vickershärteverteilung genutzt, um mit der im Zugprobenversuch bestimmten Zugfestigkeit des Kernquerschnitts (in Abbildung 4.7 rechts grau unterlegt) die Festigkeit von der Kernfläche auf den jeweiligen ganzen Querschnitt umzurechnen und damit dessen gemittelte Zugfestigkeit zu bestimmen. Damit werden Skalierungsfehler bei der Vickersprüfung ausgeschlossen. Durch den Vergleich der so bestimmten Gewindefestigkeit mit den Ergebnissen der 0°-Versuche kann die Richtigkeit der Berechnung direkt überprüft werden.

[1] DIN EN ISO 898-1:2013-05, *Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen – Teil 1: Schrauben mit festgelegten Festigkeitsklassen.*

4.3. Versuchsprogramm

Insgesamt wurden 162 Einzelschrauben in sieben Serien getestet. Hinzu kamen 15 Zugprobenversuche und Vickershärteprüfungen für 3 der Schraubenarten.

Tabelle 4.1.: Übersicht über die durchgeführten Versuche

Serie	0°	15°	30°	45°	67,5°	90°	Abscheren	Zugprobe	Vickers
4.6 - Gewinde	4	3	3	3	3	4	4	-	-
8.8 - Gewinde	3	3	3	3	3	3	3	-	-
10.9 - Gewinde	3	3	3	3	3	3	4	-	-
4.6-1- Schaft	3	3	3	3	3	3	3	3	ja
4.6-2 - Schaft	5	3	3	3	3	3	3	6	ja
8.8 - Schaft	4	3	3	3	3	3	4	3	ja
10.9 - Schaft	4	3	3	3	3	3	3	3	nein
10.9 - Schaft, Vorsp.	1	1	1	1	2	1	-	-	-

Von den Festigkeitsklassen 4.6, 8.8 und 10.9[2] wurden jeweils Schrauben mit Schaft und Schrauben mit Gewinde in der Scherfuge getestet. Die erste Serie der Schrauben mit Schaft Festigkeit 4.6 (Serie 4.6-1 - Schaft) erwies sich allerdings als nicht normgerecht, sodass eine zweite Serie (4.6-2 - Schaft) getestet wurde.

Abbildung 4.8.: Übersicht über die Schrauben der sieben Versuchsserien

[2]Genaue Materialbezeichnung: 32CrB4, die chemische Zusammensetzung kann dem Abnahmeprüfzeugnis Abbildung D.9 in Anhang D entnommen werden.

Je Serie und Lastwinkel wurden mindestens drei Versuche durchgeführt. Von den Schrauben mit Schaft wurden zudem Materialtests an Zugpoben und, wenn nötig, eine Vickershärteprüfung durchgeführt. Tabelle 4.1 zeigt eine Übersicht über die durchgeführten Versuche.

Jeweils ein Exemplar der unterschiedlichen verwendeten Schrauben ist in Abbildung 4.8 zu sehen. Für die Serie 10.9 - Schaft standen Schrauben aus einer Produktionscharge als Garnitur inklusive Muttern und Scheiben zur Verfügung. Für die anderen Serien konnte der Ursprung aus einer Charge nicht mit Sicherheit angenommen werden.

Für die Serien der Schrauben mit Schaft wurde teilweise auf Maschinenbauschrauben zurückgegriffen. Diese sind in Abbildung 4.8 gut an dem längeren Gewindeanteil zu erkennen. Da ein Einfluss der Beschichtung nicht zu erwarten war, wurden je nach Verfügbarkeit feuerverzinkte oder schwarze Schrauben verwendet.

Die Schraubenlängen wurden so gewählt, dass die Klemmlänge von 88 mm gut überbrückt wurde und bei Schrauben mit Schaft dieser eindeutig in der Scherfuge lag. In Tabelle 4.2 sind die jeweiligen die Schrauben regelnden Normen, die verwendeten Schraubenlängen und die Länge des sich im Klemmpaket befindenden Gewindes aufgelistet.

Tabelle 4.2.: Geometrien der einzelnen Schraubenserien

	Norm	Durchmesser	Länge	Gewinde in Klemmpaket
4.6 - Gewinde	DIN EN ISO 4017	20 mm	120 mm	88 mm
8.8 - Gewinde	DIN EN ISO 4018	20 mm	120 mm	88 mm
10.9 - Gewinde	DIN EN ISO 4019	20 mm	120 mm	88 mm
4.6-1 - Schaft	DIN EN ISO 4014	20 mm	120 mm	16 mm
4.6-2 - Schaft	DIN 7990	20 mm	120 mm	1 mm
8.8 - Schaft	DIN EN ISO 4014	20 mm	120 mm	14 mm
10.9 - Schaft	DIN EN 14399-4	20 mm	115 mm	6 mm

4.4. Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden weggesteuert in einer 100 to Zugprüfmaschine durchgeführt. Die Prüfgeschwindigkeit betrug zwischen 2 und 5 mm pro Minute, abhängig von der Duktilität des Schraubenwerkstoffs. Durch die Wahl der Geschwindigkeit wurde sichergestellt, dass sich das Versagen rechtzeitig ankündigte und ausreichend Zeit zum Entfernen der Wegaufnehmer vor dem Versagen blieb. Die Prüfgeschwindigkeit beeinflusste die Versuchsergebnisse nicht. Alle Prüfgeschwindigkeiten lagen unterhalb der in DIN EN ISO 898-1[3] vorgegebenen Höchstgeschwindigkeit für Versuche an Schrauben (10 mm pro Minute bis zum Erreichen der Fließgrenze darüber 25 mm pro Minute).

Zunächst wurde eine Vorlast von ungefähr 20 kN aufgebracht, um das Lochspiel zu schließen und eine eventuelle Relativverdrehung der beiden Versuchskörperhälften zu korrigieren. Anschließend wurde die Schraube bis zum Bruch belastet.

Um Gewindeabstreifen als Versagen bei vorwiegend auf Zug beanspruchten Schrauben zu verhindern, wurde auf die Schrauben jeweils eine zweite Mutter aufgedreht.

[3] DIN EN ISO 898-1:2013-05, *Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen – Teil 1: Schrauben mit festgelegten Festigkeitsklassen.*

4.5. Ergebnisse

In Tabelle 4.3 sind die Mittelwerte der Bruchlasten aus jeweils mindestens drei Versuchen aller Versuchsserien aufgeführt. Alle Einzelergebnisse können Anhang C entnommen werden.

Tabelle 4.3.: Ergebnisse der Versuche an Schrauben, Mittelwerte in kN

	Gewinde in der Scherfuge			Schaft in der Scherfuge				
Festigkeitsklasse:	4.6	8.8	10.9	4.6 Serie 1	4.6 Serie 2	8.8	10.9	10.9 Vorsp.
0°	106,0	228,7	269,1	142,9	125,6	231,5	274,3	275,4
15°	108,4	216,8	248,6	140,3	136,5	242,8	293,6	292,2
30°	99,6	191,3	220,7	127,1	140,9	234,4	264,5	267,4
45°	91,2	167,5	194,6	115,3	126,3	204,8	237,2	235,7
67,5°	81,0	149,4	173,1	106,4	115,6	183,0	218,1	217,0
90°	80,0	154,7	176,7	112,1	120,9	195,1	230,4	235,7
90° 2-schnittig	75,5	140,5	163,0	99,6	115,4	183,4	215,4	

Abbildung 4.9.: Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 nach Versuch, oben: Gewinde in der Scherfuge, unten: Schaft in der Scherfuge

In Abbildung 4.9 sind die Versagensbilder der Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 mit Gewinde und mit Schaft in der Scherfuge unter den verschiedenen Belastungswinkeln dargestellt. Bilder aller Versuchsserien finden sich in Anhang C Abbildung C.8 bis C.14.

Unter reiner Zugbelastung (Winkel 0°) versagten die Schrauben an einer zufälligen Stelle des Gewindequerschnitts. Kam ein Scherlast-Anteil hinzu, wanderte bei Schrauben mit Gewinde in der Scherfuge der Versagenspunkt in die Scherfuge.

Für Schrauben mit Schaft in der Scherfuge lag der Versagenspunkt erst ab einem Lastwinkel von 30° in der Scherfuge. Dies erklärt sich durch die unterschiedlichen Flächen von Gewinde und Schaft: Beim getesteten Lastwinkel 15° ist der Anteil der Zug-Komponente noch so groß, dass der kleinere Gewindequerschnitt auf Zug versagt, bevor Interaktionsversagen in der durch beide Kraftanteile belasteten Scherfuge eintreten kann.

Lediglich bei den Schrauben mit Schaft, Festigkeitsklasse 4.6, Serie 1 lag die Stelle des Bruchs auch beim Belastungswinkel 15° bereits in der Scherfuge (Vgl. Abb. C.11). Die begleitenden Materialversuche zeigten, dass die Schrauben dieser Serie im Gewinde eine deutlich höhere Festigkeit als im Schaft aufwiesen.

Die gemessenen Bruchlasten werden mit steigendem Belastungswinkel, also zunehmendem Scher-Lastanteil kleiner. Bei Schrauben mit Schaft in der Scherfuge steigt die Traglast unter kleinen Winkeln durch die Verschiebung des Versagenspunktes vom Gewinde in die Scherfuge allerdings erst leicht an. Die reinen Zugtragfähigkeiten liegen wie zu erwarten etwas oberhalb des normativ erwarteten Wertes von Nennfestigkeit multipliziert mit dem Spannungsquerschnitt. Bei beiden Schraubenserien mit Schaft der Festigkeit 4.6 ist der Abstand zur erwarteten Nenntragfähigkeit etwas deutlicher. Auffallend hoch ist der Unterschied zwischen den Traglasten unter einschnittiger und unter zweischnittiger Belastung. Die Traglaststeigerung je Scherfuge bei einschnittiger Belastung ist in allen Versuchsserien deutlich.

Die Streuung der Versuchsergebnisse ist sehr gering. in den Tabellen C.1 bis C.4 ist der Variationskoeffizient für die Einzelergebnisse der jeweiligen Prüfsituation mit angeführt, der die relative Standardabweichung in Prozent angibt. Trotz der geringen Anzahl von Versuchen je Situation sind die Werte des Variationskoeffizienten sehr klein. Bei Schrauben mit Schaft in der Scherfuge liegen sie immer deutlich unter 3%. Bei Gewinde in der Scherfuge ist die Streuung geringfügig größer, aber auch hier liegt der Variationskoeffizient selten über 2% und stets unter 5%.

Diese sehr guten Übereinstimmungen zeigen, dass die gewählte kleine Anzahl an Versuchen von in der Regel drei je Belastungssituation vertretbar ist. Auch können die Schrauben trotz des nicht bei allen Serien sichergestellten Ursprungs aus der selben Produktionscharge für die weitere Betrachtung als ausreichend homogen angesehen werden.

4.5.1. Ergebnisse der Materialversuche

Für die weitere Betrachtung ist die Zugfestigkeit f_u von entscheidender Bedeutung. Für Schrauben mit Vollgewinde kann die mittlere Zugfestigkeit des versagenden Querschnitts direkt aus den Versuchen unter reinem Zug berechnet werden:

$$f_{u,0^\circ} = \frac{F_{0^\circ}}{A_s} \tag{4.1}$$

Tabelle 4.4.: Zugfestigkeiten aus 0°-Versuchen und Zugprobentests, mit Vickershärteverteilung zurückgerechnete, mittlere Zugfestigkeiten von Schaft und Gewinde

	$f_{u,0°}$	$f_{u,Zugp.}$	$f_{u,Vickers,Schaft}$	$f_{u,Vickers,Gew.}$
4.6 - Gewinde	433 N/mm^2	-	-	-
8.8 - Gewinde	933 N/mm^2	-	-	-
10.9 - Gewinde	1099 N/mm^2	-	-	-
4.6-1 - Schaft	583 N/mm^2	482 N/mm^2	498 N/mm^2	560 N/mm^2
4.6-2 - Schaft	513 N/mm^2	502 N/mm^2	543 N/mm^2	505 N/mm^2
8.8 - Schaft	945 N/mm^2	820 N/mm^2	975 N/mm^2	923 N/mm^2
10.9 - Schaft	1120 N/mm^2	1106 N/mm^2	-	-

Aus den Schrauben mit Schaft wurden zusätzlich abgedrehte Zugproben gefertigt und getestet. Die Einzelergebnisse dieser Tests und die Spannungs-Dehnungsdiagramme können Anhang D entnommen werden. Durch den Vergleich der hieraus gewonnenen Zugfestigkeit $f_{u,Zugp.}$ mit der zurückgerechneten Zugfestigkeit aus dem 0°-Versuch kann beurteilt werden, inwieweit Schaft und Gewinde über ein homogenes Material verfügen.

Die aus jeweils mindestens drei Versuchen gemittelten Werte sind in Tabelle 4.4 zusammengefasst. Bei den Schrauben mit Schaft der Festigkeitsklasse 10.9 stimmen die ermittelten Zugfestigkeiten aus dem 0°-Versuch und der Zugprobe gut überein. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Schrauben über eine sehr gute, homogene Materialbeschaffenheit verfügen.

Für die Schrauben mit Schaft anderer Festigkeiten ist dies nicht der Fall. Besonders die Materialien der Schrauben der Serie 1 der Festigkeitsklasse 4.6 und der Schrauben der Festigkeitsklasse 8.8 weisen große Unterschiede auf. Bei der Serie 1 der Festigkeit 4.6 zeigten schon die Versuche an Schrauben unter dem Lastwinkel 15°, dass eine Materialaufhärtung im Gewindebereich vorliegen muss, da diese Schrauben trotz des hohen Zuglastanteils im Schaft versagten.

Die Vickershärteverteilungen über den Querschnitt sind in Anhang D Abbildung D.6 bis D.8 dargestellt. Die daraus zurückgerechneten Zugfestigkeiten zeigt Tabelle 4.4. Die so gewonnene Zugfestigkeit des Schaftquerschnitts $f_{u,Vickers,Schaft}$ kann zur weiteren Betrachtung der Ergebnisse verwendet werden. Die gute Übereinstimmung der für die Gewindequerschnitte zurückgerechneten Zugfestigkeiten $f_{u,Vickers,Gew.}$ mit der aus den 0°-Versuchen ermittelten $f_{u,0°}$ dient als Kontrolle der Richtigkeit der angewendeten Methode.

4.5.2. Verformungen

Während des Versuchs wurde der Weg, den der lastaufbringende Zylinder der Zugmaschine zurücklegt, aufgezeichnet. Über diesen lässt sich die aufgebrachte Kraft auftragen. Der gemessene Zylinderweg stellt allerdings nicht nur die Verformung der Schraube dar, sondern enthält zusätzliche Komponenten aus der Verformung der Versuchskonstruktionen. Er lässt sich nur bedingt für eine quantitative Bewertung heranziehen, sehr wohl lassen sich aber einige qualitative Beobachtungen anstellen.

Die Kraft-Weg-Diagramme aller Einzelversuche aller Serien sind in den Abbildungen C.1 bis C.7 in Anhang C dargestellt. In Abbildung 4.10 werden beispielhaft die Diagramme

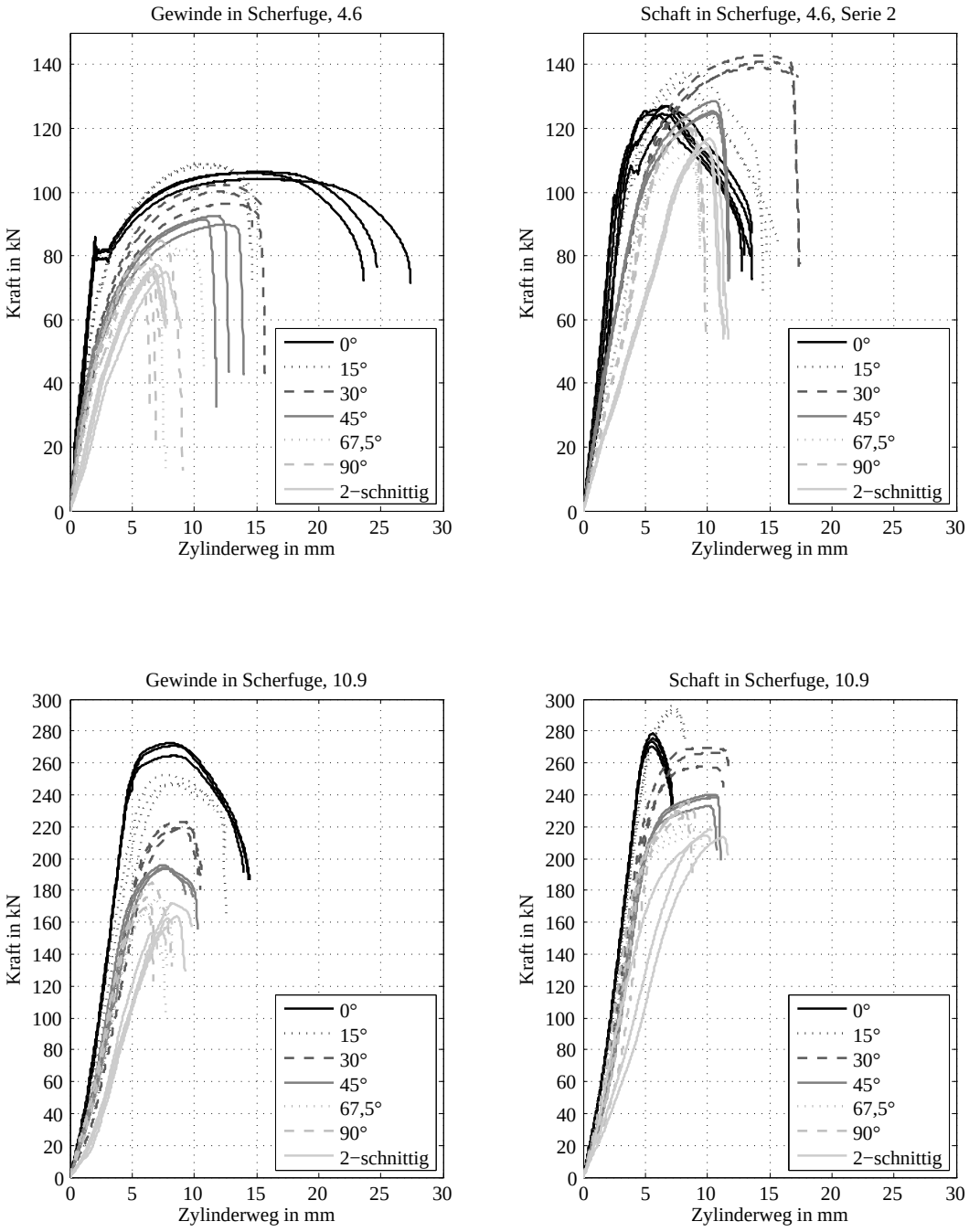


Abbildung 4.10.: Vergleich der Kraft-Weg-Diagramme der Interaktionsversuche mit Schrauben, Festigkeitsklassen 4.6 und 10.9, Gewinde oder Schaft in der Scherfuge

der Versuchsserien der Festigkeitsklassen 4.6 und 10.9 mit Gewinde und mit Schaft in der Scherfuge gegenübergestellt.

In den Diagrammen lässt sich der Kraft-Weg-Zusammenhang der Versuche unter verschiedenen Lastwinkeln vergleichen. Wie zu erwarten erzielen die Schrauben der Festigkeit 10.9 (in der Abbildung unten) größere Traglasten als Schrauben der Festigkeitsklasse 4.6 (oben). Schrauben mit Schaft in der Scherfuge (in der Abbildung rechts) erzielen ab dem Lastwinkel 30°, ab dem das Versagen im Schaft auftritt, größere Traglasten, als Schrauben mit Gewinde in der Scherfuge (links). Außerdem zeigt sich, dass sich die niederfesten Schrauben deutlich duktiler verhalten.

Bei den reinen Zugversuchen der Schrauben der Festigkeit 4.6 mit Gewinde in der Scherfuge ist ein deutliches Fließplateau zu erkennen. Erwartungsgemäß ist dieses bei den hochfesten Schrauben nicht vorhanden. Bei den Schrauben der Festigkeitsklasse 4.6 mit Schaft in der Scherfuge ist ein Fließplateau nur in Ansätzen erkennbar. In Abbildung 4.10 ist die Serie 2 dargestellt, die durchgeführt wurde, da sich das Material der Serie 1 als nicht normgerecht herausstellte. Die Versuche unter reinem Zug dieser Serie zeigen kein Fließplateau (vergl. Abbildung C.4).

Bei Schrauben mit Gewinde in der Scherfuge nimmt die Bruchlast mit steigendem Lastwinkel ab. Auch der Zylinderweg wird bei höherem Scherlastanteil kleiner. Bei Schrauben mit Schaft in der Scherfuge steigt die Bruchlast bei der Änderung von reinem Zug zu einem Belastungswinkel von 15° zunächst an. In beiden Fällen versagt die Schraube nicht in der Scherfuge, sondern im Gewinde. Da für dieses Versagen lediglich die Zug-Komponente der Last verantwortlich ist, ist die Gesamtlast unter diesem Winkel höher.

Auch das Material der Schrauben der Serie 2 ist sehr inhomogen (vergl. Tabelle 4.4), der Schaft verfügt über eine größere Festigkeit im Vergleich zum Gewinde. Dadurch steigt die maximale Traglast bei den Versuchen unter einem Lastwinkel von 30° im Vergleich zu den kleineren Winkeln noch einmal an. Die Unstetigkeiten im Verlauf der Kurven unter reinem Zug nach Erreichen der Fließgrenze resultieren aus dem sehr kurzen Gewindeanteil im Klemmpaket (vergl. 4.2). In der Verformung treten Sprünge auf, sobald die ersten Gewindegänge aus der Mutter ausreißen und frei liegen.

5. Auswertung der Ergebnisse

Zur Beurteilung des Interaktionstragverhaltens werden die Ergebnisse der Versuche in Interaktionsdiagrammen aufbereitet und zusammengefasst, um Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten sichtbar zu machen und einen Vergleich mit den Interaktionsfunktionen aus den Normenwerken zu ermöglichen. Im Anschluss an die Auswertung der eigenen Versuchsergebnisse werden mithilfe der neugewonnenen Erkenntnisse auch die Versuchsergebnisse der bestehenden Versuchsreihen noch einmal aufbereitet und neu bewertet.

Es wird darauf hingewiesen, dass für diese Betrachtungen die Mittelwerte der Versuche herangezogen werden. Sie dienen dazu, den tatsächlichen Zusammenhang bei kombinierter Zug-Scherkraft-Belastung zu untersuchen.[1]

5.1. Eigene Versuche

5.1.1. Versuche mit Gewinde in der Scherfuge

Für die Darstellung in Interaktionsdiagrammen werden die gemessenen Bruchlasten vektoriell in Zug- und Scherkraftanteil zerlegt. Das Diagramm Abbildung 5.1 zeigt die Bruchlasten der Versuche mit Gewinde in der Scherfuge für alle drei getesteten Festigkeitsklassen.

Der zugehörige Lastwinkel der jeweiligen Einzelversuche kann direkt von der Ordinate aus abgetragen werden, alle Versuche eines gleichen Lastwinkels liegen auf einer Geraden.

Die Abstufung der Traglast zwischen den einzelnen Festigkeitsklassen ist gut zu erkennen. Deutlich wird auch, dass die Gesamttraglast mit zunehmendem Scherlastanteil geringer wird. Auch der Abstand zwischen den Bruchlasten der unterschiedlichen Festigkeitsklassen wird geringer.

Um die Ergebnisse der Versuchsserien mit unterschiedlichen Schrauben-Festigkeitsklassen miteinander und mit den normativen Interaktionsgleichungen vergleichen zu können, wird eine bezogene Darstellung gewählt. Dazu werden im ersten Schritt sowohl Zug- als auch Scherkraftanteil auf die reine Zugtragfähigkeit des in der Scherfuge befindlichen Querschnitts bezogen.

Für Schrauben mit Gewinde in der Scherfuge ist dies die Zugtragfähigkeit des Gewindes $N_{max,Gewinde,obs}$, die in den Versuchen unter dem Winkel 0°, also reiner Zuglast, gemessen wurde. Für die Bruchlast-Mittelwerte je Lastwinkel und Festigkeitsklasse sind die bezogenen Lastanteile im Diagramm in Abbildung 5.2 dargestellt.

[1] Eine stochastische Auswertung der Daten unter Berücksichtigung von Fraktilwerten in Bezug zu den normativ gegebenen Nennfestigkeiten ist hier nicht notwendig. Durch die Verwendung der tatsächlich vorhandenen, im Versuch ermittelten Mittelwerte der reinen Zug- und der reinen Schertragfähigkeit als Bezugswerte ist sichergestellt, dass die Zusammenhänge direkt beobachtet werden können, auch wenn bei dieser Betrachtung nicht vergessen werden darf, dass die Werte einer unterschiedlichen, wenn auch geringen Schwankung unterliegen können.

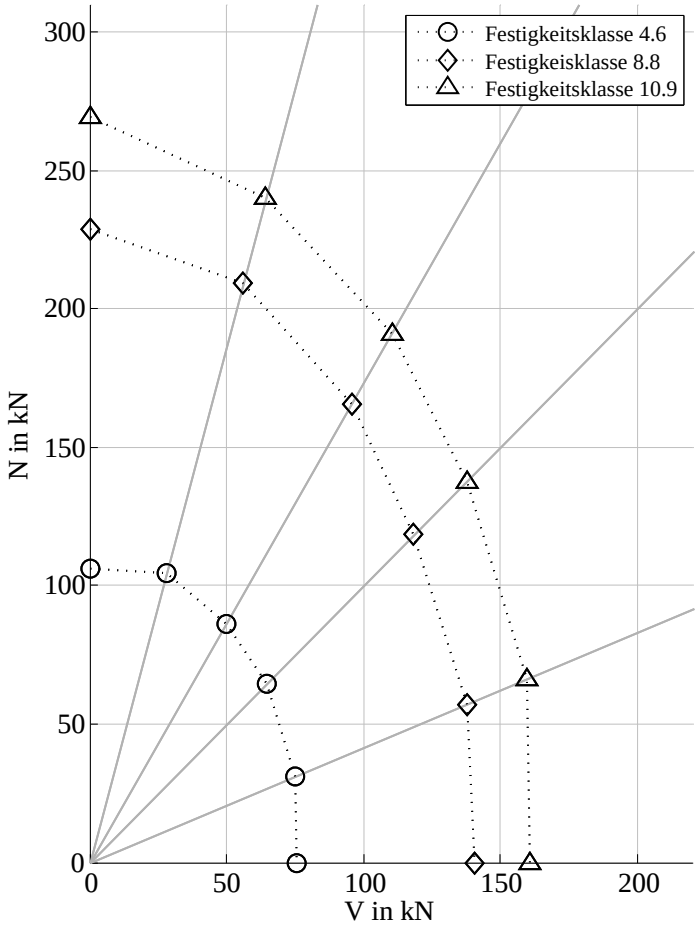


Abbildung 5.1.: Bruchlasten der Versuche mit Gewinde in Scherfuge (Mittelwerte je Lastwinkel), zerlegt in Zug- und Scherkraftanteil

Durch den Bezug auf die Zugkrafttragfähigkeit können die Versuchsergebnisse direkt mit den Nachweisfunktionen aus den Normen verglichen werden. Die maximale Schertragfähigkeit wird sowohl in der DIN 18800-1[2] als auch in der DIN EN 1993-1-8[3] über die Zugtragfähigkeit bestimmt, die mit dem Festigkeitskoeffizienten α multipliziert wird. Für die Festigkeitsklassen bis 8.8 ist dieser Koeffizient in beiden Normen mit 0,6 gegeben. Für die Festigkeitsklasse 10.9 gibt die DIN 18800-1 einen Wert von 0,44, die DIN EN 1993-1-8 einen Wert von 0,5. In Abbildung 5.2 sind die quadratische Funktion der DIN 18800-1 und die bi-lineare Funktion der DIN EN 1993-1-8 jeweils mit den unterschiedlichen α-Werten mit dargestellt.

Auf der Abszisse des Diagramms lassen sich direkt die tatsächlichen α-Werte der getesteten Schrauben ablesen. Die Punkte auf dieser Achse gehören zu den zweischnittigen Scherversuchen und geben die reine Schertragfähigkeit wieder. Der Festigkeitskoeffizient der getesteten Schrauben der Festigkeitsklasse 8.8 liegt mit 0,614 sehr nahe an dem Wert aus

[2]DIN 18800-1:2008-11, *Stahlbauten - Teil 1: Bemessung und Konstruktion.*
[3]DIN EN 1993-1-8:2012-10, *EC3 -Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen.*

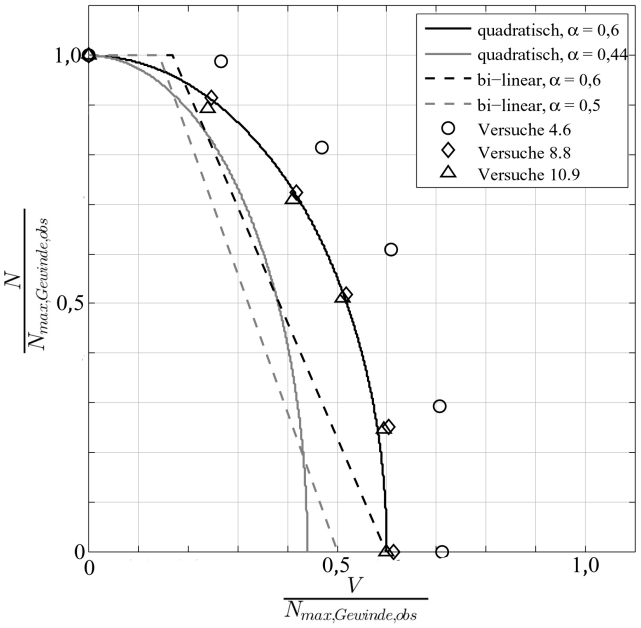


Abbildung 5.2.: Bezogene Bruchlasten (Mittelwerte), Gewinde in Scherfuge, Zug- und Scherkraftanteil bezogen auf gemessene reine Zugtragfähigkeit des Gewindes

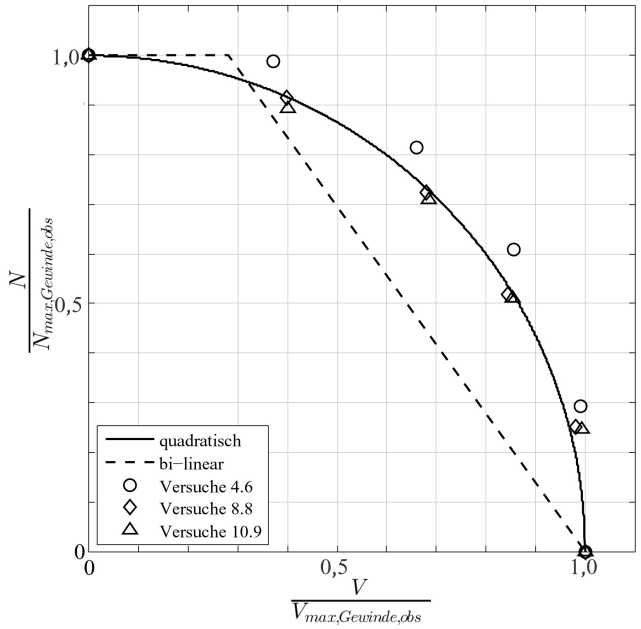


Abbildung 5.3.: Bezogene Bruchlasten (Mittelwerte), Gewinde in Scherfuge, Zugkraftanteil bezogen auf gemessene reine Zugtragfähigkeit, Scherkraftanteil auf gemessene reine Schertragfähigkeit des Gewindes

beiden Normen von 0,6. Die Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 zeigen mit 0,606 einen sehr ähnlichen Festigkeitskoeffizienten, die Werte aus den Normen mit 0,44 bzw. 0,5 liegen hierfür deutlich auf der sicheren Seite. Der Festigkeitskoeffizient der Schrauben der Festigkeitsklasse 4.6 liegt mit 0,712 ebenfalls deutlich über dem zugehörigen Normwert von 0,6.

Die Versuchsergebnisse der Schrauben mit Gewinde in der Scherfuge liegen alle auf der sicheren Seite der Nachweisfunktionen nach DIN EN 1993-1-8. Sowohl die Ergebnisse der Schrauben der Festigkeitsklasse 8.8 als auch 10.9 werden gut durch die DIN 18800-1-Funktion mit einem α von 0,6 beschrieben. Für die hier getesteten Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 ist der α-Wert von 0,5 deutlich auf der sicheren Seite. Auch die Werte der Schrauben der Festigkeitsklasse 4.6 liegen deutlich oberhalb der zugehörigen quadratischen Funktion mit einem α-Wert von 0,6.

Diese Betrachtungen gelten allerdings nur für die hier getesteten Schrauben, da der Festigkeitskoeffizient α auch innerhalb einer Schraubenfestigkeitsklasse streuen kann und damit der hier gemessene Wert jeweils nur für die Schrauben der jeweiligen Serie gilt.

Um die Abhängigkeit der Betrachtung vom Festigkeitskoeffizienten zu entkoppeln, wird eine zweite Darstellungsart gewählt, bei der die Scherkomponente nicht auf die Zugtragfähigkeit, sondern auf die für diese Schrauben-Serie im zweischnittigen Scherversuch ermittelte Schertragfähigkeit bezogen wird. Abbildung 5.3 zeigt dieses Diagramm. Durch diese Darstellungsart lässt sich das Verhalten der Schrauben unter kombinierter Last direkt mit den zur Diskussion stehenden Funktionen vergleichen.

Die Versuchsergebnisse der Schrauben mit Gewinde in der Scherfuge werden mit der quadratischen Funktion sehr gut beschrieben. Die Ergebnisse der Schrauben der Festigkeitsklasse 4.6 liegen sogar leicht oberhalb der Kreisfunktion.

5.1.2. Versuche mit Schaft in der Scherfuge

Die Bruchlasten der Versuche an Schrauben mit Schaft in der Scherfuge sind (analog zu Abbildung 5.1) in Abbildung 5.4 eingetragen. Die Versuche, bei denen das Versagen nicht in der Scherfuge, sondern im Gewindebereich der Schraube stattfand, sind dabei grau dargestellt.

Der leichte Anstieg der Traglasten von reinem Zug zu einem Lastwinkel von 15° zur Schraubenachse ist hier gut zu erkennen. Dabei bleibt der Zugkraft-Anteil beinahe konstant, das Gewinde außerhalb der Scherfuge versagt unter der Zugkomponente. Lediglich bei den Schrauben der Festigkeitsklasse 4.6, Serie 1 ist dies nicht der Fall: Dort war eine deutlich höhere Zugfestigkeit des Gewindes gegenüber dem Schaftquerschnitt beobachtet worden (Vergl. Tabelle 4.4), was dazu führte, dass die Schrauben schon bei einem Lastwinkel von 15° in der Scherfuge versagten.

Für die bezogene Darstellung muss zunächst die reine Zugtragfähigkeit des Schaftquerschnitts bestimmt werden. Dazu werden die in Kapitel 4.5.1 ermittelten mittleren Zugfestigkeiten des Schafts (Tabelle 4.4) verwendet. Mit dieser beobachteten Zugfestigkeit $f_{u,Schaft,obs}$ und der Schaftfläche kann die Zugtragfähigkeit des Schafts berechnet werden:

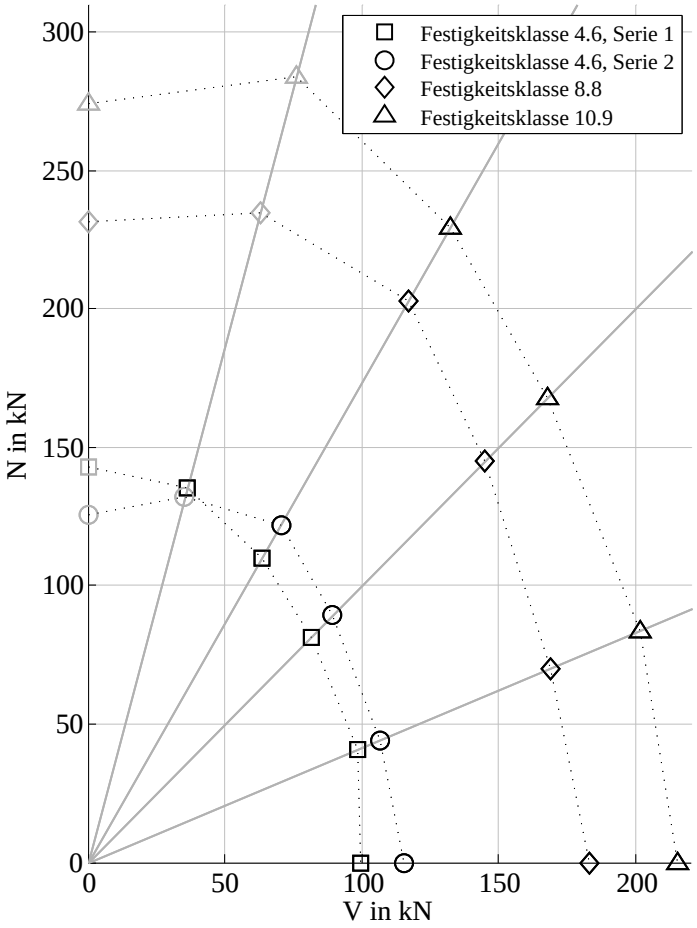


Abbildung 5.4.: Bruchlasten der Versuche mit Schaft in Scherfuge (Mittelwerte je Lastwinkel), zerlegt in Zug- und Scherkraftanteil, grau: Versagen im Gewinde

$$N_{max,Schaft} = A_{Schaft} \cdot f_{u,Schaft,obs} \tag{5.1}$$

In Abbildung 5.5 sind neben den auf die Zugtragfähigkeit des Schafts bezogenen Versuchsergebnissen auch wieder die Nachweisfunktionen aus den Normen dargestellt. Sowohl die Nachweisfunktionen nach DIN 18800-1[4] als auch die nach DIN EN 1993-1-8[5] erreichen maximal eine Zugausnutzung von 0,78 der Zugtragfähigkeit des Schafts: Dies entspricht dem Verhältnis von Gewinde- zu Schaftquerschnitt für Schrauben der Größe M 20 (für andere Schraubengrößen ist das Verhältnis identisch oder sehr ähnlich) und kennzeichnet damit den Punkt, an dem das Versagen vom Schaft in der Scherfuge in das Gewinde wechselt.

Die DIN EN 1993-1-8 gibt für alle hier untersuchten Schraubenfestigkeitsklassen für die Situation Schaft in der Scherfuge den Festigkeitskoeffizienten α mit 0,6 an. Die DIN 18800-1

[4]DIN 18800-1:2008-11, *Stahlbauten - Teil 1: Bemessung und Konstruktion.*
[5]DIN EN 1993-1-8:2012-10, *EC3 -Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen.*

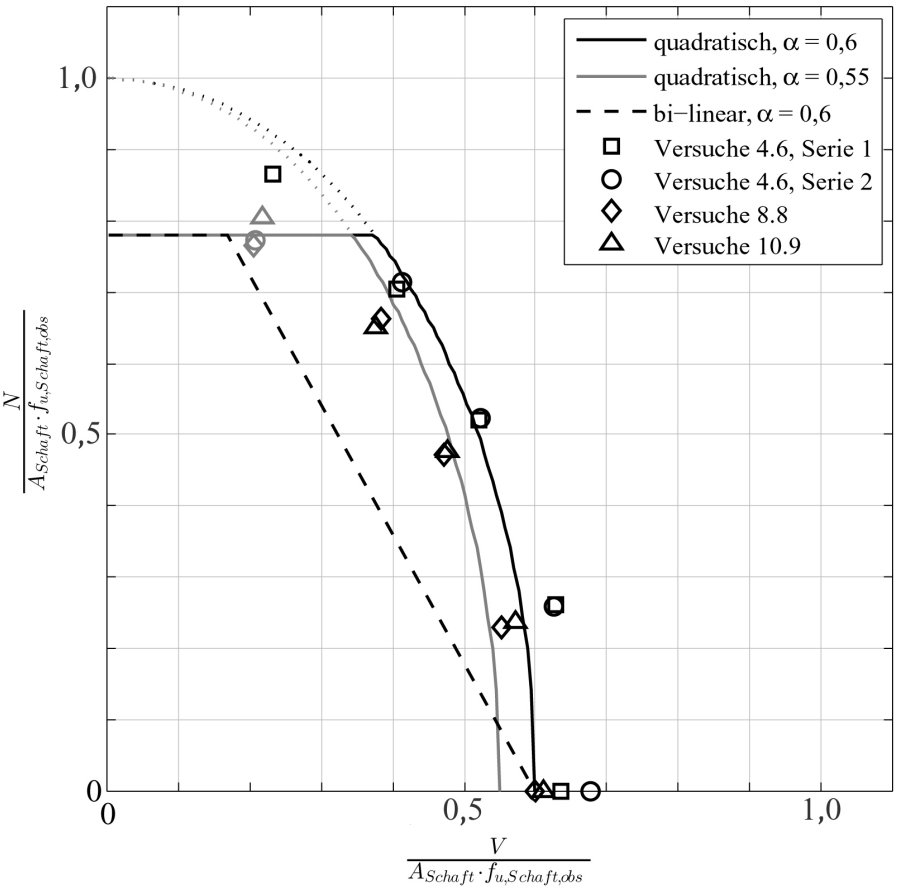


Abbildung 5.5.: Bezogene Bruchlasten (Mittelwerte), Schaft in Scherfuge, Zug- und Scherkraftanteil bezogen auf die ermittelte reine Zugtragfähigkeit des Schafts, grau: Versagen im Gewinde

verwendet den Wert 0,6 bis zur Festigkeitsklasse 8.8, für die Klasse 10.9 wird er auf 0.55 gesetzt.

Analog zu Abbildung 5.2 im vorangegangenen Kapitel können aus dem Diagramm in 5.5 die Festigkeitskoeffizienten der getesteten Schraubenserien mit Schaft in der Scherfuge auf der Abszisse abgelesen werden. Auch bei den Schrauben mit Schaft liegen die Festigkeitskoeffizienten der Schrauben der Festigkeitsklassen 8.8 und 10.9 mit 0,599 bzw. 0,612 nahe an dem Wert von 0,6. Der Wert der Schrauben der Festigkeitsklasse 4.6, Serie 2 liegt mit 0,676 wieder deutlich darüber. Die Schrauben der Festigkeitsklasse 4.6, Serie 1 haben mit 0,636 einen für Schrauben dieser Festigkeitsklasse relativ geringen Wert. Das passt zu den Ergebnissen der Materialtests in Kapitel 4.5.1: Das Material der Schrauben dieser Serie erreichte nicht die für diese Festigkeitsklasse geforderte Bruchdehnung. Da der Festigkeitskoeffizient von der plastischen Verformbarkeit des Materials abhängig ist (Vergl. Kapitel 2.3.2), bedeutet eine geringere Duktilität auch einen geringeren α-Wert.

Die teilweise stark unterschiedlichen Festigkeiten zwischen Schaft- und Gewindequerschnitt sind deutlich bei den Punkten der 0°- und 15°-Versuche erkennbar: Die Schrauben der Festigkeitsklasse 4.6, Serie 2 und der Festigkeitsklasse 8.8 weisen eine geringere Zugfestigkeit im Gewinde im Vergleich zum Schaftquerschnitt auf (siehe auch Tabelle 4.4). Dadurch liegen die Punkte im Diagramm für die Lastwinkel, unter denen die Schraube im Gewinde versagt, unterhalb des Flächenverhältniswerts von 0,78. Die Ergebnisse für diese Lastwinkel der Schrauben der Festigkeitsklasse 4.6, Serie 1, die eine starke Aufhärtung des Gewindes gegenüber dem Schaftquerschnitt besaßen, liegen deutlich darüber. Lediglich die Ergebnisse der Versuche an Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 liegen beinahe exakt auf dem Wert 0,78. Nur bei diesen Schrauben waren Zugfestigkeit von Schaft und Gewinde identisch.

Im Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Interaktionsfunktionen aus den Normen fällt auf, dass die Ergebnisse der höheren Schraubenfestigkeiten 8.8 und 10.9 merklich unter den quadratischen Funktionen liegen. Auch die niederfesten Schrauben beider Serien der

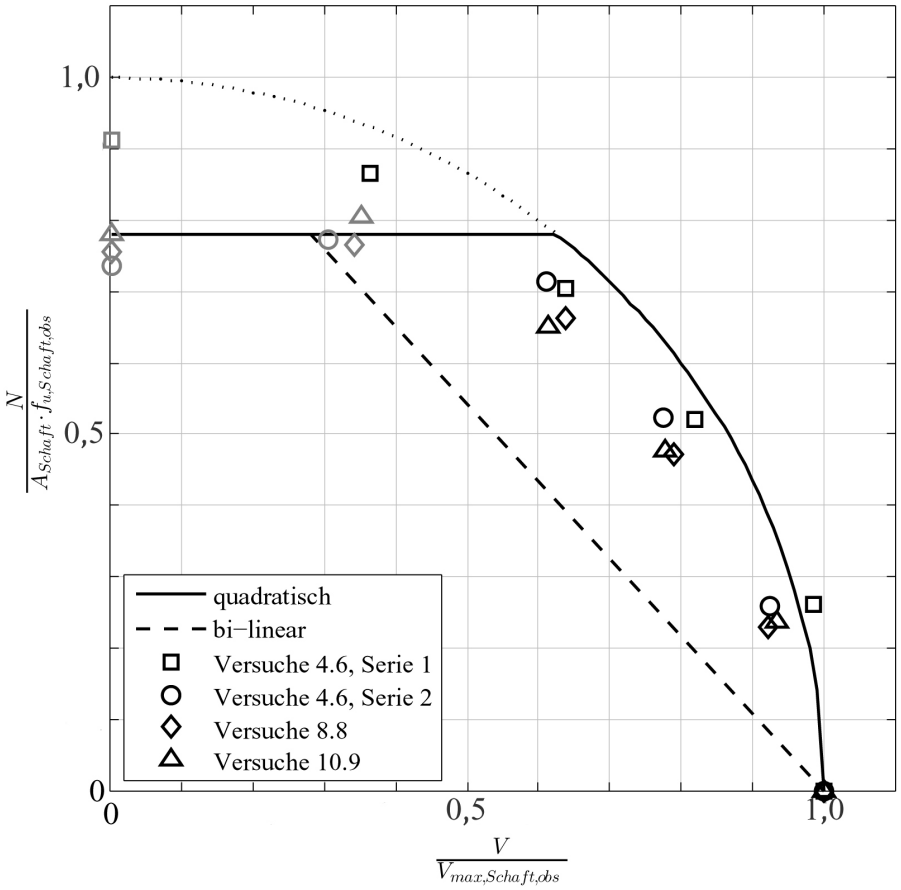


Abbildung 5.6.: Bezogene Bruchlasten (Mittelwerte), Schaft in Scherfuge, Zugkraftanteil bezogen auf die ermittelte reine Zugtragfähigkeit, Scherkraftanteil auf gemessene reine Schertragfähigkeit des Schafts, grau: Versagen im Gewinde

Festigkeitsklasse 4.6 liegen für den Lastwinkel 30° knapp unterhalb der Kreisfunktion.

Für die Betrachtung unabhängig vom Festigkeitskoeffizienten α wird auch für die Versuchsergebnisse der Schrauben mit Schaft in der Scherfuge die Darstellungsart gewählt, bei der die Scherkomponente auf die für diese Schrauben-Serie im zweischnittigen Scherversuch ermittelte Schertragfähigkeit bezogen wird. In der so gewonnenen Abbildung 5.6 zeigt sich, dass die quadratische Funktion für keine der Festigkeitsklassen eine zutreffende Beschreibung liefert. Stattdessen liegen alle Versuchsergebnisse deutlich unterhalb dieser Kurve. Dabei entfernen sich die Ergebnisse mit steigender Schraubenfestigkeit weiter von der quadratischen Beziehung. Gleichzeitig liegen aber alle Ergebnisse deutlich oberhalb der an die Nachweisfunktion der DIN EN 1993-1-8 angelehnten, bi-linearen Funktion.

5.1.3. Zusammenfassung der Beobachtungen aus den Versuchen

Die Auswertung der Versuche zeigt, dass die Betrachtung und der Vergleich mit bestehenden Grenzfunktionen aus den Normen sehr stark vom jeweiligen Festigkeitskoeffizienten der getesteten Schrauben abhängig ist. Außerdem ist die Kenntnis der tatsächlichen Zugfestigkeit des Querschnitts in der Scherfuge essentiell für eine bezogene Betrachtung und damit für den Vergleich mit möglichen Grenzfunktionen.

Durch die bezogene Darstellungsweise können die Versuchsergebnisse direkt mit diesen Funktionen verglichen werden. Dabei zeigt sich, dass die Versuchsergebnisse der Schrauben mit Gewinde in der Scherfuge gut mit einer quadratischen Funktion beschrieben werden können. Für die Ergebnisse der Schrauben mit Schaft in der Scherfunge ist dies nicht der Fall. Diese liegen, unabhängig von der Schraubenfestigkeitsklasse, deutlich unterhalb einer quadratischen Kurve. Allerdings liegt die an der Grenzbedingung aus der DIN EN 1993-1-8 orientierte bi-lineare Funktion im Vergleich zu den Versuchsergebnissen sehr weit auf der sicheren Seite.

5.2. Neuauswertung der vorangegangenen Versuchsreihen

Um einschätzen zu können, inwieweit die beobachteten Effekte auch schon in den früheren Studien auftraten, um die Qualität dieser Ergebnisse bewerten und um die Versuchsergebnisse untereinander vergleichen zu können, werden die Ergebnisse der bestehenden Versuchsreihen in vergleichbare Diagramme mit bezogenen Werten übertragen.

Die Schwierigkeit hierbei sind die fehlenden Bezugswerte. Für keine der Studien an ganzen Schrauben liegen zweischnittige Scherversuche vor, so dass die Schertragfähigkeiten nicht bekannt sind. Damit entfällt für diese Studien die Möglichkeit der Darstellung mit auf die Schertragfähigkeit bezogener Scherkraftkomponente wie in Abbildung 5.3 und 5.6. Es können hier lediglich Diagramme erzeugt werden, in denen sowohl Zug- als auch Scherkomponente auf die reine Zugtragfähigkeit bezogen werden, analog zu Abbildung 5.2 und 5.5. Nur für die Ergebnisse der Studien von Hassler[6] und Knobloch und Schmidt[7],

[6] Hassler, *(1973)*.
[7] Knobloch und Schmidt, *(1987)*.

die Versuche an Stangen und mit einer zweischnittigen Scherapparatur testeten, können beide Diagrammvarianten erstellt werden.

Für die Ergebnisse der Versuche an Schrauben mit Schaft in der Scherfuge ist die Aufbereitung noch problematischer, da die Bezugsgröße der Zugfestigkeit des Schafts fehlt. Sowohl die eigenen Versuche als auch die Aufarbeitung der bestehenden Versuchsreihen in Kapitel 3.3 haben gezeigt, dass sich die Zugtragfähigkeit des Gewindes, die aus dem Versuch unter reiner Zuglast ermittelt werden kann, in den seltensten Fällen direkt auf den Schaftquerschnitt übertragen lässt. Die Festigkeit zwischen den beiden Bereichen kann aufgrund von Aufhärtungen unterschiedlich sein. Zudem kann es bei kurzem freien Gewinde zu einer Traglaststeigerung durch eine verstärkte Querkontraktionsbehinderung kommen. Gleichzeitig kann die Zugfestigkeit des Schafts auch in den meisten Fällen nicht anhand von aus dem Schaft hergestellten Zugproben bestimmt werden, da das Schraubenmaterial über die Dicke des Querschnitts oft inhomogen ist.

Bei den im Rahmen dieser Arbeit getesteten Schrauben war ein homogenes Schraubenmaterial nur bei den Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 vorhanden (siehe Tabelle 4.4). Für alle anderen getesteten Schrauben lag die mithilfe der Zugproben bestimmte Zugfestigkeit noch weiter entfernt von der tatsächlichen, durchschnittlichen Zugtragfähigkeit des Schafts, als die aus den reinen Zugversuchen bestimmte Zugtragfähigkeit des Gewindes. Die jeweiligen Probleme mit der Determinierung der Zugfestigkeit bei den bisherigen Studien sind in Kapitel 3.3 ausführlich beschrieben.

Da bei den eigenen Versuchen die Zugtragfähigkeit des Gewindes näher an der des Schafts lag als die Ergebnisse der Zugproben, wird entschieden, diese als Bezugsgröße zu verwenden. Im Anhang A, in dem alle Einzelergebnisse der bisherigen Versuchsreihen zusammengefasst sind, werden die so ermittelten Bezugstragfähigkeiten mit angeführt.

Durch diese unsichere Bezugsgröße unterliegt die Betrachtung von bezogenen Werten für die bisherigen Versuche an Schrauben mit Schaft in der Scherfuge einer groben Ungenauigkeit. Dennoch werden auch für diese Diagramme mit bezogenen Werten erstellt, da aus ihnen Tendenzen des Interaktionsverhaltens abgelesen werden können.

In Anhang E sind alle so entstandenen Diagramme dargestellt. Um bei der Betrachtung auch einen Eindruck von der Streuung der Ergebnisse zu bekommen, sind die Einzelergebnisse hier ebenfalls in die Diagramme mit aufgenommen. Die zugehörigen Zahlenwerte können Anhang A entnommen werden. In den Diagrammen sind zum Vergleich ebenfalls die quadratische und die bi-lineare Funktion mit den entsprechenden α-Werten aus den beiden Normen dargestellt.

Hier soll zunächst beispielhaft detaillierter auf die Ergebnisse von Bilderbeek[8] und Knobloch und Schmidt[9] eingegangen werden. Diese wurden hauptsächlich zur Erstellung der Interaktionsgleichung in der DIN EN 1993-1-8[10] (Bilderbeek) bzw. der DIN 18800-1[11] (Knobloch und Schmidt) herangezogen. Anschließend wird zusammenfassend auf alle weiteren Untersuchungen eingegangen.

[8] Bilderbeek, *(1971)*.
[9] Knobloch und Schmidt, *(1987)*.
[10] DIN EN 1993-1-8:2012-10, *EC3 -Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen.*
[11] DIN 18800-1:2008-11, *Stahlbauten - Teil 1: Bemessung und Konstruktion.*

5.2.1. Neuauswertung der Ergebnisse von Bilderbeek

Abbildung 5.7 und 5.8 zeigen die Neudarstellung der Ergebnisse von Bilderbeek. Das Diagramm in Abbildung 5.7, in dem die Versuche mit Gewinde in der Scherfuge dargestellt sind, hat als Referenzkurven ausschließlich die Kurven mit einem α-Wert von 0,6, da Bilderbeek bei der Situation Gewinde in der Scherfuge nur Schrauben der Festigkeitsklassen 4.6 und 8.8 testete.

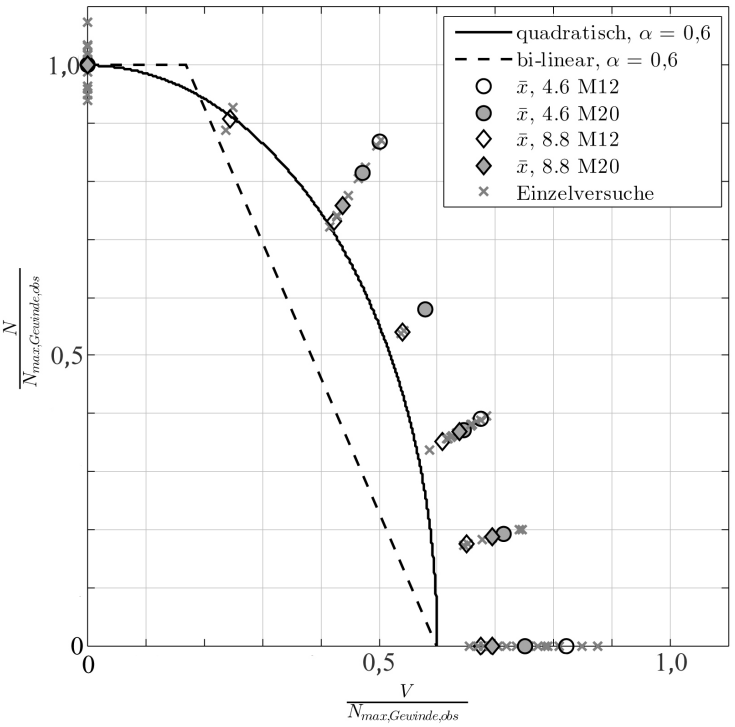


Abbildung 5.7.: bezogene Darstellung der Versuche von Bilderbeek, Gewinde in Scherfuge

Bilderbeek testete nicht in jeder Schraubenserie alle Belastungskombinationen, so dass bei einigen Lastwinkeln mehr Ergebnisse zu sehen sind als bei anderen. Bei Betrachtung der jeweils die zu einer Serie gehörenden Punkte, zeigen sich auch bei Bilderbeeks Ergebnissen Kurven, die auf einen quadratischen Zusammenhang hinweisen. Auch bei Bilderbeek liegen die Ergebnisse niederfester Schrauben oberhalb der Ergebnisse von hochfesten Schrauben. Ein Einfluss des Schraubendurchmessers, den Bilderbeek variierte, lässt sich nicht erkennen. Die Versuche unter reiner Scherkraft bei Bilderbeek wurden einschnittig ausgeführt, was zu höheren aufnehmbaren Lasten gegenüber zweischnittigem Abscheren führt, sodass die im Diagramm dargestellten Werte auf der Abszisse etwas über den unbekannten tatsächlichen Schertragfähigkeiten liegen dürften.

Bedenklich sind die großen Streuungen der Versuchsergebnisse, die besonders gut bei den Werten auf der Ordinate, die unter reiner Zuglast entstanden, zu erkennen sind. Dies lässt darauf schließen, dass die getesteten Schrauben der einzelnen Serien nicht als identisch betrachtet werden dürfen und somit ein Bezug der Ergebnisse aufeinander für eine

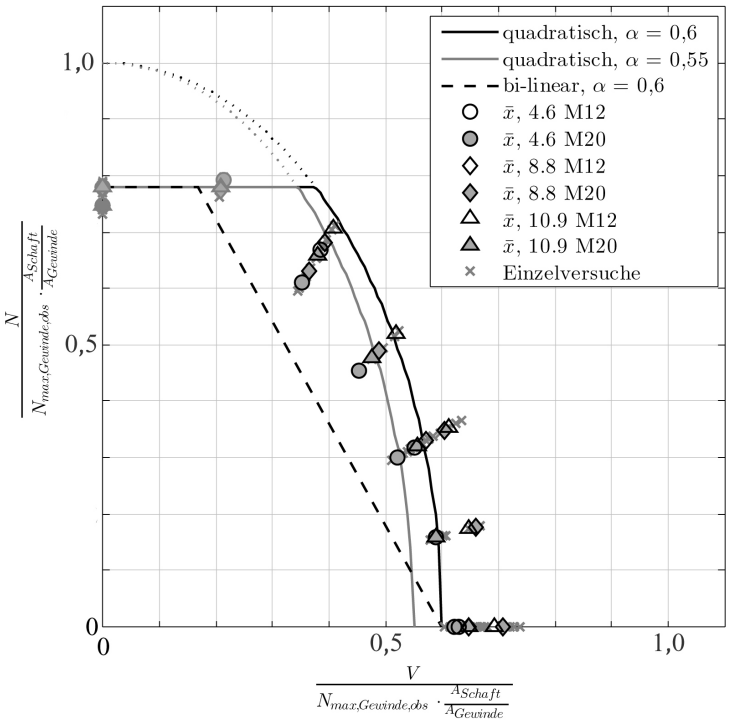


Abbildung 5.8.: bezogene Darstellung der Versuche von Bilderbeek, Schaft in Scherfuge

quantitative Auswertung nicht vertretbar ist.

Abbildung 5.8 zeigt das Diagramm der Versuche mit Schaft in der Scherfuge. Die Bezugskurven nach den Normen sind in diesem Diagramm beim bekannten Wert von 0,78, dem Verhältnis von Spannungs- zu Schaftquerschnitt von Schrauben der Größe M 20, abgeschnitten. Bilderbeek testete auch Schrauben der Größe M 12, für die der Verhältniswert bei 0,75 liegt. Deshalb liegen die Werte der Versuche unter reiner Zuglast für die Schrauben dieser Größe auf der Ordinate etwas tiefer.

Bei Bilderbeeks Ergebnissen zu Schrauben mit Schaft in der Scherfuge liegen die niederfesten Schrauben etwas unterhalb der Werte der hochfesten. Dies deutet darauf hin, dass besonders für diese Schrauben der aus dem reinen Zugversuch entnommene Bezugswert sehr weit von der tatsächlichen Zugtragfähigkeit des Schafts abweicht. Auch die Zusammenstellung der unterschiedlich ermittelten Zugfestigkeiten der von Bilderbeek getesteten Schrauben in Tabelle 3.2 deutet darauf hin, dass es beim Material dieser Schrauben die größten Festigkeitsschwankungen gibt. Tatsächlich dürfte die Zugtragfähigkeit des Schafts hier deutlich niedriger liegen, wodurch die Punkte im Diagramm, die zu Lastwinkeln gehören, bei denen die Schraube im Schaft versagt, weiter nach außen rücken würden.

Auch bei Bilderbeeks Versuchsergebnissen mit Schaft in der Scherfuge ist eine quantitative Auswertung damit nicht sinnvoll. Dennoch lässt sich aus den neu erstellten Diagrammen erkennen, dass die Versuche deutlich unter die quadratischen Ansatzfunktionen zurückfallen, aber dennoch deutlich über dem bi-linearen Ansatz liegen.

5.2.2. Neuauswertung der Ergebnisse von Knobloch und Schmidt

Knobloch und Schmidt verwendeten als Versuchskörper Rundstahl- und Gewindestangen, die Scherkraft wurde mit einem zweischnittigen Scherapparat aufgebracht. Dadurch steht aus den reinen Scherversuchen die reine Schertragfähigkeit als Bezugsgröße zur Verfügung. Als Bezugsgröße für die Zugkomponente liegen ausschließlich Ergebnisse von abgedrehten Zugproben vor. Da keine reinen Zugversuche an ganzen Stangen durchgeführt wurden, gibt es keine Anhaltspunkte, ob die so ermittelte Zugtragfähigkeit richtig ist oder ob auch bei diesen Probekörpern Inhomogenitäten über den Querschnitt vorliegen.

Abbildung 5.9 und 5.10 zeigen die neu erstellten Diagramme mit auf die Zug- und die Schertragfähigkeit bezogenen Werten. Diagramme, in denen beide Lastkomponenten auf die Zugtragfähigkeit bezogen wurden, finden sich auch in Anhang E.

Die Ergebnisse von Knobloch und Schmidt zeigen von allen Versuchsreihen die größten Streuungen. Eine so große Streuung bei Versuchskörpern, die je Serie aus einem einzigen Werkstück gefertigt wurden, ist nicht plausibel.

Die Versuchsergebnisse für die Situation Gewinde in den Scherfugen liegen größtenteils im Bereich der quadratischen Funktion. Lediglich die Versuche mit einem großen Scherlastanteil liegen etwas darunter. Es ist eine leichte Tendenz zu erkennen, dass die Ergebnisse der niederfesten Stangen etwas oberhalb der Ergebnisse der höherfesten Probekörper liegen. Ein Einfluss des Durchmessers ist nicht zu erkennen.

Die einzelnen Ergebnisse der Versuche mit Schaft in den Scherfugen liegen auch in der Nähe der Kreisgleichung. Betrachtet man aber die zusammengehörenden Ergebnisse einer Versuchsreihe, lässt sich kein Zusammenhang mit einer kreisförmigen Beziehung mehr ableiten. Besonders auffällig ist dies bei den Ergebnissen an Probekörpern des Materials C 45, bei denen die Mittelwerte zweier Zuglastniveaus oberhalb, der des dritten unterhalb der Kreiskurve liegen. Die Einzelergebnisse scheinen sich mehr oder weniger willkürlich um die Kurve zu gruppieren.

Dass die Versuchsergebnisse mit Schaft in den Scherfugen in der Nähe der Kreisfunktion liegen, überrascht, da dies in keiner der anderen Studien zu beobachten ist. Ein erster Interpretationsansatz wäre zu hinterfragen, ob die Verwendung von Stangen als Ersatzprobekörper und die Anordnung in einem Versuchsaufbau mit einem zweischnittigen Scherapparat überhaupt geeignet zur Untersuchung der Interaktion bei Schrauben ist. Allerdings verwendete auch Hassler[12] in seiner sehr kleinen Studie einen vergleichbaren Versuchsaufbau. Seine Ergebnisse liegen sehr eindeutig unterhalb der Kreisfunktion (vergl. Abbildung E.9).

Wahrscheinlicher ist, dass die von Knobloch und Schmidt ausschließlich an abgedrehten Proben bestimmte Bezugsgröße nicht der Festigkeit des ganzen Schafts entspricht. Wäre die tatsächliche Festigkeit höher, weil es in den Außenbereichen der Stangen Materialverfestigungen gibt, so müssten die Punkte im Diagramm tiefer liegen.

Weshalb die Streuung der Ergebnisse aber so deutlich ist und weshalb die Punkte einzelner Serien keinen Zusammenhang abzubilden scheinen, erklärt dies aber auch nicht. Deshalb wird empfohlen, die Ergebnisse dieser Versuchsserien von zukünftigen Betrachtungen auszuschließen.

[12] Hassler, *(1973)*.

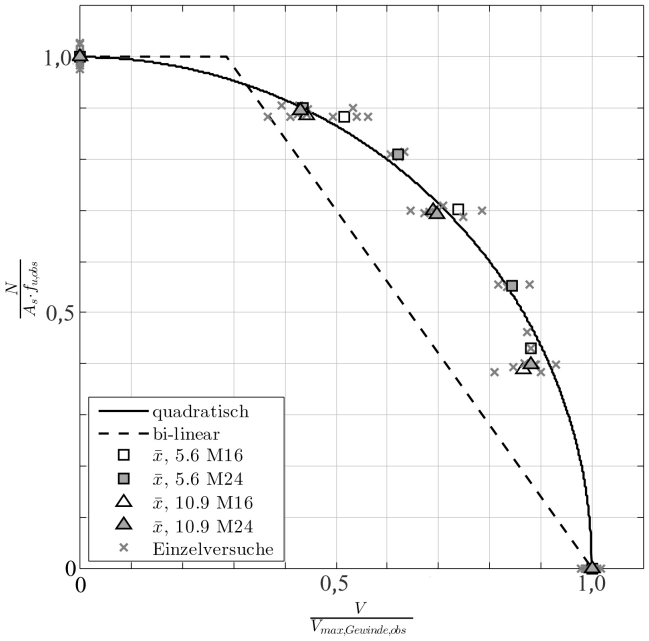


Abbildung 5.9.: bezogene Darstellung der Versuche von Knobloch und Schmidt, Gewinde in Scherfuge

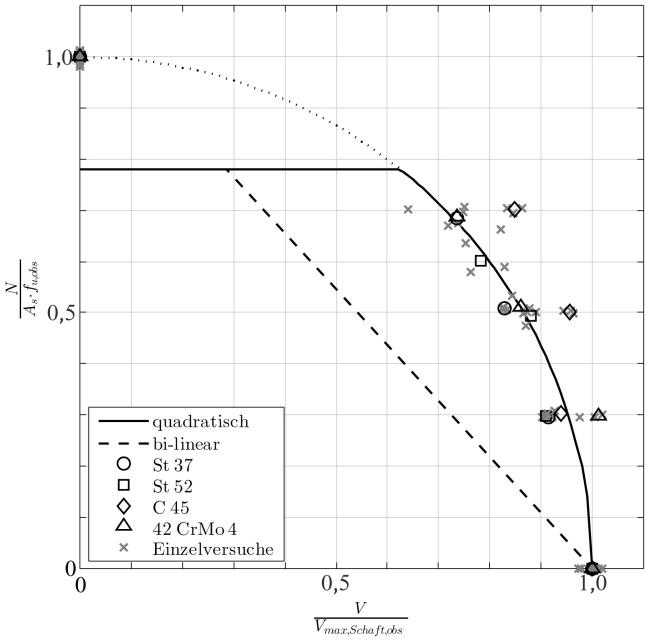


Abbildung 5.10.: bezogene Darstellung der Versuche von Knobloch und Schmidt, Schaft in Scherfuge

5.2.3. Neuauswertung sämtlicher vorangegangenen Versuche mit Gewinde in der Scherfuge

In Anhang E.1 sind die neu erstellten Diagramme für bestehende Versuche mit Gewinde in der Scherfuge zusammengestellt. Die Zug- und die Scherkomponente der Ergebnisse von Chesson, Bilderbeek und Shakir-Khalil und Ho werden jeweils auf die im reinen Zugversuch bestimmte Zugtragfähigkeit des Gewindes bezogen. Für die Ergebnisse von Knobloch und Schmidt kann neben dieser Darstellung auch ein Diagramm erstellt werden, in dem die Scherkomponente auf die im Scherversuch ermittelte reine Schertragfähigkeit bezogen wird. Hassler führte keine Versuche mit Gewinde in der Scherfuge durch.

Mit Ausnahme der Ergebnisse der Versuchsserie $\bar{A}$ von Shakir-Khalil und Ho, Abbildung E.3, liegen alle Ergebnisse im Bereich oder oberhalb der zugehörigen Kreisfunktionen aus der DIN 18800-1. Werden jeweils die zu einer Serie gehörigen Versuche betrachtet, so kann in beinahe allen Fällen beobachtet werden, dass eine quadratische Funktion das Verhalten gut beschreibt. Ausnahmen bilden hier die Serie $\bar{A}$ von Shakir-Khalil und Ho und einzelne der von Chesson u.a. erzeugten Werte, Abbildung E.1, die sich nicht ganz in einen harmonischen Verlauf einzupassen scheinen.

5.2.4. Neuauswertung sämtlicher vorangegangenen Versuche mit Schaft in der Scherfuge

In Anhang E.2 sind die Diagramme für die Versuchsreihen mit Schaft in der Scherfuge zusammengestellt. Auch hier können für die Versuchsreihen mit Schrauben als Versuchskörper ausschließlich Diagramme mit auf die reine Zugtragfähigkeit bezogenen Werten erstellt werden. Bei Chesson u.a. ist bei den mit dargestellten quadratischen und bi-linearen Grenzkurven der Wert der maximal erreichbaren Zugkraftausnutzung nach oben verschoben, da die Schrauben nach amerikanischer Norm über einen größeren Spannungsquerschnitt in Bezug auf den Schaftquerschnitt verfügen.

Wie oben beschrieben ist für keine der an Schrauben durchgeführten Versuchsserien die mittlere Zugtragfähigkeit des Schafts explizit bekannt. Es wird in den Diagrammen ersatzweise die auf den Schaftquerschnitt hochgerechnete Zugfestigkeit aus den im Gewinde versagenden reinen Zugversuchen verwendet.

Trotz der Ungenauigkeit der Bezugswerte lässt sich der bei den eigenen Versuchsreihen beobachtete Effekt, dass die Ergebnisse für die Situation Schaft in der Scherfuge den quadratischen Zusammenhang nicht erreichen, in allen Diagrammen deutlich erkennen, außer in denen mit den Ergebnissen von Knobloch und Schmidt, die aber wie oben beschrieben für eine Gesamtbetrachtung nicht berücksichtigt werden sollten.

5.3. Vergleich und Interpretation der Ergebnisse

Die Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche zeigen, dass weder die quadratische Interaktionsbeziehung der DIN 18800-1 noch die bi-lineare Funktion der DIN EN 1993-1-8 das Verhalten von Schrauben unter kombinierter Zug-Abscher-Last in allen Fällen hinreichend beschreiben und als Nachweisbedingung geeignet sind.

Zeigten die getesteten Schrauben mit Gewinde in der Scherfuge eine sehr gute Übereinstimmung mit dem quadratischen Zusammenhang, so lagen die Ergebnisse der mit Schaft in der Scherfuge getesteten Schrauben sichtbar darunter. Die sehr viel konservativere bilineare Nachweisfunktion enthält allerdings keinerlei Zusammenhang mit dem tatsächlichen Verhalten von kombiniert belasteten Schrauben und liegt auch für Schrauben mit Schaft in der Scherfuge mehr als deutlich auf der sicheren Seite.

Die Ergebnisse der hier durchgeführten Versuche zeigen auch, wie entscheidend es für die angestrebte Analyse des Tragverhaltens ist, die tatsächlichen Beschaffenheiten der getesteten Schrauben zu kennen, um in der Auswertung die richtigen Bezugswerte verwenden zu können. Da diese Bezugswerte für die in vorangegangenen Studien getesteten Schrauben nicht dokumentiert wurden, konnte für die Neuauswertung nur auf geschätzte Werte zurückgegriffen werden und Aussagen zu den Beobachtungen können lediglich von qualitativer Natur sein.

Dabei wird das in den eigenen Versuchsreihen beobachtete Verhalten weitestgehend bestätigt. Für Schrauben mit Gewinde in der Scherfuge deuten auch die Ergebnisse der bestehenden Versuchsreihen auf einen quadratischen Zusammenhang hin. Die Ergebnisse der Versuche mit Schaft in der Scherfuge lassen den Schluss zu, dass ein quadratischer Zusammenhang hier nicht unterstellt werden darf.

Eine Aussage, ob für Schrauben mit Gewinde in der Scherfuge grundsätzlich ein quadratischer Zusammenhang angenommen werden kann und welche Grenzfunktion für Schrauben mit Schaft in der Scherfuge angebracht wäre, lässt sich aber allein auf Basis der Versuchsergebnisse nicht treffen. Es kann keine abschließende Aussage getroffen werden, welche Effekte zur Verminderung der Tragfähigkeit von Schrauben mit Schaft in der Scherfuge gegenüber dem quadratischen Ansatz führen. Deswegen wird im Folgenden das Phänomen mithilfe der Methode der Finiten Elemente aufgearbeitet und untersucht.

6. Numerische Simulation

Zur weiteren Untersuchung wurden die Schrauben unter kombinierter Lasteinwirkung mithilfe der Methode der Finiten Elemente modelliert. Hierbei wurde das Programm ANSYS Workbench, Version 15.0.7 verwendet.

Um die Überlagerung von Zug- und Scherkraft in der Schraube abbilden zu können, wurde ein dreidimensionales Modell erstellt. Neben der Schraube wurden auch die lasteinleitenden Platten mit dem Schraubenloch modelliert, um die Scherfuge abbilden und die Lasten entsprechend der Versuchsanordnung auf die Schraube aufbringen zu können.

Wie in Schaumann u. a., *(2001)* dargestellt, ist bei Schraubenmodellierungen, bei denen das Gewinde mit abgebildet wird, „der Berechnungsaufwand [...] erheblich, besonders wenn die Schraube räumlich diskretisiert wird“[1]. Für die Situation Gewinde in der Scherfuge ist dieses Vorgehen aber unumgänglich. Die Versuchsergebnisse zeigen eindeutig, dass das Gewinde Einfluss auf das Tragverhalten hat. Deshalb war es notwendig, auch die tatsächliche Gewindegeometrie inklusive Gewindesteigung mit abzubilden. Eine Modellierung ohne Gewinde, z.B. durch Verwendung von abgeminderten Festigkeiten, würde qualitativ ähnliche Ergebnisse wie die Modellierung eines gewindefreien Schafts liefern und somit die Einflüsse des Gewindes nicht widerspiegeln. Auch eine Vereinfachung der Gewindegeometrie, wie z.B. die Modellierung eines rotationssymmetrischen Gewindes, würde hier falsche Ergebnisse liefern, da dadurch die Querschnittsfläche über die Schraubenlänge nicht konstant wäre.

Das Hauptaugenmerk der numerischen Simulation soll aber auf den Schrauben mit Schaft in der Scherfuge liegen. Hier werfen die Versuchsergebnisse, die deutlich unter die quadratische Interaktionsbedingung zurückfallen, die größten Fragen auf. Der glatte Schraubenschaft kann vergleichsweise unkompliziert und in einem gut strukturierbaren Modell numerisch abgebildet werden. Das erleichtert die Auswertung der Ergebnisse und Effekte, gleichzeitig kann leicht die Validität des Modells sichergestellt werden. Die Abbildung des Gewindes kann hier entfallen, da dieses nicht im Bereich der Scherfuge liegt und somit keinen Einfluss auf das untersuchte Tragverhalten hat.

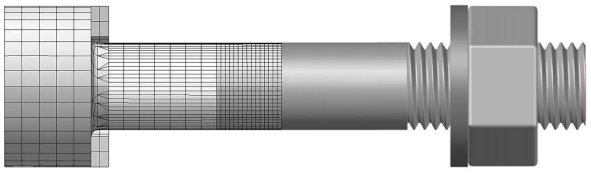


Abbildung 6.1.: Schraube mit Schaft in der Scherfuge - Modellbildung

Im Folgenden wird daher zunächst das Modell für die Situation Schaft in der Scherfuge dargestellt und daran die angewendeten Methoden erläutert.

[1] Schaumann u. a., *(2001)*.

6.1. Numerische Simulation der Schraube mit Schaft in der Scherfuge

6.1.1. Modellbildung und Geometrie

Die Geometrie des erstellten Modells der Schraube mit Schaft in der Scherfuge ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Die vorderen Hälften der Lasteinleitungsplatten und der Unterlegscheiben wurden ausgeblendet, um den Schraubenschaft sichtbar zu machen.

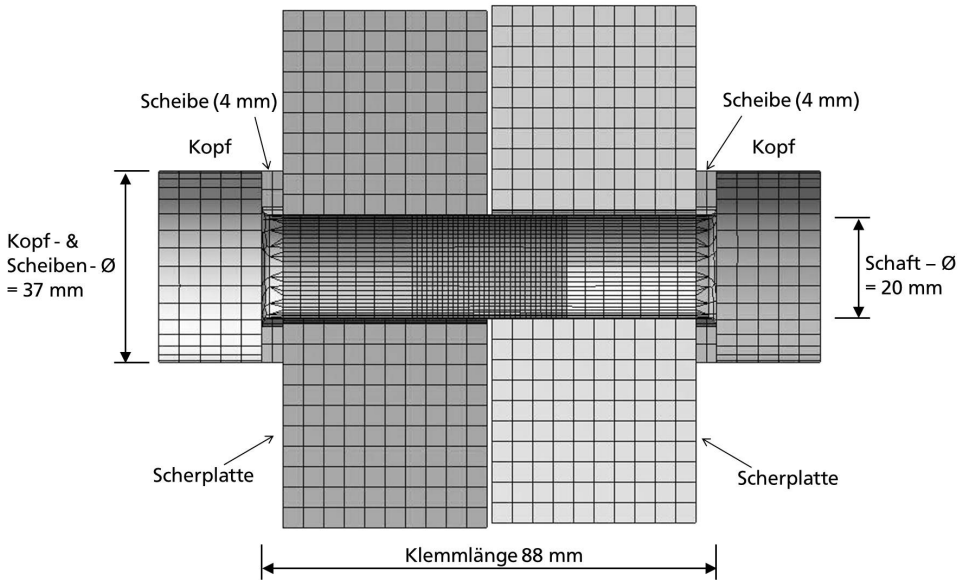


Abbildung 6.2.: Geometrie des Modells der Schraube mit Schaft in der Scherfuge

Die Schraube wurde als zylinderförmiger Volumenkörper modelliert. Dabei wurden die Maße der in den Versuchen getesteten Schrauben übernommen: Der Durchmesser des Schraubenschafts betrug 20 mm, die Klemmlänge 88 mm. Das Gewinde, das nur zu einem kleinen Teil in das Klemmpaket hineinreicht, wurde nicht mit abgebildet. Es lag deutlich außerhalb der Scherfuge und hatte somit auf die Tragwirkung unter kombinierter Last keinen Einfluss. Stattdessen wurde die Geometrie des Schraubenkopfes an beiden Enden des Schraubenmodells modelliert, wodurch ein symmetrisches Modell entsteht. Der Radius von 1,5 mm zwischen Schraubenschaft und -kopf wurde mit modelliert, sodass ein Übergang ohne scharfe Kanten gewährleistet war.

Die zur Lasteinleitung benötigten Platten wurden angelehnt an den Versuchsaufbau mit einem Loch mit Lochspiel 1 mm modelliert. Die Platten wurden so verschoben angeordnet, dass sie vor Beginn der Berechnung bereits am Schraubenschaft anlagen. Die Lasteinleitungsplatten wurden zylinderförmig modelliert, wodurch eine saubere Vernetzung ermöglicht wurde. Ihr Durchmesser entsprach dem fünffachen Schraubendurchmesser. Zwischen den beiden Lasteinleitungsplatten wurde ein Spalt der Breite 1 mm modelliert, um zu verhindern, dass zu Beginn der Berechnung hier ein Kontakt besteht.

Um den Radius am Schraubenkopf zu überbrücken, der nicht ins Plattenloch passen

würde, wurden auch die Scheiben unter dem Kopf mit abgebildet. Zur Vermeidung weiterer Querschnittsprünge wurde der Kopf als Zylinder mit dem größeren Durchmesser der Scheibe modelliert. Zwischen Kopf und Unterlegscheibe bestand voller Verbund.

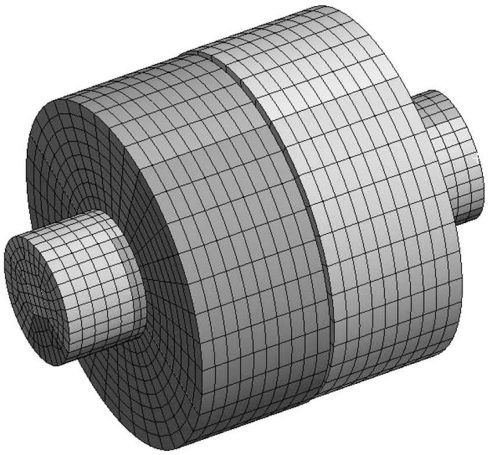


Abbildung 6.3.: Räumliche Darstellung des Gesamtmodells Schraube mit Lasteinleitungsplatten

Die Kontakte zwischen Schraube und Platten wurden als reibungsfrei modelliert. Dabei fungiert die Schraube als Kontaktkörper („Slave“), die Platten als Zielkörper („Master“). Vereinfachend wurden die Kontakte zwischen den Unterlegscheiben am Kopf und an den Lasteinleitungsplatten als voller Verbund ausgeführt, da hier keine Verschiebung zu erwarten war. Die Richtigkeit dieser Annahme wurde in mehreren Vergleichsrechnungen überprüft.

6.1.2. Elementierung

Das Volumenkörpermodell verwendet 3D-Elemente mit 20 Knoten zu je 3 Verschiebungsfreiheitsgraden und mit quadratischem Ansatz. Diese eignen sich besonders für die Abbildung fester Körper mit nichtlinearen Werkstoffgesetzen und großen Verformungen.

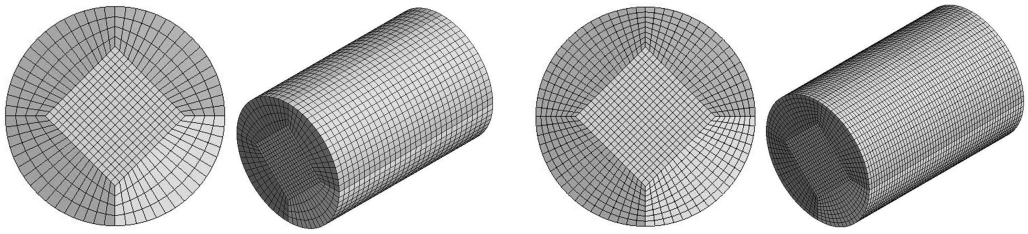


Abbildung 6.4.: Elementierung des Schafts im Bereich der Scherfuge, links: Elementkantengröße 1 mm, rechts: Elementkantengröße 0,5 mm

Der entsprechende im Programm ANSYS Workbench angebotene Elementtyp heißt SOLID186. Programmgesteuert können außerdem Kontaktelemente auf den Körper-Oberflächen

von Kontakt- und Zielkörper erzeugt werden. ANSYS Workbench verwendet hier standardmäßig die Elemente CONTA174 und TARGE170.

Für die Elementierung wurde das Modell in Teilkörper zerlegt. Dadurch lässt sich eine saubere Elementierung mit Hexaeder-Elementen erreichen. Im Bereich der Scherfuge, wo die Hauptverformungen auftreten, wurde auf einer Länge von 30 mm die Elementierung feiner gewählt (siehe Abbildung 6.2). In den Randbereichen konnte eine gröbere Vernetzung erfolgen.

Die Elementkantengröße in der Schraubenmitte wurde zu 1 mm gewählt. Die Elementierung in diesem Bereich ist in Abbildung 6.4, links dargestellt. In mehreren Kontrollrechnungen wurde ein Modell mit halber Kantenlänge gegengerechnet (Abbildung 6.4, rechts). Die Abweichung der Traglasten war stets kleiner als 1 %. Die Verformungen unter gleicher Last waren nahezu identisch. Das Modell mit 1 mm Kantenlänge ist somit ausreichend genau und kann für die weiteren Berechnungen herangezogen werden.

6.1.3. Materialgesetze

Wie die Versuche gezeigt haben, spielen Verfestigungseffekte bei der Untersuchung eine maßgebende Rolle. Daher müssen auch die für die numerische Simulation verwendeten Materialgesetze das Verhalten der Schraubenwerkstoffe nach Erreichen der Fließgrenze mit abbilden.

Zunächst wurde ein Materialgesetz entsprechend der Festigkeitsklasse 10.9 erstellt, da die stärksten Abweichungen von der quadratischen Interaktionsbeziehung in den Versuchen bei Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 auftraten. Zusätzlich wurde ein weiteres Materialgesetz für die Festigkeitsklasse 4.6 erstellt, um den Vergleich mit einem duktilen Schraubenwerkstoff zu ermöglichen.

Die Eingabe von Materialgesetzen in ANSYS Workbench erfolgt über die Kombination eines elastischen Bereichs, der über E-Modul und Querkontraktionszahl beschrieben wird, und einer anschließenden, multi-linearen Verfestigungsfunktion. Hier wird die Spannungs-Dehnungs-Beziehung für eine reine, ein-axiale Zugbeanspruchung hinterlegt. Dem Materialgesetz liegt die Gestaltänderungshypothese nach von Mises zugrunde, mithilfe derer die ein-axiale Beziehung auf die anderen Raumrichtungen übertragen wird.

Die Erstellung der verwendeten Materialmodelle erfolgte in mehreren Schritten. Als Grundlage für den Spannungs-Dehnungsverlauf dienten die an den Zugproben ermittelten Spannungs-Dehnungs-Kurven (Anhang D Abbildung D.2 und D.4). Diese wurden bis zur Zugfestigkeit durch einen Polygonzug approximiert.

Dabei wurde die Steigung im elastischen Bereich bis zum Erreichen der Fließgrenze durch den E-Modul des Stahls von 210.000 N/mm^2 definiert. Da das Material der Festigkeitsklasse 4.6 über eine sehr große Verfestigung nach Erreichen der Fließgrenze verfügt, wurde es anschließend durch einen bi-linearen Polygonzug angenähert. Die Verfestigung des Materials der Festigkeitsklasse 10.9 ist sehr viel geringer und kann näherungsweise durch eine Gerade abgebildet werden. Für die Festigkeitsklasse 4.6 musste der Polygonzug noch skaliert werden, da die tatsächliche, durchschnittliche Festigkeit des Schaftquerschnitts über der in der Zugprobe ermittelten Festigkeit liegt (Vergleich Kapitel 4.2.3).

Die so entstandenen Materialgesetze enthalten die technischen Spannungen. Die Berechnung der Spannungen beruht auf dem Bezug zum Ausgangsquerschnitt. Um das Werk-

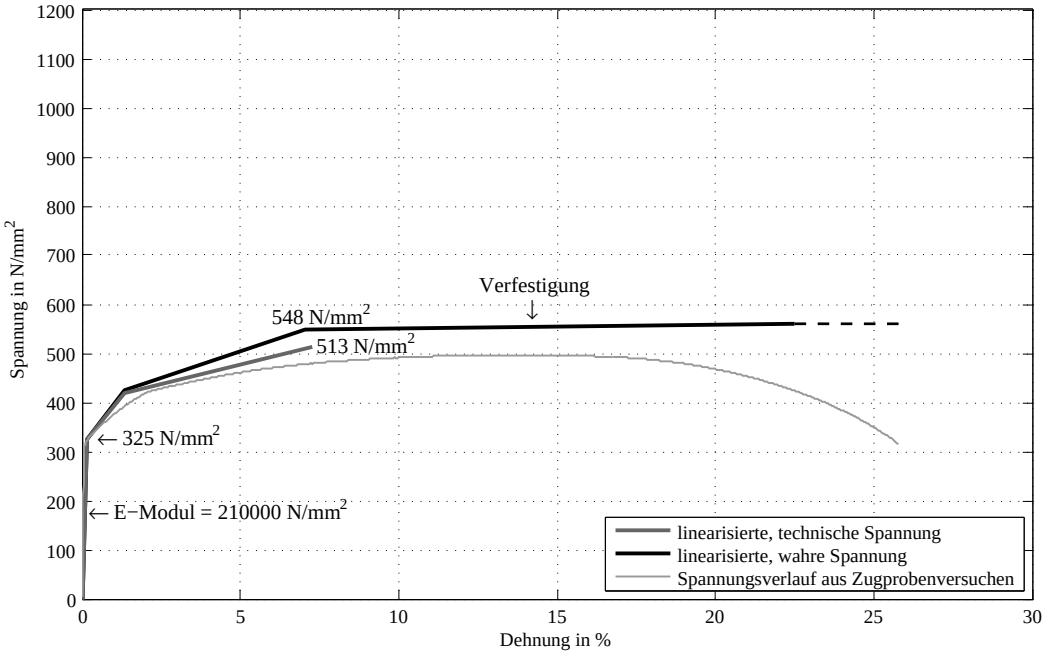


Abbildung 6.5.: In Finite-Element-Berechnung implementiertes Materialgesetz, Festigkeitsklasse 4.6

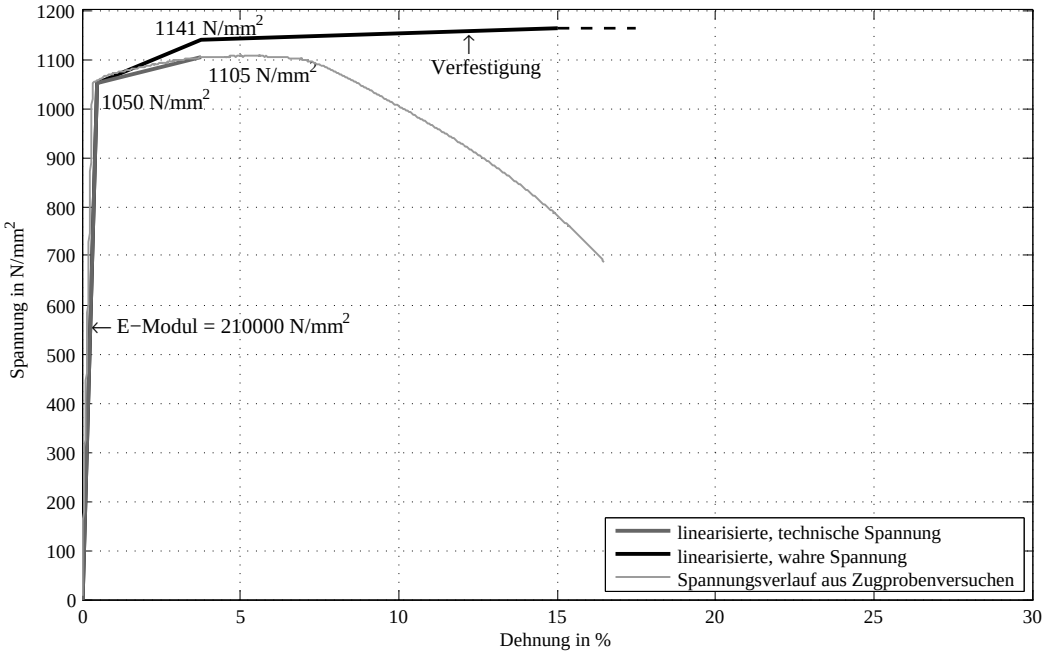


Abbildung 6.6.: In Finite-Element-Berechnung implementiertes Materialgesetz, Festigkeitsklasse 10.9

stoffverhalten in der Finite-Element-Modellierung abzubilden, werden wahre Spannungen benötigt. Diese beziehen sich auf den jeweiligen aktuellen Querschnitt, sie berücksichtigen die Querkontraktion, die der Stahl unter einer Dehnung erfährt.

Da vorausgesetzt werden kann, dass das Volumen des Körpers (bei üblichen metallischen Werkstoffen) erhalten bleibt, lassen sich wahre Spannung σ_w und Dehnung ϵ_w aus der technischen Spannung σ_t und Dehnung ϵ_t berechnen:

$$\sigma_w = \sigma_t(1 + \epsilon_t) \tag{6.1}$$

$$\epsilon_w = ln(1 + \epsilon_t) \tag{6.2}$$

Die unterstellte Volumenkonstanz gilt nur bis zum Beginn der Einschnürung der Zugprobe. Dies geschieht bei Erreichen der technischen Zugfestigkeit. Von da an wird nicht mehr der gesamte Querschnitt schmaler, sondern die Verformungen konzentrieren sich auf die Stelle der Einschnürung, an der die Zugprobe schließlich versagt.

Bei der Eingabe eines solchen Materialgesetzes in ANSYS Workbench als multi-lineare Verfestigung ergänzt das Programm das Materialgesetz automatisch um einen horizontalen Ast. Dies bedeutet, dass in einem Element, das die letzte im Materialgesetz angegebene Dehnung erreicht, bei weiterer Dehnungssteigerung die Spannung konstant gehalten wird. Dadurch wird aber das Erreichen eines Gleichgewichtszustands in der Berechnung ungleich komplizierter und die Berechnung damit instabiler. Um dies zu vermeiden, wurden die Materialgesetze um einen nur annähernd horizontalen Ast bis zum Erreichen der Bruchdehnung ergänzt. Die erzeugten Materialgesetze für die numerische Simulation sind in den Abbildungen 6.5 und 6.6 dargestellt.

Als Materialgesetz für die Lasteinleitungsplatten wurde ein rein lineares Materialgesetz mit einem um den Faktor 1000 erhöhten E-Modul angesetzt. Auch hier wurde durch Kontrollrechnungen ein Einfluss des Plattenmaterials auf die Traglast ausgeschlossen. Durch die sehr steifen Platten wird vermieden, dass Verformungseffekte der Platten die Auswertung beeinflussen.

6.1.4. Lagerung und Lastaufbringung

Die Belastung der Schraube erfolgte wie im Versuch über Lasteinleitungsplatten. Dafür wurde eine der Platten unverschieblich gehalten und die Belastung durch die zweite Platte aufgebracht. Das Prinzip zeigt Abbildung 6.7. Zusätzlich musste die Platte, über die die Belastung aufgebracht wurde, gegen Kippen um ihre Achsen gehalten werden und die Schraube gegen Verdrehung um ihre Längsachse. Außerdem wurde dem Programm erlaubt, automatisch sogenannte „schwache Federn“ zu generieren. Diese Federn dienten der numerischen Stabilisierung: Da die Schraube nur über Kontakt durch die Lasteinleitungsplatten gehalten wurde, wäre das Modell ohne die rechnerische Annahme einer sehr schwachen Lagerung nicht lösbar gewesen.

Prinzipiell kann zwischen zwei Arten zum Aufbringen der Belastung unterschieden werden: Über das direkte Aufbringen einer Kraft oder über das Aufbringen einer Verschiebung, die dann Spannungen in der Schraube und somit eine Reaktionskraft zur Folge hat.

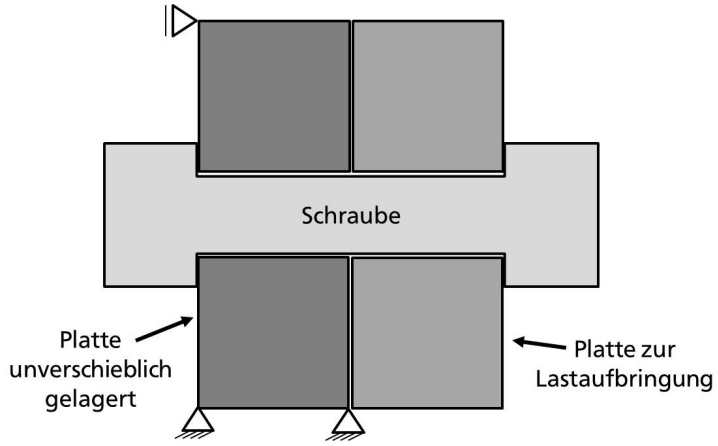


Abbildung 6.7.: Lagerungsprinzip des Berechnungsmodells: Eine der lasteinleitenden Platten wird gehalten, die andere belastet

In beiden Fällen wird die Belastung so lange gesteigert, bis die maximal aufnehmbare Last erreicht ist. Das Aufbringen der Belastung über eine Verschiebung hat dabei den Vorteil, dass eine Berechnung über den Punkt der maximal aufnehmbaren Belastung hinaus erfolgen kann. Nach Erreichen der Traglast wachsen die Verformungen weiter an, während die Reaktionskraft sinkt.

Wird die Belastung als Kraft generiert, kann die Last nur bis zur Maximalbelastung gesteigert werden. Darüber hinaus ist es nicht mehr möglich, ein rechnerisches Gleichgewicht zu erzeugen. Eine erfolgreiche Berechnung endet hier folglich immer mit einem Berechnungsabbruch.

Wegen der besseren Handhabung läge es also nahe, die Belastung über eine Verschiebung zu generieren. Allerdings hat dieser Weg für das vorliegende Problem einen entscheidenden Nachteil: Für die Aufbringung einer Verschiebung muss der Zusammenhang zwischen Kraft- und Verschiebungsrichtung bekannt sein. Dies ist nicht der Fall, wie im Folgenden anhand einer Beispielberechnung gezeigt wird.

Belastung durch Aufbringen einer Verschiebung im Winkel 45° zur Schraubenachse

Auf das in Abbildung 6.8 gezeigte Modell wurde eine Verschiebung im 45°-Winkel zur Schraubenachse auf die untere, nicht gehaltene Lasteinleitungsplatte aufgebracht, also eine betragsmäßig identische Verschiebung in Richtung der Schraubenlängsachse sowie senkrecht dazu. Das zweite bis vierte Bild zeigen die Verformungen in der Schraube zu den Berechnungsschritten, bei denen die Verschiebungskomponenten 3, 5 und 8 mm betragen. Zusätzlich ist die Richtung der Kraftreaktion in der gehaltenen Platte zur jeweiligen Verschiebungssituation mit dargestellt.

Die Richtung der Kraftresultierenden weicht deutlich von der Verschiebungsrichtung ab. Sie liegt in etwa in einem Winkel von 20° zur Schraubenlängsachse. Sie ist außerdem nicht über die Belastungshistorie konstant: Mit steigender Verschiebung wird der Winkel zunächst steiler, um nach Erreichen der maximalen Kraftreaktion wieder abzuflachen.

Verantwortlich für die Unterschiede zwischen Verschiebungs- und Kraftrichtung sind die

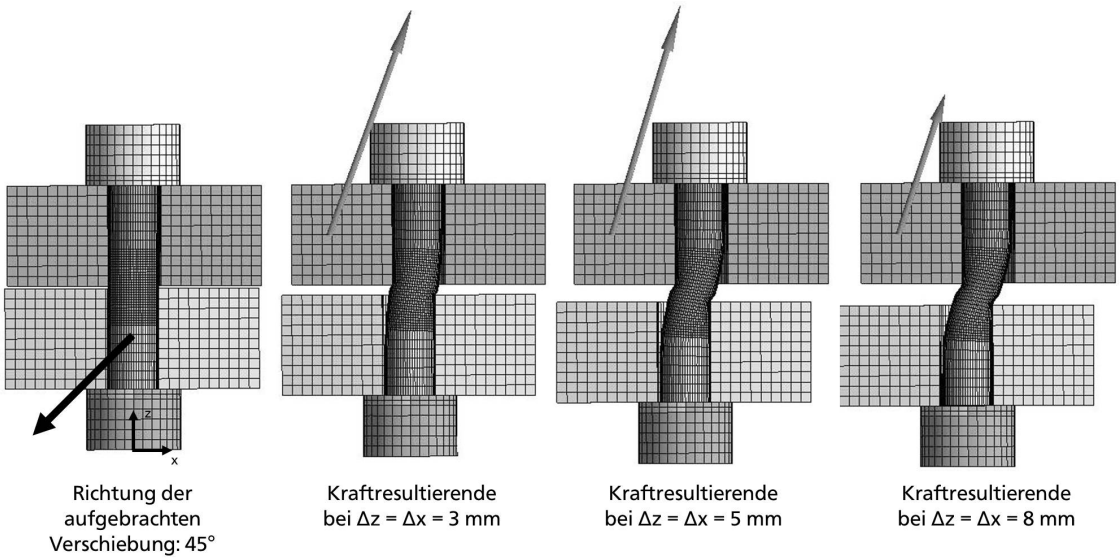


Abbildung 6.8.: Modell mit aufgebrachter Verschiebung der Lasteinleitungsplatte im Winkel 45° zur Schraubenachse, links: unverformt, daneben: verschiedene Verschiebungsstufen[2]

unterschiedlichen Steifigkeiten der Schraube in Längs- und Querrichtung. In ihrer Längsachse bringt die Schraube einer Zugkraft, die eine Längsdehnung zur Folge hat, eine größere Steifigkeit entgegen als ihr in der Scherfuge befindlicher Querschnitt einer Scherlast, die eine Schubverzerrung des Querschnitts zur Folge hat.

Die Kraft, die aufgebracht werden muss, um die Schraube um einen Weg Δz zu verlängern, ist also größer als die Kraft, die aufgebracht werden muss, um die Schraube um einen identisch großen Weg Δx zu scheren.

Bei gleichzeitiger Längung und Scherung haben die Verformungen in der einen Richtung zudem einen Einfluss auf die Steifigkeit der jeweils anderen Richtung. Durch die Querkontraktion aus der Längung wird die Schersteifigkeit geringer, durch die Versetzung im Querschnitt beim Scheren nimmt die Längssteifigkeit ab. Da diese gegenseitige Beeinflussung nicht zu jedem Verschiebungszeitpunkt im gleichen Maße auftritt, ist die Richtung der Reaktionskraft über die Belastungshistorie nicht konstant.

Belastung durch Aufbringen einer Kraft im Winkel 45° zur Schraubenachse

Durch das Aufbringen der Belastung als Kraft ist die Richtung der Last eindeutig. Die zugehörige Kraftresultierende in der gehaltenen Platte steht genau entgegengesetzt (siehe Abbildung 6.9). Damit ist die Belastungssituation unter einem Lastwinkel von 45° gut abgebildet.

Die Last wurde schrittweise aufgebracht. Solange sich die Schraube im elastischen Bereich befindet, können die Lastschritte groß gewählt werden. Im Bereich der maximalen Traglast

[2]Die Stelle, an der der Pfeil der Lastreaktion dargestellt wird, hat keine Bedeutung, sie wird vom Programm zufällig an eine beliebige Stelle der Lagerung gesetzt.

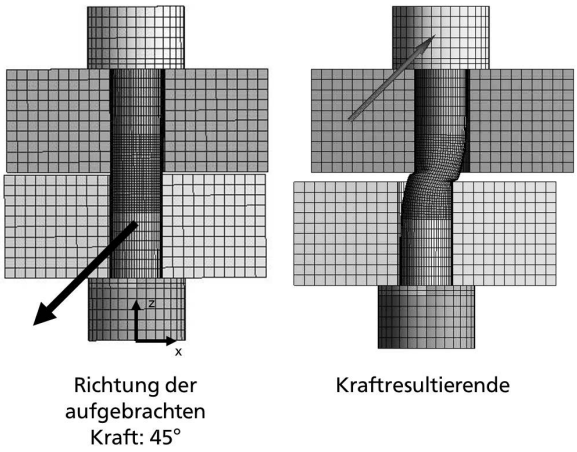


Abbildung 6.9.: Modell mit aufgebrachter Kraft auf die Lasteinleitungsplatte im Winkel 45° zur Schraubenachse, links: unverformt, rechts: bei maximaler Last

sind kleinere Lastintervalle notwendig, damit die Berechnung bei den dort auftretenden großen plastischen Verformungen konvergiert.

Sobald kein Gleichgewicht mehr erzielt werden kann, bricht die Berechnung ab. Die an dieser Stelle erreichte Last wird als Traglast ausgewertet. Wurden allerdings die Intervallschritte zu groß gewählt, kann es sein, dass die Berechnung zu früh abbricht, die Rechnung unterschätzt somit die Traglast. Deshalb ist es für diese Art der Belastung notwendig zu wissen, in welchem Bereich die zu erwartende Traglast liegt, um die Intervallgröße anpassen zu können. Gegebenenfalls muss die Berechnung mit angepassten Lastschritten wiederholt werden.

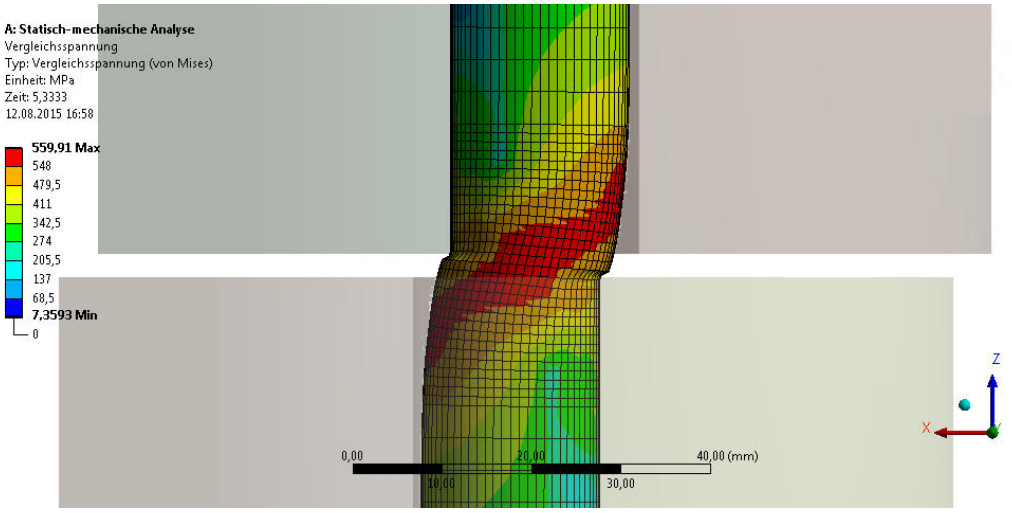


Abbildung 6.10.: Schraube mit Materialmodell für Festigkeitsklasse 4.6 unter Lastwinkel 45°, von Mises-Vergleichsspannungen auf Schraubenoberfläche bei maximaler Belastung

In Abbildung 6.10 ist die Verteilung der VON MISES-Vergleichsspannungen im Bereich der Scherfuge bei Erreichen der Maximallast zu sehen. Dargestellt ist eine Schraube des Materialmodells 4.6 unter dem Lastwinkel 45°. Die farbliche Darstellung der Spannungsverläufe ist so skaliert, dass die Bereiche, in denen die Zugfestigkeit von 548 N/mm^2 erreicht ist, rot dargestellt werden. Die restliche Farbskala ist gleichmäßig verteilt auf den Bereich zwischen 0 N/mm^2 und der Zugfestigkeit.

Die maximalen Spannungen, die zum Versagen führen, bilden sich schräg zu den Platten aus. Der Winkel der versagenden Achse ist dabei etwas flacher als der Winkel der Lastrichtung, er liegt etwa bei 60°. Ein vergleichbarer Versagensschnitt trat auch in den Versuchen auf (vergl. Abbildung C.11 bis C.14). Auch die Eindrückungen am Schraubenschaft an den Stellen, an denen die Lasteinleitungsplatten in die Schraube drücken, werden vom Modell gut abgebildet[3].

6.1.5. Ergebnisse unter verschiedenen Lastwinkeln

Wie schon in den Versuchen wurden auch bei der numerischen Simulation unterschiedliche Lastwinkel untersucht. Die Lastwinkel von 15°, 30°, 45° und 67,5° entsprachen denen der Versuche, weiterhin wurden auch die Situationen reiner Zug (0°) und reines Abscheren (90°) untersucht.

Abbildung 6.11 und 6.12 zeigen die Ergebnisse der Berechnungen am Modell beider Festigkeitsklassen unter den unterschiedlichen Lastwinkeln jeweils zum Zeitpunkt der maximalen Last. Dargestellt sind die maßstäblich abgebildeten Verformungen der Schraube sowie der Verlauf der VON-MISES-Vergleichsspannung. Anhand der Verläufe der Vergleichsspannung lässt sich gut erkennen, wie der Bereich der maximalen Spannungen mit steigendem Lastwinkel flacher wird und sich immer mehr im Bereich der Scherfuge konzentriert. Gleichzeitig wächst die Spannung an den Stellen, an denen die Schraube an den Lasteinleitungsplatten anliegt und somit die Scherkraftkomponente eingeleitet wird.

Die Verformungen aus den Versuchen (Abbildungen C.11 bis C.14) können gut abgebildet werden. Beim duktileren Materialmodell für die Festigkeitsklasse 4.6 sind die Verformungen zum Versagenszeitpunkt deutlich größer als bei der Berechnung mit dem Materialmodell für die Festigkeitsklasse 10.9.

Wie die weggesteuerte Berechnung gezeigt hat, können Kraft- und Verschiebungswinkel nicht gleichgesetzt werden. Auch ist das Verhältnis von Scherweg der Schraube zur Längung nicht über die ganze Belastungshistorie konstant. In den Abbildungen 6.13 und 6.15 ist die Längung der Schraube über dem Scherweg für beide Materialien aufgetragen[4].

Das Ende der jeweiligen Kurven zeigt den Verformungszustand bei Erreichen der Maximallast. Wie zu erwarten steigt der Scherweganteil mit steigendem Scherkraftanteil. Bei einem Lastwinkel von 45°, bei dem Zug- und Scherkraftkomponente identisch sind, liegt das

[3] Wie in 6.1.3 beschrieben, wurden die Platten mit einem um den Faktor 1000 erhöhten E-Modul modelliert. Dies hat keinen sichtbaren Einfluss auf die Schraubenverformungen. Durch das sehr viel größere Volumen verformen sich die Lasteinleitungsplatten auch bei Modellierung mit realistischer Steifigkeit nur minimal, wie die Kontrollrechnung zeigte. Dies konnte auch in den Schraubenversuchen beobachtet werden, bei denen auch bei Versuchen an hochfesten Schrauben nur minimale Plattenverformungen auftraten.

[4] Als Referenzpunkt für die gemessene Verschiebung wird ein Punkt auf der Innenseite der belasteten Lasteinleitungsplatte herangezogen. Aufgrund der hohen Steifigkeit des Plattenmaterials ist der Verformungsanteil der Platte vernachlässigbar gering.

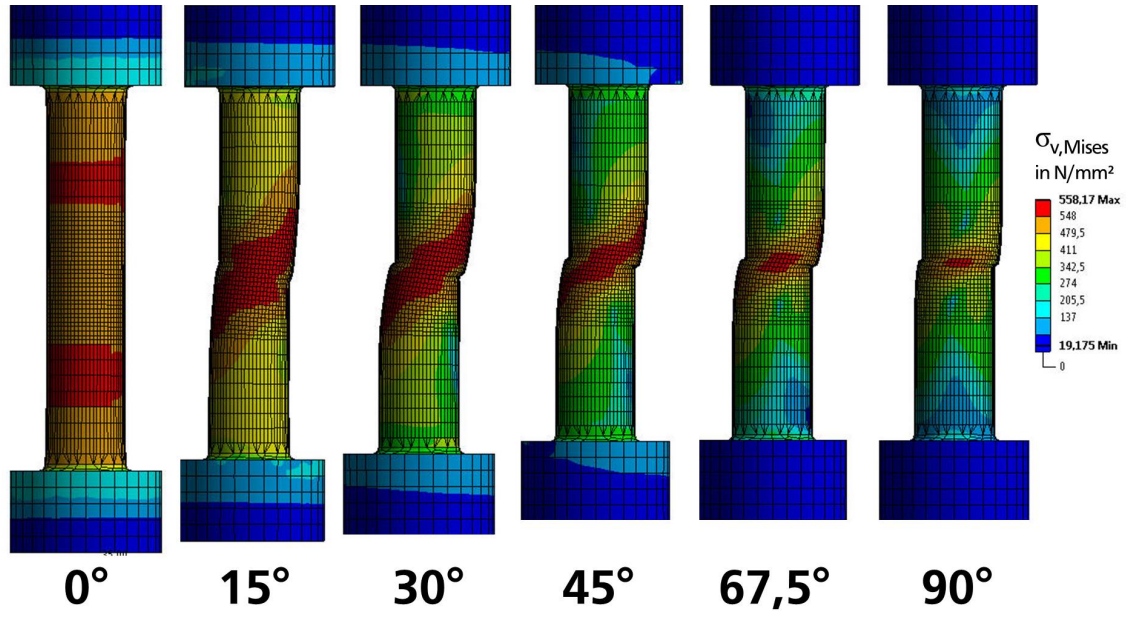


Abbildung 6.11.: Verformung und Vergleichsspannungsverläufe Festigkeitsklasse 4.6 unter den verschiedenen Lastwinkeln bei maximaler Last

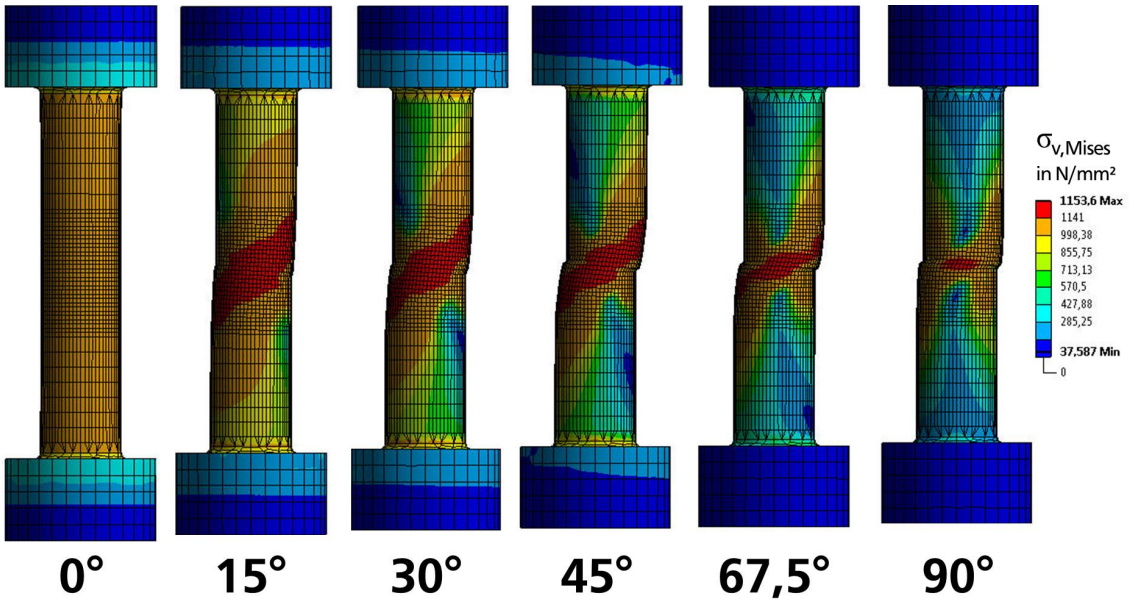


Abbildung 6.12.: Verformung und Vergleichsspannungsverläufe Festigkeitsklasse 10.9 unter den verschiedenen Lastwinkeln bei maximaler Last

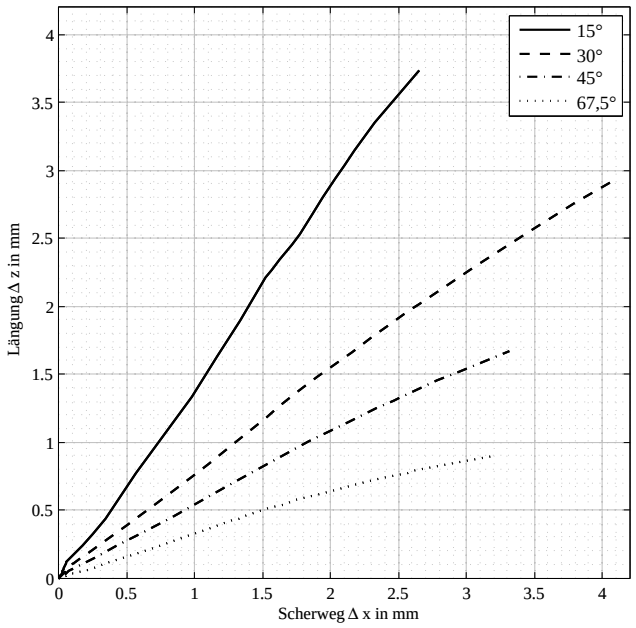


Abbildung 6.13.: Längung der Schraube über Scherweg, Festigkeit 4.6, Klemmlänge 88 mm

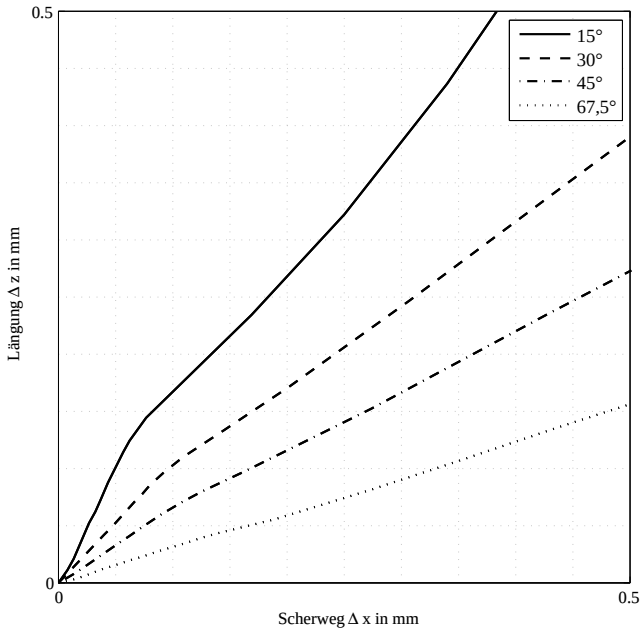


Abbildung 6.14.: Anfangsbereich: Längung der Schraube über Scherweg, Festigkeit 4.6, Klemmlänge 88 mm

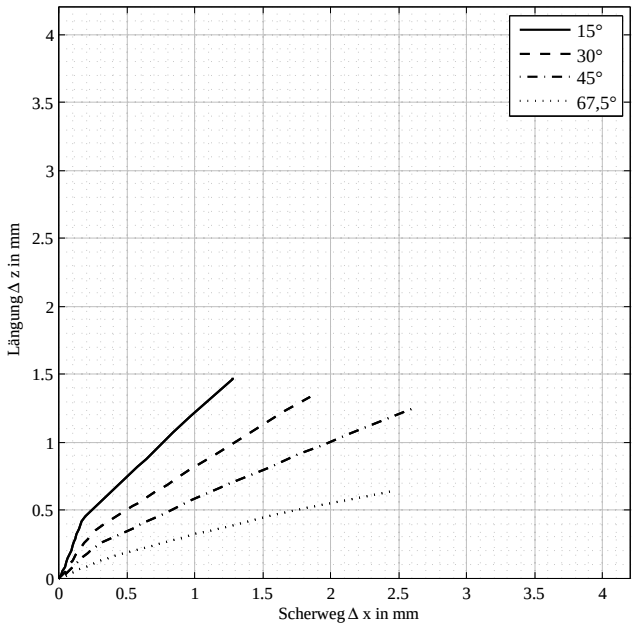


Abbildung 6.15.: Längung der Schraube über Scherweg, Festigkeit 10.9, Klemmlänge 88 mm

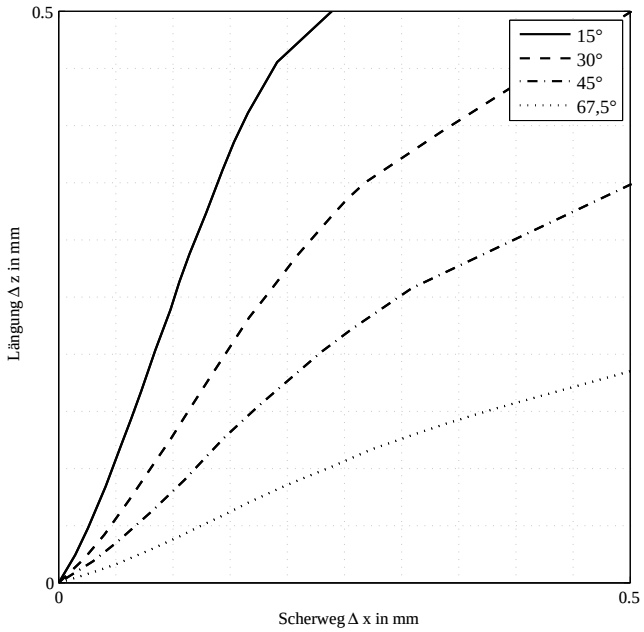


Abbildung 6.16.: Anfangsbereich: Längung der Schraube über Scherweg, Festigkeit 10.9, Klemmlänge 88 mm

Verhältnis von Längung zu Scherweg in etwa bei 1 : 2. Die Verformungen bei Erreichen der Traglast sind bei der Festigkeitsklasse 10.9 deutlich geringer als bei der Festigkeitsklasse 4.6.

Da die Berechnungen kraftgesteuert durchgeführt wurden, kann die Größe der Verformungen bei Erreichen der Traglast nur bedingt als zu betrachtendes Kriterium herangezogen werden: Abbruchkriterium für die Berechnung ist, dass kein numerisches Gleichgewicht mehr erzielt wird. Sind die Lastschritte im Bereich der Traglast etwas gröber gewählt, kann dies bei nur sehr geringer Unterschätzung der errechneten Traglast zu einem verfrühten Abbruch führen. Im Bereich der Traglast sind die plastischen Verformungen jedoch sehr groß und damit auch die zusätzlich auftretenden Verschiebungen schon bei kleinen Laststeigerungen. Dadurch ist die Größe der Endverformungen sehr stark abhängig vom Zeitpunkt des Berechnungsabbruchs.

Die Längung-Scherweg-Kurven der Berechnungen mit dem Materialmodell für die Festigkeitsklasse 10.9 weisen im unteren Bereich einen deutlichen Knick auf. Auch die mit dem Materialmodell für die Festigkeitsklasse 4.6 erstellten Kurven zeigen diesen Knick, allerdings bei deutlich geringeren Verformungen, so das dieser erst in der Vergrößerung des Anfangsbereichs der Kurven (Abbildung 6.14) sichtbar wird.

Dieser Knick entsteht, wenn der Schraubenquerschnitt durchplastiziert. Vor Erreichen des plastischen Bereichs wird die Schraube in Schraubenlängsrichtung über die gesamte Klemmlänge gedehnt. Nach Erreichen der Fließgrenze konzentrieren sich die weiteren Verformungen auf den plastizierten Bereich. Damit ist der Bereich, auf dem die Dehnung in Schraubenlängsrichtung stattfindet, deutlich kürzer und die totale Längung wird im Vergleich zum Scherweg geringer.

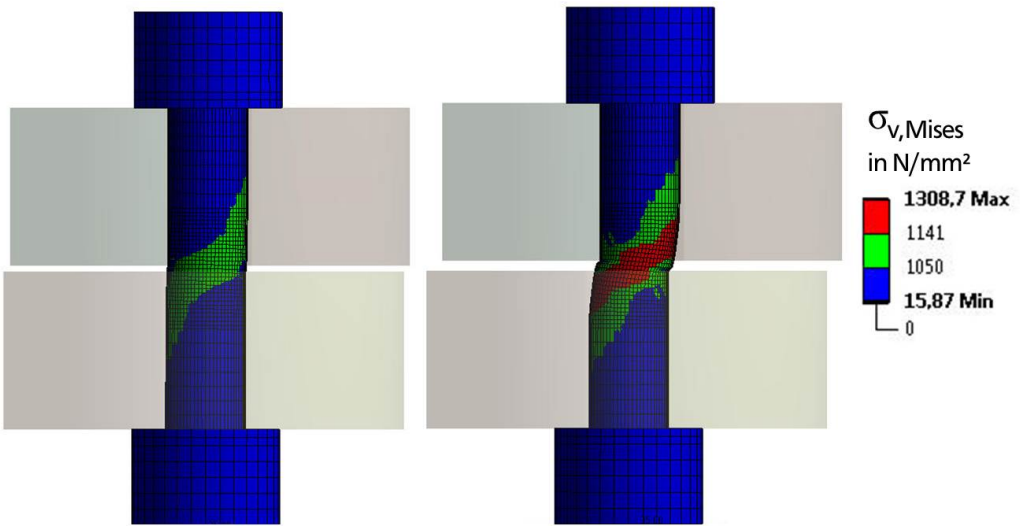


Abbildung 6.17.: Vergleichsspannungen nach von Mises in Schraube 10.9, Lastwinkel 45° bei Erreichen der Fließspannung (1050 N/mm^2) und bei Versagen (Zugfestigkeit 1141 N/mm^2 über den gesamten Versagensschnitt erreicht)

In Abbildung 6.17 links ist der Moment des Durchplastizierens am Modell einer Schraube mit Festigkeitsklasse 10.9 unter einem Lastwinkel von 45° dargestellt. Grün ist hierbei der Bereich, in dem die Fließgrenze von 1050 N/mm^2 (vergl. Abbildung 6.6) überschritten wird.

Das rechte Bild der Abbildung zeigt den Moment bei Erreichen der Traglast, bei dem über den gesamten maßgebenden Schnitt die Zugfestigkeit 1141 N/mm^2 vorhanden ist.

In der Tabelle 6.1 sind die maximal erreichten aufgebrachten Lasten F_{max} aus den Berechnungen unter den unterschiedlichen Lastwinkeln für beide untersuchten Festigkeitsklassen zusammengetragen. Die Kräfte als Komponenten sind die Reaktionskräfte der gehaltenen Lasteinleitungsplatte. Dabei entspricht die Komponente in z-Richtung (parallel zur Schraubenachse) dem Zugkraftanteil, die x-Komponente senkrecht dazu dem Scherkraftanteil. Auch die Gesamt-Kraftresultierende der Lagerung F_{ges} ist mit aufgeführt.

Tabelle 6.1.: Maximale Traglasten der Berechnungen mit Schaft in der Scherfuge, Reaktionskräfte in Lagerung: Komponenten und Gesamt-Kraftreaktion, in kN

Festigkeits-klasse:	4.6				10.9			
	$\mathbf{F_{max}}$	N	V	F_{ges}	$\mathbf{F_{max}}$	N	V	F_{ges}
0°	**162,3**	160,2	0,0	160,2	**347,1**	346,0	0,0	346,0
15°	**142,5**	136,2	36,3	141,0	**301,3**	290,6	77,6	300,8
30°	**124,2**	106,6	61,1	122,9	**259,8**	224,7	129,3	259,3
45°	**109,8**	77,5	76,8	109,1	**232,7**	164,4	163,7	232,0
67, 5°	**99,1**	38,0	90,6	98,2	**208,5**	79,7	191,8	207,7
90°	**96,2**	0,0	95,6	95,6	**203,3**	0,0	202,8	202,8
$N_{max,theo}$ (vgl. Gl. (6.3))		161,2				347,1		
$V_{max,theo}$ (vgl. Gl. (6.4))			93,0				200,4	

Die Kraftresultierende F_{ges} ist etwas kleiner als die aufgebrachte Maximalkraft F_{max}. Auch der Winkel der Kraftresultierenden weicht minimal vom aufgebrachten Lastwinkel ab (sichtbar z.B. am Lastwinkel 45°, bei dem die beiden Kraftkomponenten nicht exakt gleich groß sind). Dies resultiert aus den vom Programm generierten schwachen Federn, die das Modell numerisch stabilisieren und dabei kleine Lastanteile aufnehmen. Die Abweichungen sind vernachlässigbar gering.

Die Lastwinkel 0° und 15° stellen keine mit den Versuchen vergleichbare Situation dar, da das Finite-Element-Modell über keinen Gewindeteil verfügt. So kann mithilfe des Schraubenmodells der theoretische Fall der Interaktion unter einem Lastwinkel mit sehr hohem Zuganteil, bei dem die echte Schraube bereits im Gewinde versagt, simuliert werden und auch die reine Zugtragfähigkeit des Schafts numerisch berechnet werden.

Daneben lässt sich die reine Zugtragfähigkeit durch eine simple Handrechnung bestimmen: Sie ergibt sich aus dem Ausgangsquerschnitt multipliziert mit der technischen Zugfestigkeit:

$$N_{max,theo} = A_{Schaft} \cdot f_{u,t} \tag{6.3}$$

Damit ist die Berechnung des Modells unter reinem Zug eigentlich überflüssig, sie dient aber als Kontrolle, ob das Modell und das implementierte, in wahre Spannungen umgerechnete Materialgesetz richtige Ergebnisse liefern. Wie in Tabelle 6.1 zu sehen, stimmen der theoretische und der numerisch ermittelte Wert gut überein.

Im Gegensatz zum Versuch kann die maximal aufnehmbare Scherkraft rechnerisch am einschnittigen Modell bestimmt werden, da durch die angenommenen Lagerungsbedingungen eine Verdrehung der Platten behindert ist.

Auch die reine Schertragfähigkeit lässt sich mit einer Handrechnung überprüfen. Das im Modell implementierte Materialgesetz beruht auf der Gestaltänderungshypothese nach von Mises. Damit entspricht das Verhältnis von maximal aufnehmbarer reiner Normalspannung zu reiner Schubspannung genau $\sqrt{3}$. Wird das Schraubenmodell mit einer reinen Scherkraft belastet, so wird die Schraube beinahe ausschließlich durch eine Schubspannung beansprucht. Damit ergibt sich der theoretische Wert der Schertragfähigkeit zu

$$V_{max,theo} = \frac{A_{Schaft} \cdot f_{u,t}}{\sqrt{3}} = \frac{N_{max,theo}}{\sqrt{3}} \tag{6.4}$$

Durch die Verzerrungen der Schraube im Traglastzustand handelt es sich auch bei der reinen Scherlastberechnung nicht um reine Schubspannungen, die zum Versagen führen. Stattdessen wird auch in der Modellrechnung ein kleiner Teil der Last Normalspannungen hervorrufen, die wiederum die Traglast gegenüber dem theoretischen, reinen Schubspannungszustand erhöhen. Die berechneten Scherlasten liegen daher leicht oberhalb des theoretischen Wertes.

Wie in Kapitel 2.3.2 erklärt und in den Kapiteln 3 und 4 an den Versuchsergebnissen gezeigt, weicht der tatsächliche Verhältniswert von Zug- zu Scherfestigkeit, der Festigkeitskoeffizient α, vom theoretischen Wert aus der Gestaltänderungshypothese ab, da das Schraubenmaterial über ein großes plastisches Verformungsvermögen verfügt. Bei den getesteten Schrauben der Festigkeitsklasse 4.6 lag der Wert für α bei 0,676. Das hat zur Folge, dass die Zahlenwerte der Ergebnisse der numerischen Simulation nicht direkt mit den Werten der Versuche verglichen werden können.

Um einen wirklichen Vergleich anstellen zu können, werden auch für die berechneten Traglasten bezogene Werte erzeugt. Durch die Verwendung eines identischen Modells mit identischem Materialgesetz sind die Berechnungsergebnisse unter unterschiedlichen Lastwinkeln direkt vergleichbar. Die Normalkraftkomponente N wird auf die maximale Normalkraft bei reinem Zug $N_{0°}$ bezogen, die Scherkraftkomponente V auf die maximale Scherkraft bei reiner Abscherbelastung $V_{90°}$.

Die Ergebnisse für beide simulierten Festigkeitsklassen sind in Abbildung 6.18 im Interaktionsdiagramm dargestellt. Im Diagramm sind außerdem die Mittelwerte der Versuche aller Serien mit Schaft in der Scherfuge aus Abbildung 5.6 enthalten. Bei diesen wurde analog zu Abbildung 5.6 wie in Kaptiel 5 beschrieben die Normalkraft-Komponente N auf die zurückgerechnete reine Zugtragfähigkeit des Schaftquerschnitts bezogen und die Scherkraft-Komponente auf die im zweischnittigen Scherversuch ermittelte reine Schertragfähigkeit des Schafts.

Die Ergebnisse der numerischen Simulation korrelieren sehr gut mit den Ergebnissen der Versuchsreihen. Auch sie liegen deutlich sichtbar unterhalb der quadratischen Interaktionsbedingung.

Durch den Bezug der Berechnungs- und der Versuchsergebnisse auf den jeweils zugehörigen Wert der maximalen Schertragfähigkeit, die unterschiedliche Festigkeitskoeffizienten α besitzen, befinden sich die zu einem Belastungswinkel gehörenden Ergebnisse im Diagramm

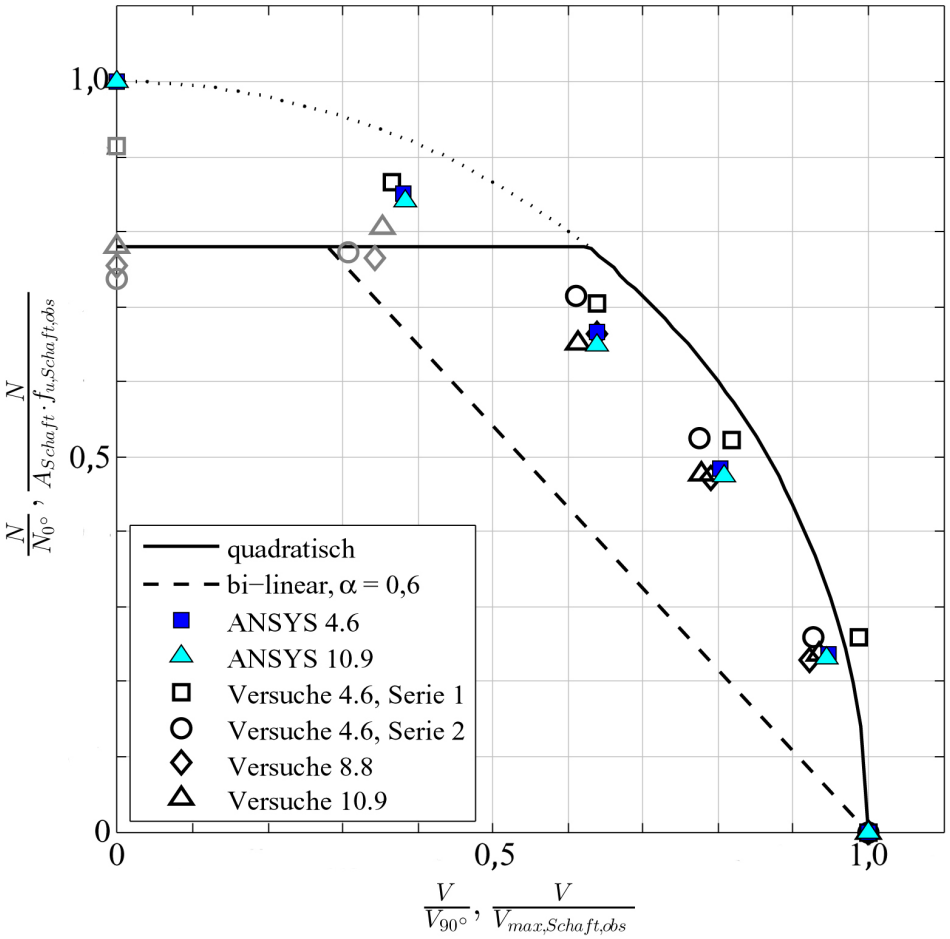


Abbildung 6.18.: Bezogene maximale Traglasten aus Finite Element Berechnungen, Schaft in Scherfuge, Versuchsergebnisse aus Abbildung 5.6 zum Vergleich

allerdings nicht auf einem im Nullpunkt des Koordinatensystems beginnenden Strahl, sondern sind leicht zueinander verschoben.

Um eine zahlenmäßige Aussage über die Genauigkeit der Berechnungen treffen zu können, wird deshalb ein neuer Wert eingeführt: Der radiale Abstand eines Punktes im Diagramm zum Ursprung r_a. Durch ihn können die Versuchsergebnisse und die Berechnungsergebnisse in Relation gesetzt werden. Außerdem kann dieser Wert auch als Maß zur Beurteilung der Abweichung von der Kreisgleichung verwendet werden: Liegt ein Punkt auf der Kreisgleichung, ist der radiale Abstand $r_a = 1{,}0$. Da sich die hier ermittelten Ergebnisse unter kombinierter Belastung unterhalb der Kreisgleichung befinden, wird der radiale Abstand entsprechend $< 1{,}0$.

In Tabelle 6.2 sind die radialen Abstände für die Mittelwerte der Versuchsergebnisse je Belastungswinkel aller Versuchsserien und für die Ergebnisse der Berechnung mit Finiten

Tabelle 6.2.: Radialer Abstand der Versuchs- und Berechnungsergebnisse von Schrauben mit Schaft in der Scherfuge, kursiv: Versagen im Gewinde

Versuchsergebnisse				
	4.6 Serie 1	4.6 Serie 2	8.8	10.9
0°	*0,913*	*0,736*	*0,756*	*0,780*
15°	0,940	*0,831*	*0,839*	*0,880*
30°	0,950	0,941	0,921	0,895
45°	0,971	0,935	0,920	0,913
67,5°	1,021	0,961	0,950	0,965
90° 2-schnittig	1,000	1,000	1,000	1,000

Ergebnisse der numerischen Simulation				
	4.6	Abweichung zu Versuchen 4.6 Serie 2	10.9	Abweichung zu Versuchen 10.9
0°	1,000		1,000	
15°	0,931		0,923	
30°	0,923	-1,87%	0,910	1,73%
45°	0,938	0,36%	0,937	2,60%
67,5°	0,977	1,66%	0,973	0,86%
90°	1,000		1,000	

Elementen aufgelistet. Für die Berechnungsergebnisse sind außerdem die prozentualen Abweichungen zu den Werten der Versuche der vergleichbaren Festigkeiten angegeben.

Die radialen Abstände der Versuche, die im Gewinde versagten, sind der Vollständigkeit halber mit aufgeführt, aber kursiv dargestellt. Für die Betrachtung des Verhaltens des Schafts liefern sie keine Aussage.

Die Werte unter reiner Scherlast, bzw. bei den berechneten Ergebnissen auch die unter reinem Zug gehen auf die Bezugswerte zurück und liegen damit bei 1,0. Es fällt auf, dass die Werte für kleinere Winkel, also größere Zuglast-Anteile, niedriger ausfallen als die unter großen Scherlast-Anteilen. Bei den berechneten Ergebnissen liegt der kleinste radiale Abstand unter einem Belastungswinkel von 30°, bei den Versuchsergebnissen bei Winkeln zwischen 15° und 45°.

Die prozentualen Abweichungen zwischen numerischer Simulation und den Versuchsergebnissen ist mit $< 3\,\%$ sehr gering. Das in den Versuchen beobachtete Verhalten wird also sehr gut abgebildet.

6.1.6. Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse

Die Modellierung mithilfe der Methode der Finiten Elemente bildet die Versuchsergebnisse sehr gut ab. Der Effekt, dass die Ergebnisse unter kombinierter Zug- und Scherbelastung deutlich unter der erwarteten quadratischen Interaktionskurve liegen, ist eindeutig auch in den Ergebnissen der Berechnungen zu erkennen.

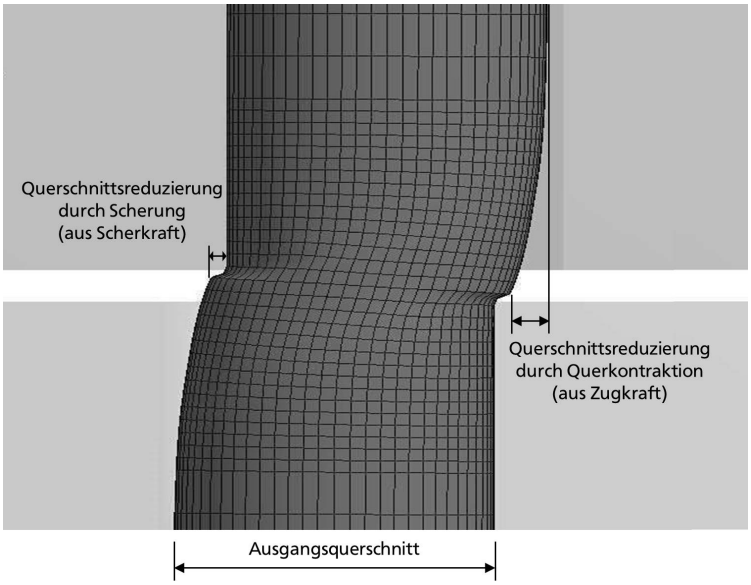


Abbildung 6.19.: Verformungsanteile, die zur Reduzierung des Schraubenquerschnitts führen (aus Modell Festigkeit 4.6, Lastwinkel 45°)[5]

Eine Erklärung, warum dies so ist, könnten die in den numerischen Simulation gut zu beobachtenden Verformungen der Schrauben liefern. Im Traglastzustand sind die Schrauben sehr stark plastisch verformt. Hierbei gibt es zwei Verformungskomponenten, die gleichzeitig auftreten: Eine Einschnürung des Querschnitts infolge der Zugkraft-Komponente und einen Scherversatz durch die Scherkraft-Komponente. In Abbildung 6.19 sind diese beiden Verformungsanteile dargestellt.

Für die Tragfähigkeit des Querschnitts unter einer Lastkomponente steht zur Aufnahme dieser Last der gesamte Ausgangsquerschnitt zur Verfügung. Auch die quadratische Interaktionsannahme geht davon aus, dass zur Aufnahme jeder der beiden Lastkomponenten der Ursprungsquerschnitt vorhanden ist, der multipliziert mit der maximal aufnehmbaren technischen Spannung die Bezugs-Tragfähigkeiten für die einzelnen Lastkomponenten ergibt:

$$\left(\frac{N}{N_{max}}\right)^2 + \left(\frac{V}{V_{max}}\right)^2 = \left(\frac{N}{A \cdot \sigma_{max,t}}\right)^2 + \left(\frac{V}{A \cdot \tau_{max,t}}\right)^2 \leq 1,0 \tag{6.5}$$

Die Betrachtung des verformten Querschnitts lässt allerdings die Vermutung zu, dass durch die Verformung aus der einen Last-Komponente im Traglastzustand der jeweils anderen Last-Komponente nur eine reduzierte Fläche zur Verfügung steht, was bei der Ermittlung der Tragfähigkeit berücksichtigt werden muss:

$$\left(\frac{N}{N_{max,red}}\right)^2 + \left(\frac{V}{V_{max,red}}\right)^2 = \left(\frac{N}{\mathbf{A_{red,V}} \cdot \sigma_{max,t}}\right)^2 + \left(\frac{V}{\mathbf{A_{red,N}} \cdot \tau_{max,t}}\right)^2 \leq 1,0 \tag{6.6}$$

[5] Prinzipdarstellung, die angetragenen Verformungen enthalten jeweils auch Anteile aus der anderen Kraftkomponente, eine genaue Differenzierung ist nicht möglich.

Durch den Ansatz einer reduzierten Fläche werden die Bezugswerte kleiner. Damit würden die Werte im Interaktionsdiagramm (Abbildung 6.18) größer und fielen, bei Ansatz der richtigen reduzierten Flächen, auf die quadratische Kurve.

Die Größe der reduzierten Flächen $A_{red,V}$ und $A_{red,N}$ ist aber unbekannt. Auch eine Bestimmung anhand des numerischen Modells ist nicht möglich. Die Unterscheidung von der aufgrund der Schubverzerrung reduzierten Fläche $A_{red,V}$ und der aus Querkontraktion reduzierten Fläche $A_{red,N}$ ist rein theoretischer Natur, es ist schwerlich möglich, zwei voneinander unabhängige Werte abzulesen. Vielmehr ist anzunehmen, dass sich auch die Verformungen gegenseitig beeinflussen. Auch ist der Belastungszeitpunkt, dem diese Flächen zu entnehmen wären, nicht bekannt, die Querschnittfläche ändert sich kontinuierlich mit steigender Last. Dennoch liefert diese These eine anschauliche und plausible Erklärung für das beobachtete Verhalten.

Durch die Einführung des ursprünglich zur besseren Vergleichbarkeit eingeführten Werts des radialen Abstands r_a (Tabelle 6.2) ist es möglich, die Unterschreitung der erwarteten Traglast eindeutig zu quantifizieren. Es zeigt sich, dass der Effekt am größten bei annähernd gleich großer Zug- und Scherkraft-Komponente ist, leicht verschoben zugunsten einer größeren Zug-Komponente.

Für höhere Materialfestigkeiten ist der Einfluss sowohl in den Versuchen als auch in der numerischen Simulation etwas stärker. Für alle Untersuchungen bewegt er sich aber im Bereich zwischen 0 und ∼10%.

6.2. Parameterstudien mit Schaft in der Scherfuge

Da das erstellte Modell der Schraube mit Schaft in der Scherfuge, wie im vorangegangenen Kapitel gezeigt, sehr gute Übereinstimmung mit den an Schrauben durchgeführten Versuchen aufweist, kann es herangezogen werden, um den Einfluss von Geometrieänderungen zu untersuchen.

Von Interesse sind im Wesentlichen zwei Parameter:

- die Klemmlänge und
- der Schraubendurchmesser.

Dabei macht es numerisch gesehen aber keinen Unterschied, ob die Klemmlänge beibehalten und der Schraubendurchmesser vergrößert wird oder ob die Klemmlänge bei gleichbleibendem Schraubendurchmesser verkürzt wird: Der erste Fall ist lediglich eine Skalierung des zweiten. Werden die Ergebnisse zur Auswertung wieder auf die reine Zugtragfähigkeit bezogen, muss zwangsläufig das Gleiche herauskommen, da bei der Vergrößerung des Schraubendurchmessers der Skalierfaktor zunächst hinein- und nach der Berechnung wieder herausgerechnet wird. Im Folgenden wird deshalb nur die Klemmlänge variiert. Damit ist der Vergleich mit den bestehenden Ergebnissen bei gleichbleibendem Schraubendurchmesser direkt ohne Skalierfaktor möglich.

Der einzige geometrische Unterschied für Schrauben mit unterschiedlichen Durchmessern in der Praxis resultiert aus der leichten Änderung der Verhältnisses von Schraubendurchmesser zum Lochspiel. Deshalb wird anschließend auch eine Variation des Lochspiels untersucht.

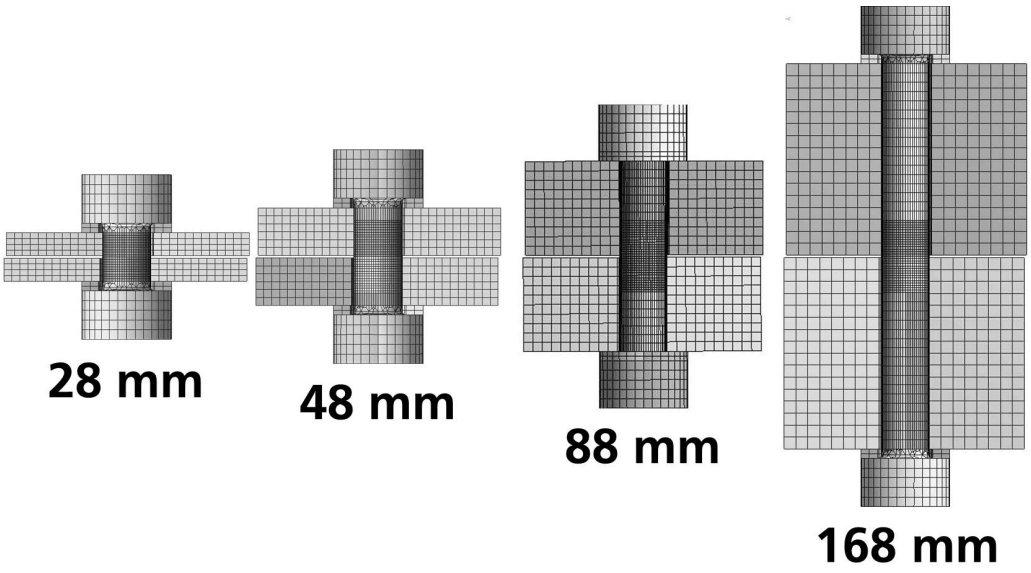


Abbildung 6.20.: Variation der Klemmlängen, Ursprungslänge: 88 mm

6.2.1. Variation der Klemmlänge

Die bisher betrachtete Klemmlänge betrug 88 mm. Diese setzt sich aus zwei Platten mit einer Dicke von 40 mm und den beiden Unterlegscheiben von je 4 mm Höhe zusammen. Zur Änderung der Klemmlänge wird die Dicke der Lasteinleitungsplatten variiert.

Es werden insgesamt drei weitere Klemmlängen untersucht. Dafür wird die Dicke der Lasteinleitungsplatten geviertelt, halbiert bzw. verdoppelt. Daraus ergeben sich die Klemmlängen 28 mm, 48 mm und 168 mm. Mit diesen Plattendicken von 10 mm, 20 mm bzw. 80 mm ist der baupraktische Bereich mehr als abgedeckt.

Berechnet wird reines Abscheren (Lastwinkel 90°), gleichgroße Lastanteile (Lastwinkel 45°), sowie die Lastwinkel 15° und 67,5° als Zwischenwerte. Es wird das Materialgesetz entsprechend der Festigkeitsklasse 10.9 verwendet. Der Lastfall 0° „reiner Zug“ wird nicht erneut berechnet.

Tabelle 6.3.: Traglasten der Berechnungen mit variierten Klemmlängen in kN und Abweichungen von den Traglasten der Ursprungsklemmlänge 88 mm

Klemmlänge:	28 mm		48 mm		**88 mm**	168 mm	
	F_{ges}	Abw.	F_{ges}	Abw.	$\mathbf{F_{ges}}$	F_{ges}	Abw.
0°					**346,0**		
15°	303,0	0,73%	300,9	0,04%	**300,8**	299,9	-0,30%
45°	232,0	0,00%	231,9	-0,04%	**232,0**	230,7	-0,53%
67, 5°	206,8	-0,43%	207,2	-0,25%	**207,7**	207,3	-0,19%
90°	202,9	0,07%	202,9	0,04%	**202,8**	201,9	-0,46%

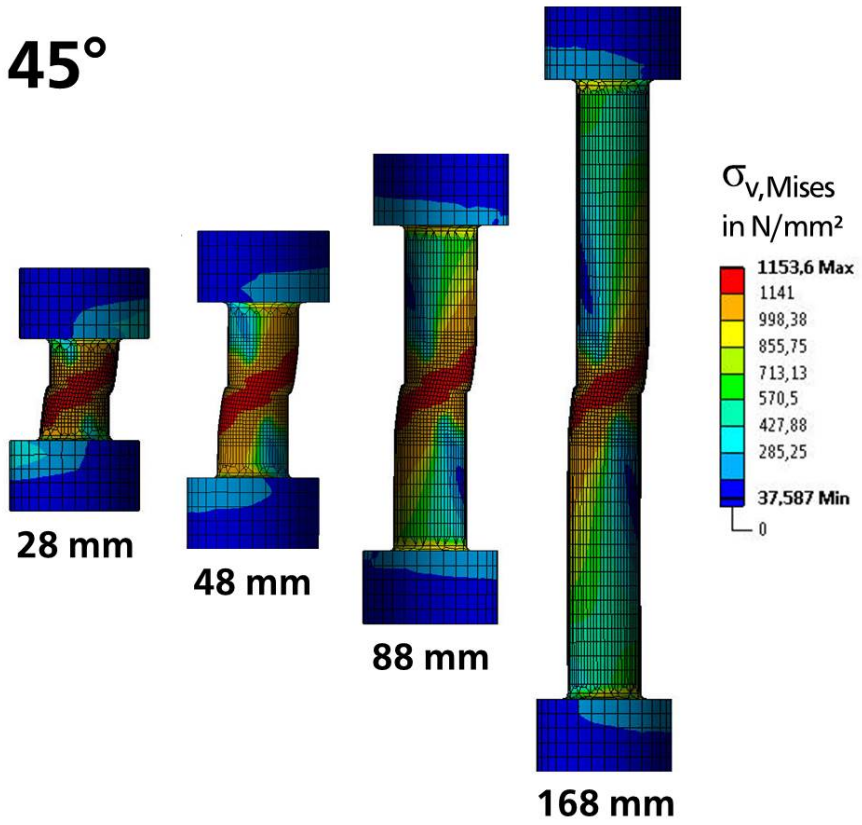


Abbildung 6.21.: Verformung und Vergleichsspannungsverläufe bei maximaler Last, Festigkeitsklasse 10.9, unterschiedliche Klemmlängen, Lastwinkel 45°

In Tabelle 6.3 sind die berechneten Traglasten der unterschiedlichen Klemmlängen unter den vier untersuchten Belastungswinkeln zusammengestellt und zu den Ergebnissen der Referenz-Klemmlänge 88 mm in Bezug gesetzt. Es zeigt sich, dass die Änderung der Klemmlänge keinerlei Einfluss auf die berechnete Traglast hat. Die Traglastunterschiede bei gleichem Lastwinkel liegen über alle untersuchten Klemmlängen hinweg bei unter 1 % und damit im Bereich des Berechnungsfehlers.

Abbildung 6.21 zeigt die Verformungen und die Vergleichsspannungsverläufe nach von Mises bei Erreichen der maximalen Traglast für den Lastwinkel 45°. In Anhang F sind auch die Abbildungen der anderen Lastwinkel dargestellt.

Der Verlauf der Vergleichsspannung ist im Bereich der Scherfuge bei allen Klemmlängen sehr ähnlich. Unterschiedlich ist lediglich die Größe des Bereichs, der neben der Scherfuge durch die Belastung stark beeinflusst wird. Bei größeren Klemmlängen ebbt die Spannung etwas schneller ab und die Bereiche am Schraubenkopf sind hier nahezu spannungsfrei.

Im Diagramm in Abbildung 6.22 ist die Längung über dem Scherweg unter einem Lastwinkel von 45° für die verschiedenen untersuchten Klemmlängen aufgetragen. Die Längung-Scherweg-Diagramme aller untersuchen Lastwinkel mit Zug- und Scherlastanteil sind in Anhang F, Abbildungen F.5 bis F.7 dargestellt.

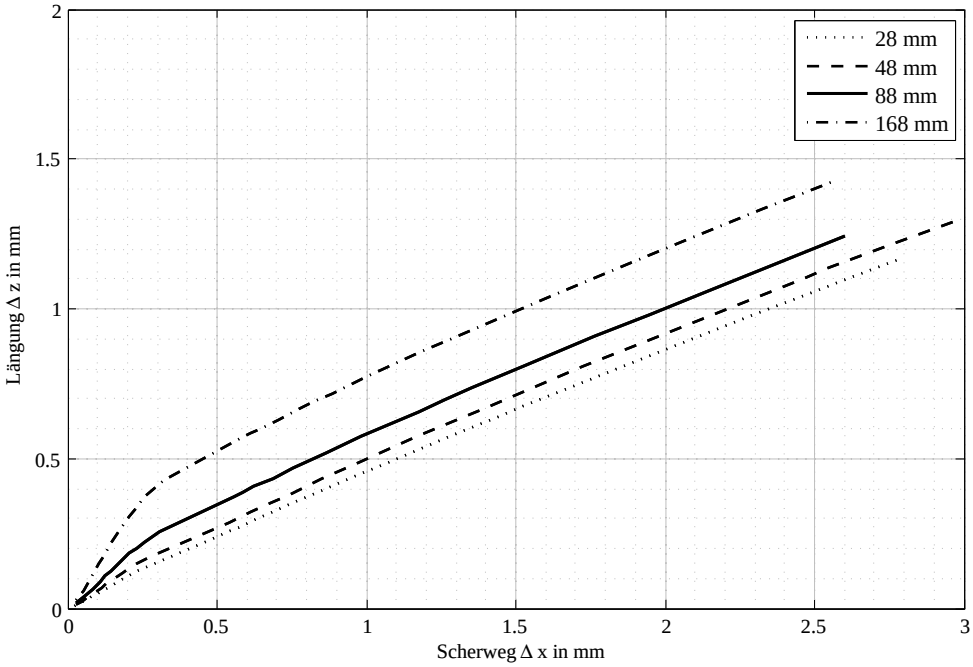


Abbildung 6.22.: Längung der Schraube über Scherweg, Festigkeit 10.9, Lastwinkel 45°, unterschiedliche Klemmlängen

Im Anfangsbereich ist die Steigung der Kurven steiler, je größer die Klemmlänge ist. Da die elastische Dehnung im gesamten in der Klemmlänge vorhandenen Schaft auftritt, ist bei größeren Klemmlängen die totale Längung entsprechend größer. Der in der Scherfuge vorhandene Querschnitt, auf den die Scherung wirkt, ist dagegen bei allen Klemmlängen gleich.

Sobald im versagenden Schnitt die Fließspannung erreicht ist, plastiziert die Schraube lokal und weitere Längsdehnungen treten nur noch in diesem Schnitt auf. Ab diesem Punkt verhalten sich die Schrauben unabhängig von ihrer Klemmlänge gleich. Die Längung-Scherweg-Kurven knicken ab und verlaufen hinter diesem Punkt annähernd parallel.

6.2.2. Variation des Lochspiels

Das Lochspiel in den bisher untersuchten Modellen betrug 1 mm. Um den Einfluss der Lochgröße bei gleich bleibendem Schraubendurchmesser zu untersuchen wurde das Lochspiel im Modell der Ausgangsklemmlänge 88 mm und des Materialmodells der Festigkeitsklasse 10.9 variiert. Untersucht wird ein Lochspiel von 2 mm sowie ein Modell ganz ohne Lochspiel.

Für das Modell ohne Lochspiel wurden die Anfangskontaktbedingungen geändert: Da die Schraube das Loch komplett ausfüllt, erstellt ANSYS Workbench zunächst automatisch Kontaktelemente über die ganze Schaftfläche. An den Flächen, an denen die Last nicht eingeleitet wird, müsste sich dieser Kontakt öffnen, sobald sich die Schraube verformt. Da dies die Berechnung unnötig verkompliziert, wurden die Kontakte an den jeweils Last

abgewandten Schaftseiten gelöst.

Auch bei der Variation des Lochspiels werden die Lastwinkel 15°, 45°, 67,5° und 90° (reines Abscheren) betrachtet.

Tabelle 6.4.: Traglasten der Berechnungen mit variiertem Lochspiel in kN und Abweichungen von den Traglasten des ursprünglichen Lochspiels 1 mm

Lochspiel:	0 mm		**1 mm**	2 mm	
	F_{ges}	Abw.	$\mathbf{F_{ges}}$	F_{ges}	Abw.
0°			**346,0**		
15°	299,22	-0,53%	**300,8**	300,80	-0,01%
45°	229,68	-0,99%	**232,0**	232,32	0,15%
67,5°	206,35	-0,64%	**207,7**	207,66	-0,01%
90°	202,88	0,04%	**202,8**	201,98	-0,40%

Die berechneten Traglasten mit den geänderten Lochspielen und die Abweichungen zum ursprünglichen Lochspiel von 1 mm sind in Tabelle 6.4 zusammengefasst. Die Verformungen und die Verläufe der Vergleichsspannung nach von Mises bei Erreichen der Traglast für den Belastungswinkel 45° sind in Abbildung 6.23 zu sehen. Die Bilder aller Belastungswinkel sind im Anhang F in den Abbildungen F.8 bis F.11 dargestellt.

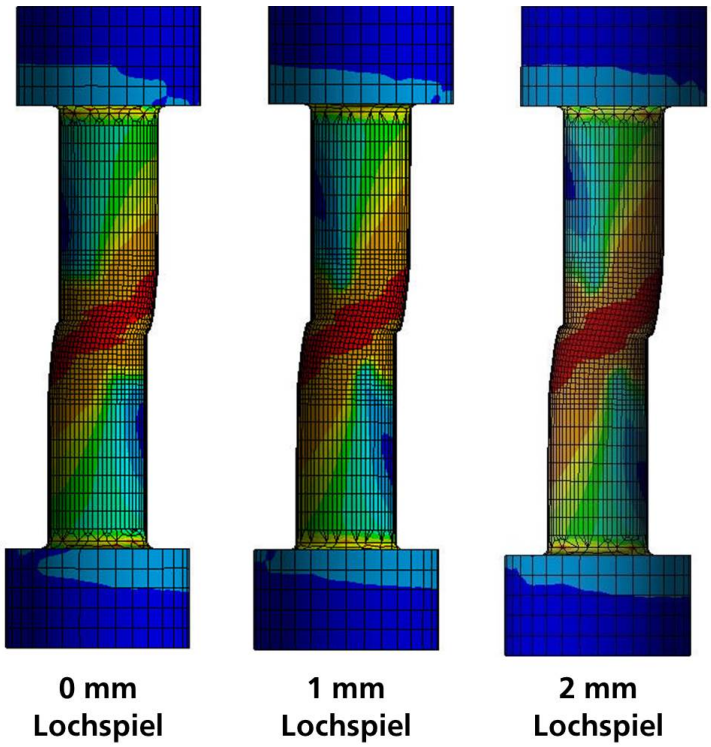


Abbildung 6.23.: Verformung und Vergleichsspannungsverläufe bei maximaler Last, Festigkeitsklasse 10.9, unterschiedliche Lochspiele, Lastwinkel 45°

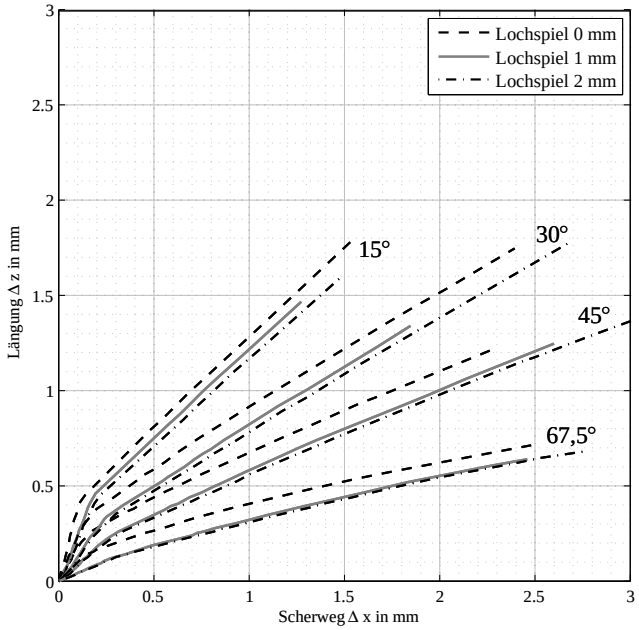


Abbildung 6.24.: Längung der Schraube über Scherweg, Festigkeit 10.9, Klemmlänge 88 mm, verschiedene Lochspielgrößen

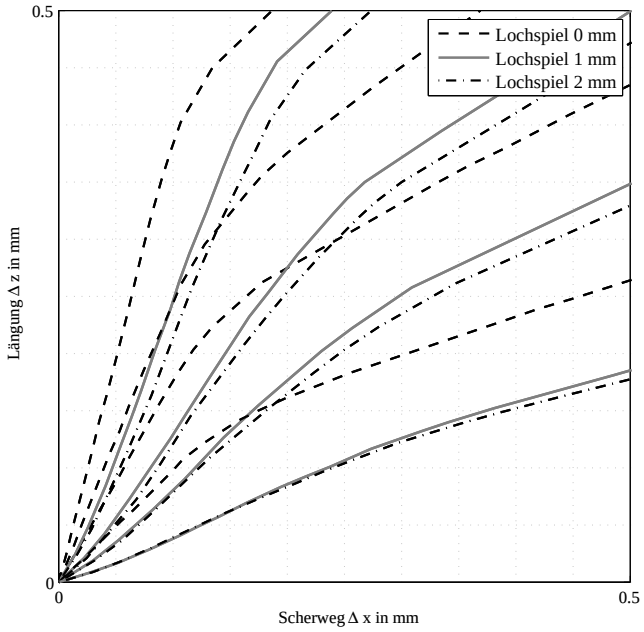


Abbildung 6.25.: Anfangsbereich: Längung der Schraube über Scherweg, Festigkeit 10.9, Klemmlänge 88 mm, verschiedene Lochspielgrößen

Auch die Variation des Lochspiels zeigt keinen Einfluss auf die Traglast. Die Verläufe der Vergleichsspannung nach von Mises sind ebenfalls sehr ähnlich. Bei größerem Lochspiel wird allerdings die Verformung etwas größer.

In Abbildung 6.24 ist die Längung über dem Scherweg bei unterschiedlichem Lochspiel aufgetragen. Das Diagramm zeigt die Ergebnisse aller untersuchten Winkel. Hier zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den verschiedenen Lochspielgrößen: Bei kleinerem Loch ist die Längung relativ zum Scherweg zu Beginn der Belastung größer.

Bis zum Erreichen eines durchplastizierten Querschnitts wird der Scherweg durch ein kleineres Loch verringert, da sich der Schaft nicht frei zur Seite verformen kann. Dieser Effekt ist am stärksten, wenn Schrauben- und Lochdurchmesser gleich sind. Bei der Änderung des Lochspiels von 1 mm auf 2 mm ist der Unterschied deutlich geringer, aber immer noch sichtbar.

In der Vergrößerung des Anfangsbereichs des Diagramms 6.25 ist zu erkennen, dass die beiden Wege bei fehlendem Lochspiel zu Beginn der Belastung proportional zueinander verlaufen. Ist ein Lochspiel vorhanden, wird die Scherkraft zunächst nur über den Punkt von der Platte auf den Schaft übertragen, an dem sich die beiden unterschiedlich großen Kreise von Schaft- und Lochquerschnitt berühren. Hier verformt sich zunächst der Schaftquerschnitt lokal und vergrößert so die Kontaktfläche. Dadurch kommt es zu Beginn der Belastung zu einem größeren Scherweg.

Sobald der Schraubenschaft über den vollen Querschnitt plastiziert, knicken die Kurven im Diagramm ab. Dies geschieht bei allen drei Kurven eines Lastwinkels bei einer identischen Längung. Anschließend verlaufen die Kurven mit gleichem Lastwinkel wieder parallel.

6.2.3. Zusammenfassung der Ergebnisse der Parameterstudie

In den Parameterstudien konnte kein Einfluss der Geometrie auf die Traglast der gleichzeitig auf Zug und Abscheren belasteten Schrauben festgestellt werden. Das Verhältnis von Schraubendurchmesser zu Klemmlänge hat lediglich einen Einfluss auf die Verformungen der Schraube vor Fließbeginn. Ist der Schnitt, in dem später das Versagen stattfindet, durchplastiziert, konzentriert sich die weitere Verformung auf diesen Bereich - unabhängig von der umliegenden Geometrie.

6.3. Numerische Simulation der Schraube mit Gewinde in der Scherfuge

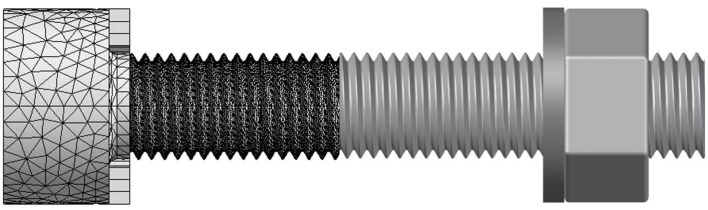


Abbildung 6.26.: Schraube mit Gewinde in der Scherfuge - Modellbildung

6.3.1. Schwierigkeiten bei der Modellerstellung

Durch die notwendige Modellierung des Gewindes inklusive Gewindesteigung ist die Erstellung eines Modells für die Situation des Gewindes in der Scherfuge ungleich schwieriger. Durch das Fehlen jeglicher Symmetrie kombiniert mit den sehr filigranen Gewindegängen ist ein schematisches Vernetzen nicht möglich. Auch ein Vernetzen der Gewindegänge mit den bevorzugten Hexaeder-Elementen ist nicht möglich, stattdessen müssen hier Tetraeder-Elemente verwendet werden, die eine etwas höhere Steifigkeit besitzen.

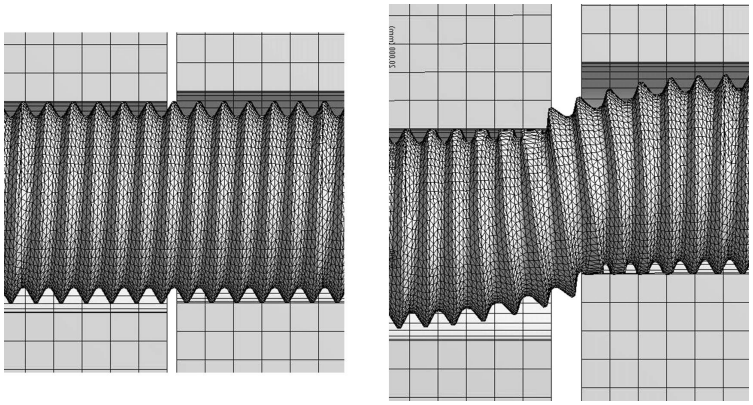


Abbildung 6.27.: Geometrie im Bereich der Scherfuge, links: vor Beginn der Belastung, rechts: plastisch verformt

Die komplexe Geometrie erschwert zudem die numerische Konvergenz. Die Elemente des Gewindes werden an den Stellen, an denen die Scherkraft aufgebracht wird, stark verformt. Dazu kommt eine Vielzahl von Kontakten, die sich teilweise auch erst zu späteren Belastungszeitpunkten einstellen oder sich ändern. Dies betrifft vor allem die Gewindeflanken, die zunächst keinen Kontakt zu den Lasteinleitungsplatten haben. Wird der Gewindezahn durch die Einleitung der Scherkraft plastisch verformt, kann es zu Kontakt zwischen Gewindeflanken und Lasteinleitungsplatten kommen. Wird der Gewindegang anschließend durch die Zugkraft-Dehnung aus dem Loch der Platte herausgezogen, löst sich dieser Kontakt wieder. Es kann nun aber zu einem Kontakt zwischen Gewindeflanke und Lasteinleitungsplatten-Innenseite kommen.

In Abbildung 6.27 ist beispielhaft der Bereich des Gewindes an der Scherfuge unverformt und verformt dargestellt. Gut erkennbar sind die vielen Einzelflächen, aus denen sich das Modell zusammensetzt. Im verformten Zustand wird das Gewinde verbogen, einzelne Gewindeabschnitte bekommen große plastische Verformungen.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte ein stabil rechnendes Modell entwickelt werden. Durch die Tetraeder-Vernetzung und die relativ zur Größe der auftretenden Verformungen sehr grobe Netzgröße, die notwendigerweise gewählt werden musste, damit das Modell in annehmbarer Zeit stabil rechnet, muss aber davon ausgegangen werden, dass sich das Modell im Vergleich zur Wirklichkeit eher zu steif verhalten wird. Hier besteht noch Optimierungsbedarf.

Dennoch wird das erstellte Modell herangezogen, um einen Einblick in das Verhalten von Schrauben mit Gewinde in der Scherfuge zu bekommen.

6.3.2. Geometrie und Elementierung

Zur Nachbildung der Situation des Gewindes in der Scherfuge wird die genaue Gewindegeometrie modelliert. Die Maße des modellierten Schraubengewindes wurden der DIN 13-1[6] entnommen und sind in Abbildung 6.28 zusammengefasst.

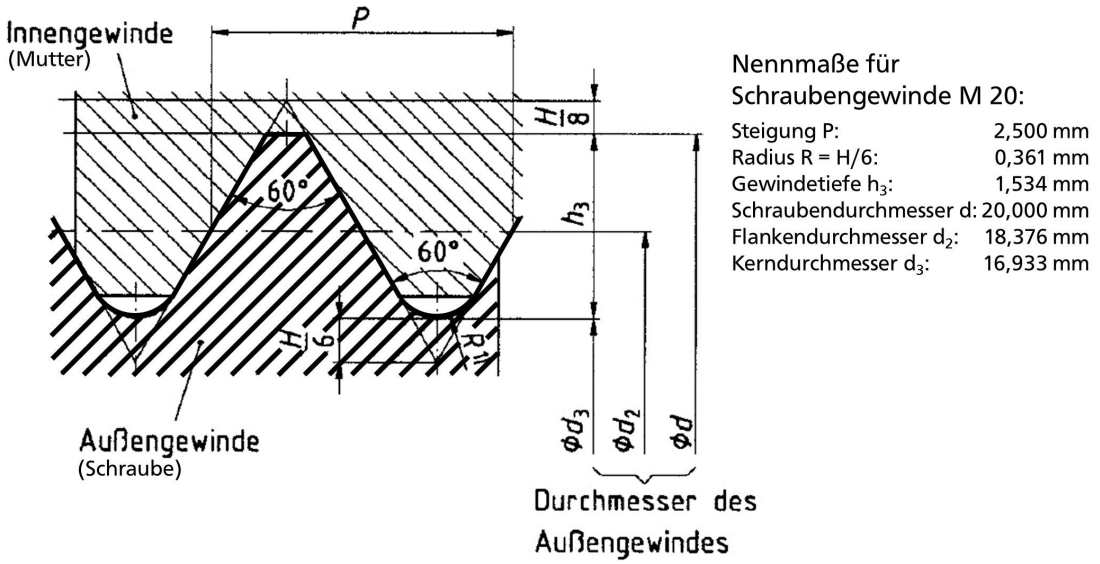


Abbildung 6.28.: Gewinde-Nennmaße für Schraubengewinde M 20 nach DIN 13-1[7], Bild 1

Die Geometrie des erstellten Modells ist in Abbildung 6.29 dargestellt. In der Abbildung wurden die vorderen Hälften der Lasteinleitungsplatten und der Unterlegscheiben ausgeblendet. Die Abmessungen des Modells mit Gewinde in der Scherfuge sind identisch zu denen des Modells mit Schaft in der Scherfuge (vergl. Abbildung 6.2). Auch in diesem Modell wurden Kopf- und Mutterseite nicht unterschieden, sondern auf beiden Seiten ein Kopf mit Ausrundungsradius modelliert. Der gesamte Schraubenbereich innerhalb der Klemmlänge wurde mit der Gewindegeometrie versehen.

Für die Vernetzung wurden im Bereich des Gewindes weitere Unterteilungen der Geometrie vorgenommen. Der äußere, mit dem Gewindeeinschnitt versehene Ring wurde vom Schraubenrumpf getrennt, um hier eine gezielte Vernetzung zu ermöglichen. Dieser Bereich wurde vom Programm automatisch mit Tetraedern vernetzt. Durch die Unterteilungen konnte ein relativ gleichmäßiges Netz erzeugt werden.

In Abbildung 6.30 ist die Vernetzung im Gewindebereich im Detail zu erkennen. Durch die gewählten Unterteilungen konnte der innere Bereich durch gleichmäßige Hexaeder vernetzt werden. Am Übergang von Gewinde zu Schraubenkopf ist eine Vernetzung der Köpfe mit Hexaedern nur schwer möglich. Da diese aber keinen bedeutenden Einfluss auf die Tragwirkung haben, konnte auch hier eine automatische Tetraeder-Vernetzung zugelassen werden.

[6] DIN 13-1:1999-11, *Metrische ISO-Gewinde – Teil 1: Nennmaße für Regelgewinde.*
[7] DIN 13-1:1999-11, *Metrische ISO-Gewinde – Teil 1: Nennmaße für Regelgewinde*

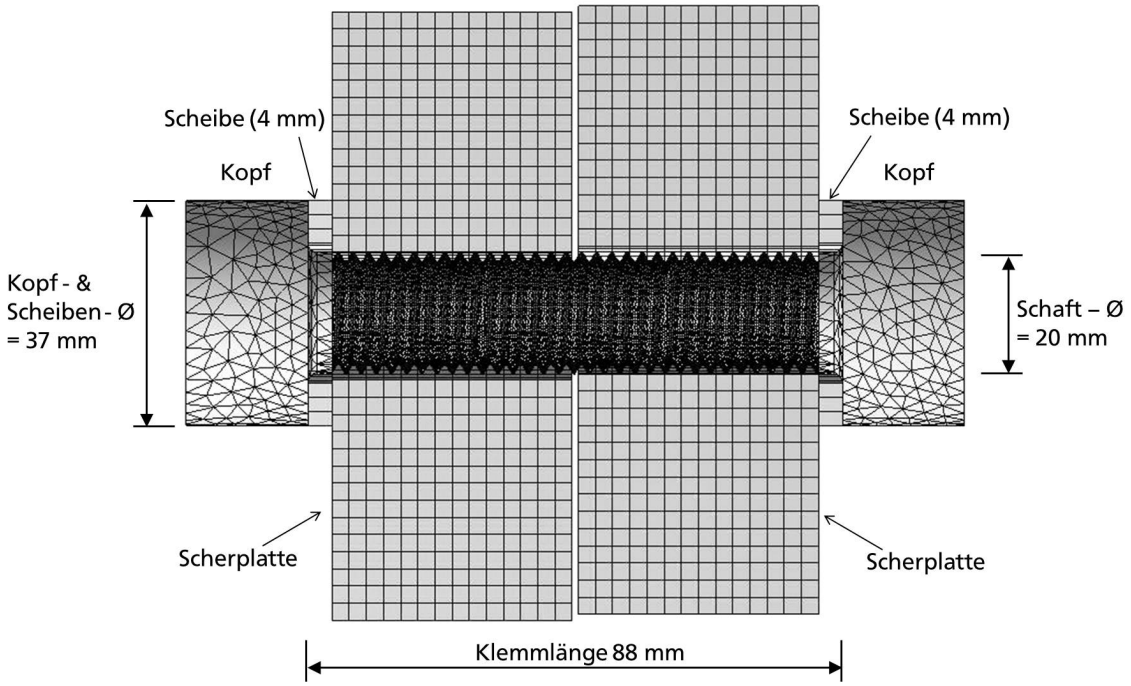


Abbildung 6.29.: Geometrie des Modells der Schraube mit Gewinde in der Scherfuge

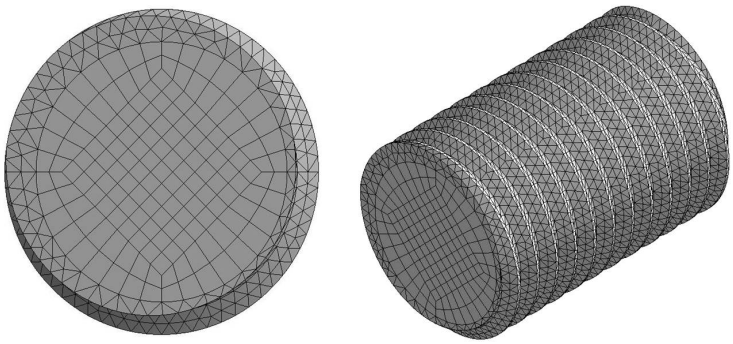


Abbildung 6.30.: Vernetzung des Gewindes im Bereich der Scherfuge

6.3.3. Weitere Randbedingungen

Es wird ausschließlich das Materialmodell der Festigkeitsklasse 4.6 verwendet. Dieses liefert durch den großen Verfestigungsbereich die deutlich stabileren Berechnungen. Bei der Verwendung des Materialmodells für die Festigkeitsklasse 10.9 tritt schon bei kleinen Laststufen ein Berechnungsabbruch auf, da in den schon zu diesem Zeitpunkt stark verformten Gewindeteilen kein rechnerisches Gleichgewicht mehr erzielt werden kann.

Lagerung und Belastung werden analog zum Modell mit Schaft in der Scherfuge aufgebracht.

6.3.4. Ergebnisse unter reinem Zug und reiner Scherkraft

Auch für das Modell der Schraube mit Gewinde in der Scherfuge lassen sich die zu erwartenden Ergebnisse für reinen Zug und reine Scherkraft vorhersagen, indem in die zuvor verwendeten Formeln 6.3 und 6.4 anstelle des Schaftquerschnitts der Spannungsquerschnitt eingesetzt wird. Dieser wird auch hier mit der technischen Zugfestigkeit bzw. der technischen Schubfestigkeit multipliziert:

$$N_{max,theo,Gewinde} = A_S \cdot f_{u,t} = 245\,mm^2 \cdot 513\,\frac{N}{mm^2} = 125,69\,kN \tag{6.7}$$

und

$$V_{max,theo,Gewinde} = \frac{A_S \cdot f_{u,t}}{\sqrt{3}} = \frac{N_{max,theo,Gewinde}}{\sqrt{3}} = 72,57\,kN \tag{6.8}$$

Die maximalen Traglasten aus der numerischen Berechnung liegen mit $N_{0°} = 125,23\,kN$ und $V_{90°} = 72,84\,kN$ sehr nah an den erwarteten Werten.

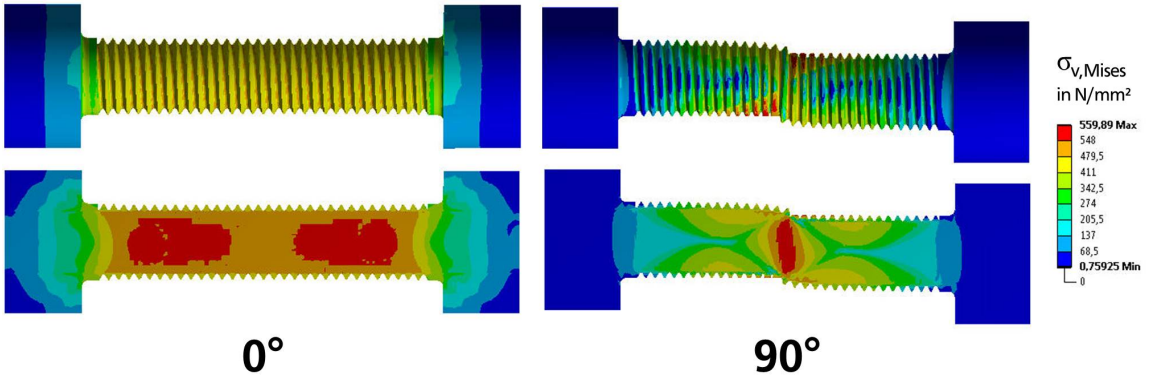


Abbildung 6.31.: Verformung und Vergleichsspannungsverläufe bei maximaler Last, Gewinde in der Scherfuge, Festigkeitsklasse 4.6, Lastfall reiner Zug (0°) und reine Scherkraft (90°), oben: ganze Schraube, unten: mittig geschnitten

Für reine Zug- und reine Scherbelastung liefert das Gewindeschraubenmodell sehr gute Ergebnisse. Auch die Verformungen im Traglastzustand (Abbildung 6.31) sind plausibel und bilden gut die Bruchbilder der getesteten Schrauben ab (vergl. Anhang C, Abbildung C.8 bis C.10).

In Abbildung 6.31 sind die Verläufe der Vergleichsspannung nach von Mises für beide Fälle dargestellt. Die Außenansicht der Schraube zeigt, dass bei reiner Zugbeanspruchung die Gewindegänge nicht bis zur Zugfestigkeit ausgenutzt sind. Dass der Schraubenkern durchplastiziert, zeigt der Längsschnitt durch die Schrauben.

Unter reiner Scherbeanspruchung werden die Gewindegänge direkt neben der Scherfuge zerdrückt. Die Lasteinleitung findet hauptsächlich in diesem Bereich statt. Im Querschnitt in der Scherfuge ist die Schraube bei Erreichen der Traglast komplett durchplastiziert.

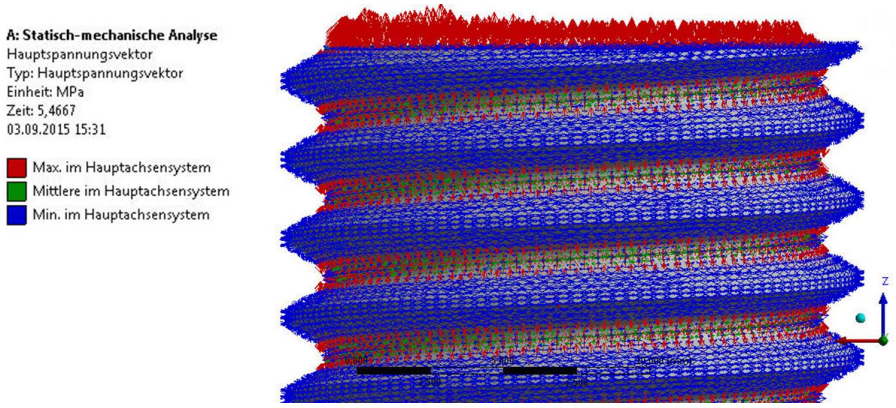


Abbildung 6.32.: Hauptspannungsvektoren im Gewinde unter reiner Zugbeanspruchung

Die in Kapitel 2.3 beschriebene Erhöhung der Traglast durch die vom Gewinde bewirkte Querkontraktionsbehinderung lässt sich im Modell unter reiner Zuglast gut erkennen. ANSYS Workbench bietet die Möglichkeit, die Vektoren der drei Hauptspannungen darzustellen. In Abbildung 6.32 sind diese auf der seitlichen Ansicht des Gewindes zu sehen.

Durch die Vielzahl der Pfeile ist diese Darstellungsmöglichkeit unübersichtlich. Es werden die gemittelten Hauptspannungsvektoren an jedem einzelnen Element dargestellt. Auf der Schnittfläche erkennt man aber deutlich die von der Fläche weg zeigenden Vektoren der maximalen Hauptspannung, der Zugnormalspannung in der Schraubenlängsachse.

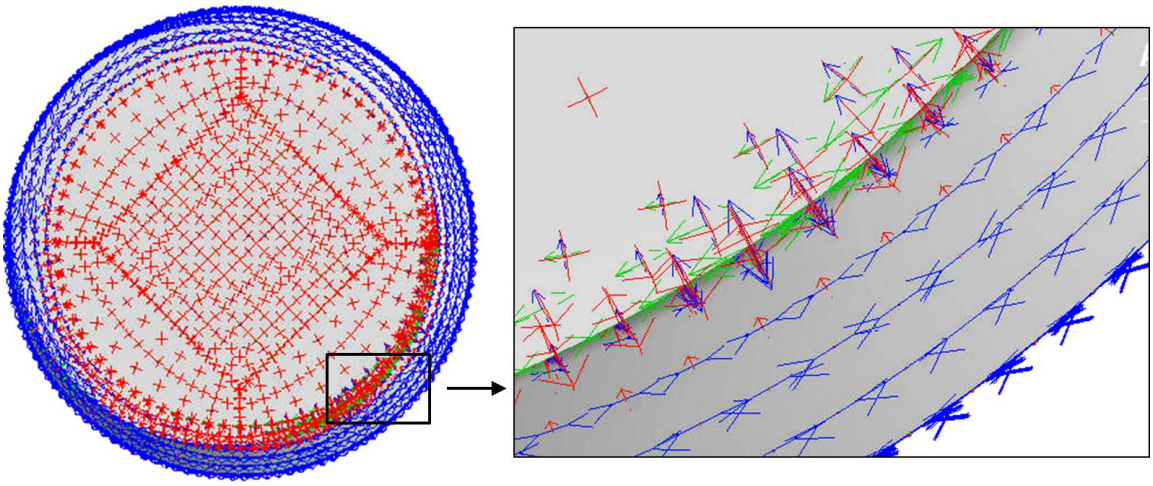


Abbildung 6.33.: Hauptspannungsvektoren im Gewindeschnitt unter reiner Zugbeanspruchung

Die Richtung der Vektoren in den Gewindegängen lässt sich besser in der Draufsicht auf den Schnitt durch das Gewinde Abbildung 6.33 erkennen. Hier wird sichtbar, dass sich im Gewindegang ringförmig eine Druckspannung aufbaut: Der unter Zugspannung stehende Kern des Gewindes will sich aufgrund der Querkontraktion zusammenziehen und

wird durch die Gewindegänge daran gehindert. Betrachtet man den Ausschnitt, an dem durch den Gewindegrund geschnitten wurde, werden auch die daraus entstehenden zusätzlichen, in der Ebene verlaufenden Zugspannungen sichtbar. Der so entstehende mehraxiale Spannungszustand führt zur Traglasterhöhung gegenüber dem reinen Kernquerschnitt.

6.3.5. Ergebnisse unter verschiedenen Lastwinkeln

Wie zuvor werden die Lastwinkel 15°, 30°, 45° und 67,5° berechnet. Abbildung 6.35 und 6.36 zeigen die Ergebnisse der Berechnungen jeweils zum Zeitpunkt der maximal erreichten Last. Abgebildet sind die maßstäblich wiedergegebenen Verformungen sowie der Verlauf der von Mises-Vergleichsspannung.

In Bild 6.35 ist die Schraube jeweils ungeschnitten dargestellt. Gut erkennbar sind die stark verformten Gewindegänge direkt neben der Scherfuge. Je größer der Lastwinkel wird, desto stärker ist die Plastizierung der Gewindegänge. Das Gewinde zwischen den Lasteinleitungsplatten wird durch die kombinierte Belastung schräg gestellt, die Gewindegänge verlaufen nicht mehr parallel zu ihrer Ursprungsrichtung. Die Verformungsbilder bilden die Verformungen aus den Versuchen (Anhang C, Abbildung C.8 bis C.10) gut ab.

Zur Betrachtung der Spannungsverteilung im Gewindekern sind in Abbildung 6.36 die Schnitte durch die Schraubenlängsachse dargestellt.

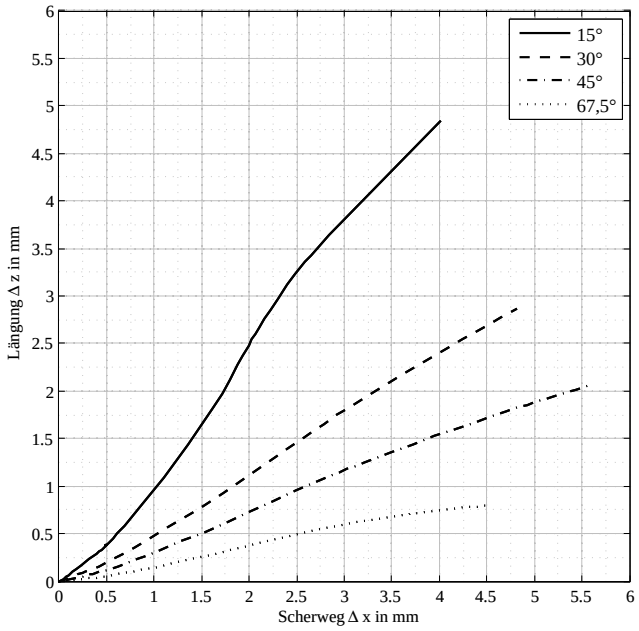


Abbildung 6.34.: Längung der Schraube über Scherweg, Festigkeit 4.6, Gewinde in der Scherfuge

Durch die starke Verformung, die die Gewindegänge erfahren müssen, um die Einleitung der Scherkraftkomponente in die Schraube zu bewerkstelligen, sind die Scherwege der Schraube mit Gewinde in der Scherfuge deutlich größer als bei Schrauben mit Schaft in der

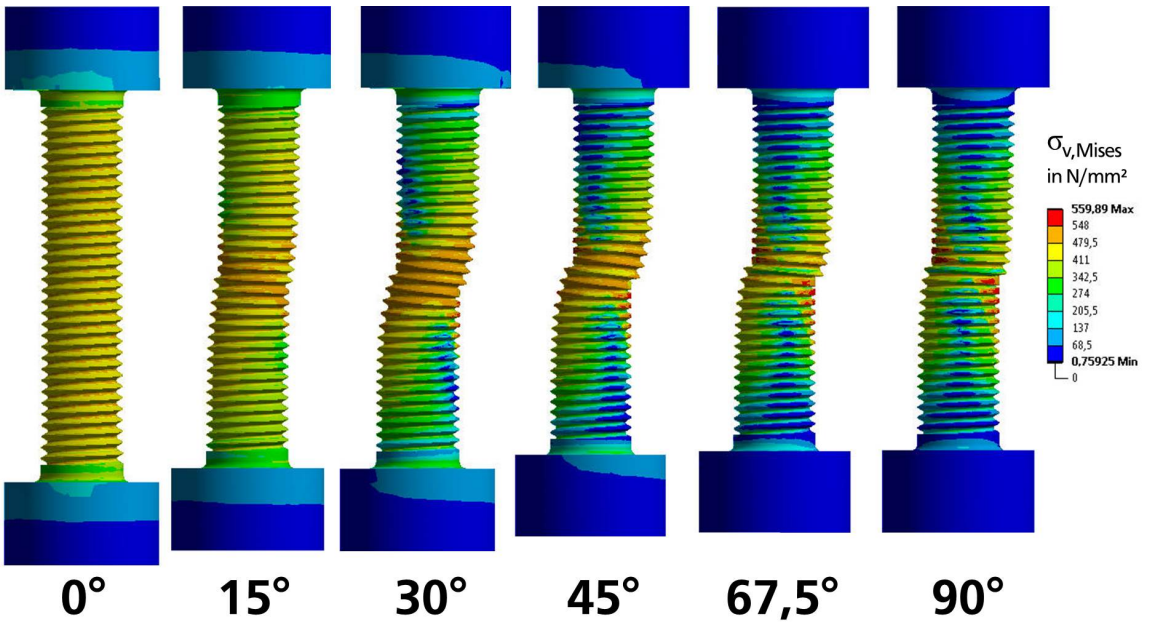


Abbildung 6.35.: Verformung und Vergleichsspannungsverläufe, Gewinde in der Scherfuge, Festigkeitsklasse 4.6 unter den verschiedenen Lastwinkeln bei maximaler Last

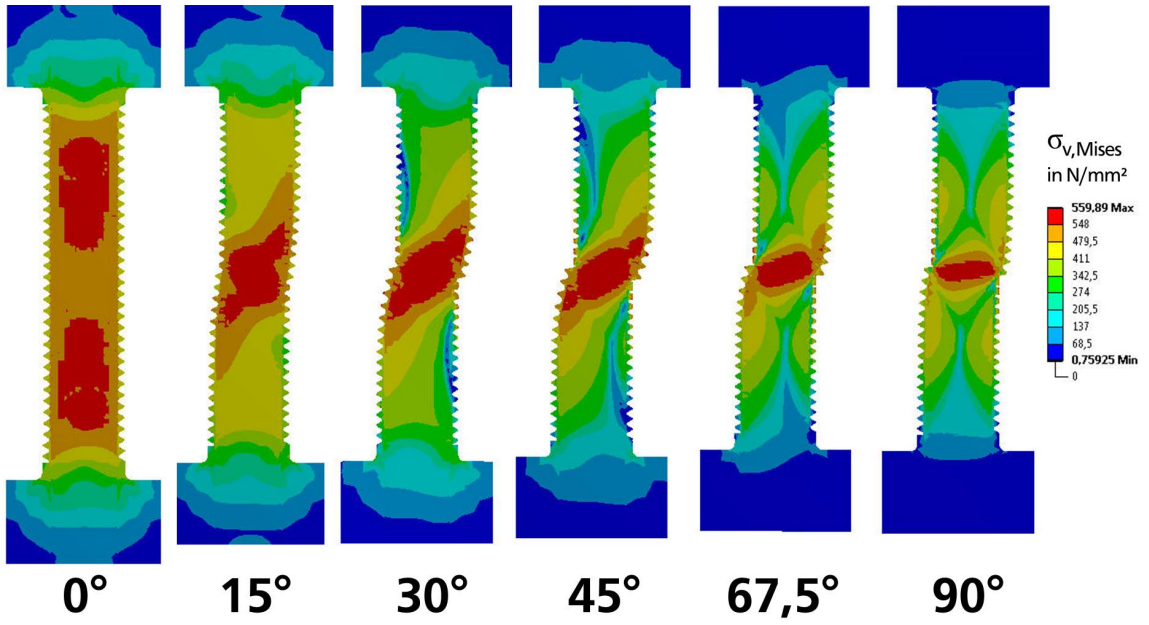


Abbildung 6.36.: Verformung und Vergleichsspannungsverläufe, Gewinde in der Scherfuge, Festigkeitsklasse 4.6 unter den verschiedenen Lastwinkeln bei maximaler Last, Schnitt durch Längsachse

Scherfuge. In Abbildung 6.34 ist die Längung der Schraube über dem Scherweg aufgetragen. Die Verformungen sind insgesamt größer als bei den Berechnungen mit Schaft in der Scherfuge (vergl. Abbildung 6.13). Dabei verlaufen die Kurven etwas flacher, der Scherweg ist relativ zur Längung größer. Ein eindeutiger Punkt, an dem der gesamte Querschnitt durchplastiziert ist, wie bei den Kurven der Berechnungen mit Schaft in der Scherfuge (vergl. Abbildung 6.13 bis 6.16) ist hier nicht zu beobachten.

In Tabelle 6.5 sind die maximal erreichten Lasten aus den Berechnungen unter unterschiedlichen Lastwinkeln zusammengefasst.[8]

Tabelle 6.5.: Maximale Traglasten der numerischen Simulation mit Gewinde in der Scherfuge, Festigkeitsklasse 4.6, Komponenten und Gesamt-Kraftreaktion, in kN

	N	V	F_{ges}
0°	125,2	0,0	125,2
15°	108,2	29,0	112,0
30°	85,5	49,4	98,7
45°	62,1	62,1	87,8
67,5°	29,3	70,6	76,5
90°	0,0	72,8	72,8
$N_{max,theo}$	125,7		
$V_{max,theo}$		72,6	

Um den Vergleich mit den Versuchsergebnissen zu ermöglichen, werden auch hier wie zuvor bei den simulierten Schrauben mit Schaft in der Scherfuge auf die reinen Tragfähigkeiten bezogene Werte gebildet und diese in das Interaktionsdiagramm aus Abbildung 5.3 im Kapitel 5 mit den entsprechenden Versuchsergebnissen mit eingetragen. Das Ergebnis zeigt Abbildung 6.37.

Die Ergebnisse der numerischen Simulation mit Gewinde in der Scherfuge rücken im Interaktionsdiagramm deutlich näher an die Kreiskurve heran. Allerdings liegen sie gerade für große Zugkraftanteile immer noch unterhalb dieser. Auch ist vor allem für große Zugkraftanteile eine deutliche Abweichung von den Versuchsergebnissen zu erkennen.

Am deutlichsten ist der Unterschied zu den Versuchsergebnissen der Schrauben mit Gewinde in der Scherfuge der Festigkeitsklasse 4.6. Diese liegen im Interaktionsdiagramm sogar oberhalb der Kreiskurve. Allerdings muss bei diesem Vergleich berücksichtigt werden, dass diese nur die gleiche Festigkeitsklasse, nicht aber zwangsläufig ein identisches Materialgesetz besaßen, da das Materialgesetz in der numerischen Berechnung in Anlehnung an das Material der Versuchsschrauben mit Schaft in der Scherfuge erstellt wurde.

In Tabelle 6.6 sind die radialen Abstände der Versuche und der Berechnungen mit Gewinde in der Scherfuge zusammengestellt. Neben dem Bezug der berechneten Werte zu den Versuchsergebnissen mit gleicher Festigkeitsklasse sind außerdem die prozentualen Unterschiede zu der Berechnung am Modell mit Schaft in der Scherfuge mit identischem

[8] Im Gegensatz zu den Berechnungen am Modell mit Schaft in der Scherfuge nehmen die zur Stabilisierung des Modells angesetzten schwachen Federn hier nur so geringe Lasten auf, dass sich aufgebrachte Last und Gesamt-Reaktionskraft erst in der dritten Kommastelle unterscheiden. Deshalb wird auf eine separate Auflistung verzichtet.

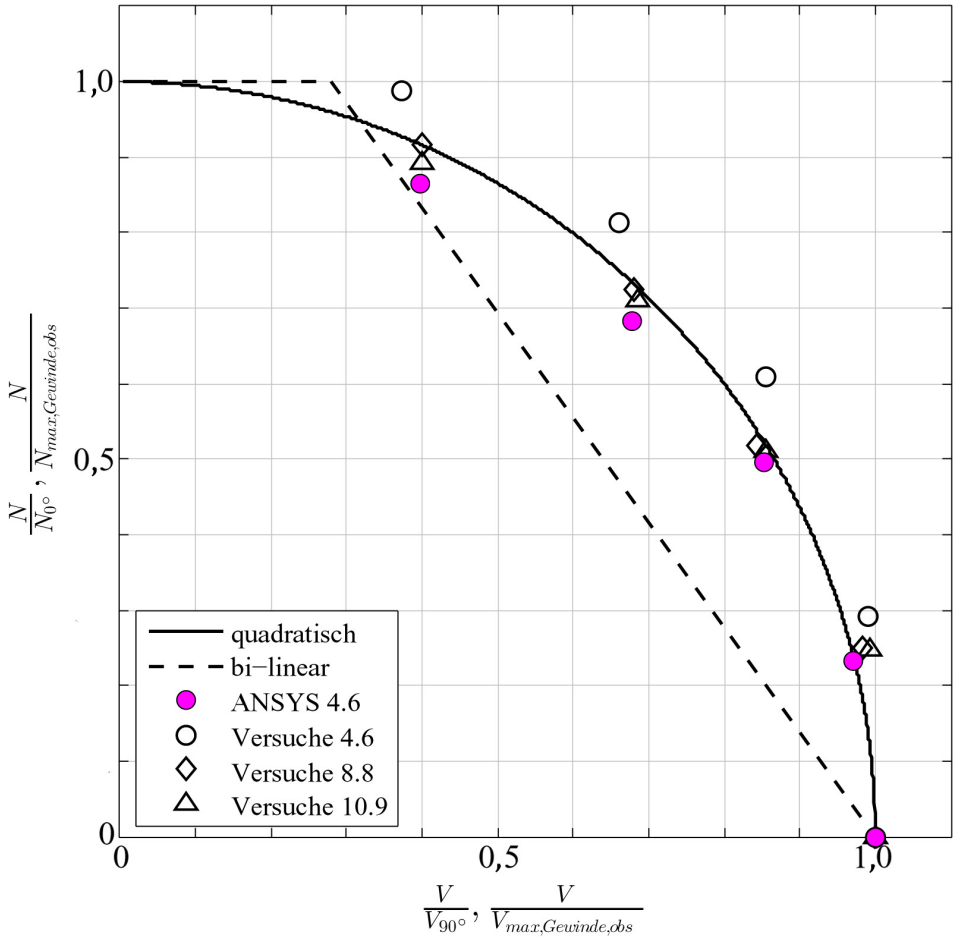


Abbildung 6.37.: Bezogene maximale Traglasten aus numerischer Simulation, Gewinde in Scherfuge, Versuchsergebnisse aus Abbildung 5.3 zum Vergleich

Tabelle 6.6.: Radialer Abstand der Versuchs- und Berechnungsergebnisse von Schrauben mit Gewinde in der Scherfuge

	Versuchsergebnisse			Ergebnisse der numerischen Simulation		
	4.6	8.8	10.9	4.6	Abweichung zu Versuchen 4.6	Abweichung zu Berechnung mit Schaft in Scherfuge 4.6
0°	1,000	1,000	1,000	1,000		
15°	1,056	0,999	0,978	0,951	-9,94%	+2,10%
30°	1,048	0,994	0,987	0,962	-8,21%	+4,23%
45°	1,050	0,989	0,996	0,986	-6,10%	+5,09%
67, 5°	1,034	1,014	1,023	0,998	-3,48%	+2,13%
90°	1,000	1,000	1,000	1,000		

Materialgesetz aufgeführt.

Aus diesem direkten Vergleich wird der Einfluss, den ein Gewinde gegenüber einem glatten Schaft hat, deutlich sichtbar. Trotz des identischen Materialgesetzes liegen die relativen Traglasten der Schraube mit Gewinde bei kombinierter Beanspruchung deutlich oberhalb derer aus den Berechnungen ohne Gewinde. Der eindeutige Einfluss des Gewindes auf die Traglast kann also auch in der numerischen Simulation gezeigt werden.

6.3.6. Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse

Das mithilfe der numerischen Simulation für die Situation des Gewindes in der Scherfuge erstellte Berechnungsmodell bildet die Schraube unter reiner Zug- und unter reiner Scherkraftbeanspruchung sehr gut ab.

Die Berechnungen, die unter kombinierten Lastanteilen durchgeführt wurden, zeigen, dass das Gewinde einen eindeutigen Einfluss auf das Tragverhalten hat, es zeigt sich eine deutliche Steigerung der relativen Traglast unter kombinierter Beanspruchung gegenüber der Berechnung an einem gewindefreien Modell. In den Versuchen zeigte sich dieser Einfluss allerdings noch deutlicher.

Da der Unterschied in den Berechnungen mit und ohne Gewinde einzig in der Geometrie liegt, ist die Verbesserung des Tragverhaltens eindeutig auf den Einfluss des Gewindes zurückzuführen.

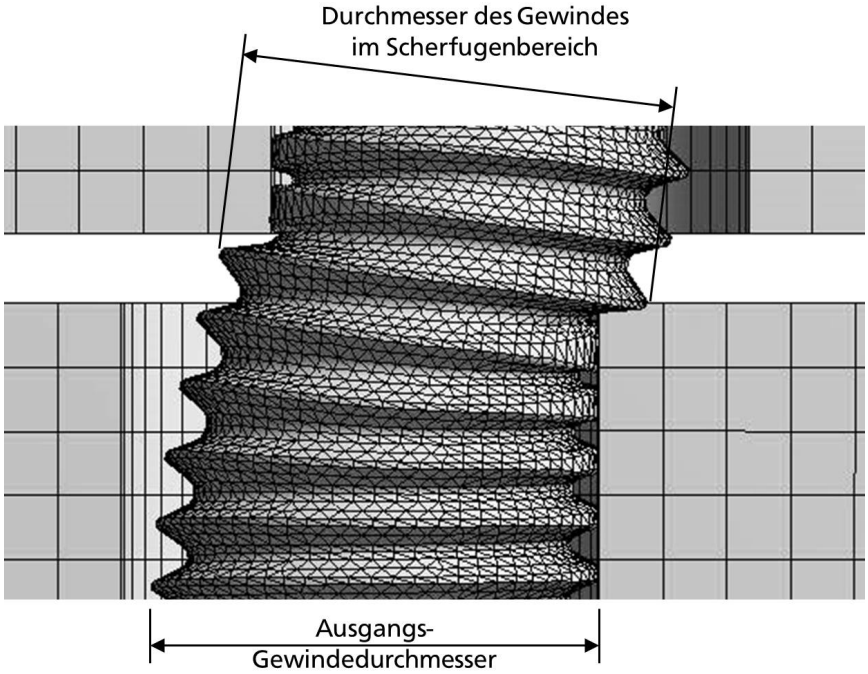


Abbildung 6.38.: Gewinde im Bereich der Scherfuge bei Erreichen der Traglast: Der Gewindegang stellt sich zwar schräg, wird aber nur unwesentlich gestaucht (aus Modell Festigkeit 4.6, Lastwinkel 45°)

Bei der Betrachtung des Verformungsbilds im Bereich der Scherfuge (Abbildung 6.38) fällt auf, dass sich der Querschnitt nicht so stark verjüngt, wie dies bei der Schraube mit Schaft der Fall war (vergl. Abbildung 6.19).

Das Gewinde behindert also die Verringerung des Querschnitts. Durch die Zugkraftkomponente baut sich auch im kombinierten Belastungsfall in den Gewindegängen ein Druckring auf, der die innere Fläche stabilisiert. In Abbildung 6.39 sind die Hauptspannungsvektoren am Gewinde im Bereich der Scherfuge unter einem Belastungswinkel von 45° dargestellt.

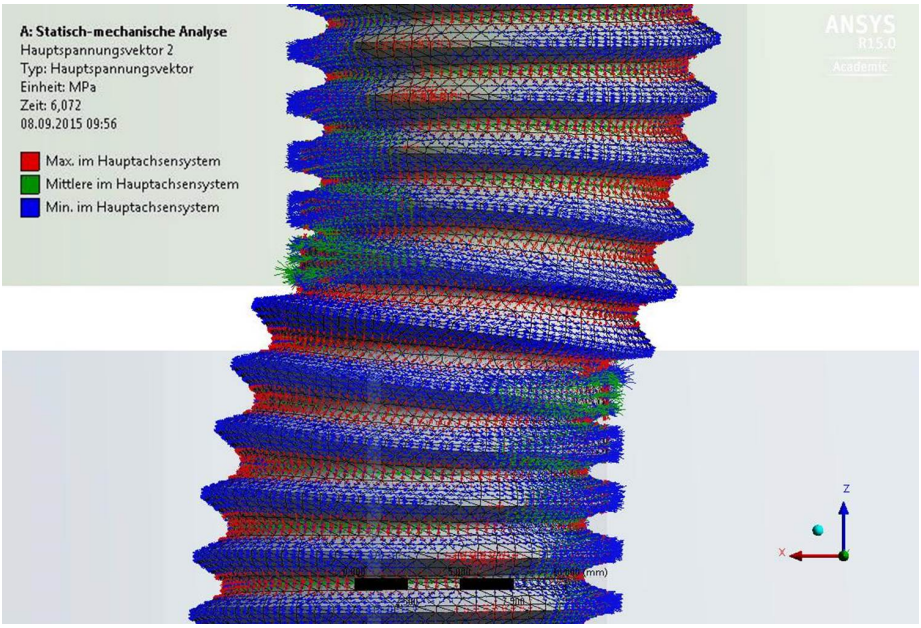


Abbildung 6.39.: Hauptspannungsvektoren im Gewinde unter kombinierter Zug-Scherkraft-Beanspruchung (Lastwinkel 45°)

In Kapitel 6.1.6 wurde gezeigt, dass sich die Verminderung der Traglast gegenüber der erwarteten quadratischen Beziehung für Schrauben mit Schaft in der Scherfuge durch die Reduzierung der belastbaren Flächen im Belastungszustand mit gleichzeitig wirkender Zug- und Scherkraft-Komponente erklären lässt.

Durch die Behinderung der Flächenreduzierung wird die Interaktionstragwirkung der Schrauben mit Gewinde deutlich gegenüber einer Schraube mit Schaft in der Scherfuge verbessert. Die Reduzierung der Flächen durch die jeweils andere Lastkomponente (vergl. 6.6), fällt deutlich kleiner aus und die Punkte im Interaktionsdiagramm rücken näher an die ursprünglich erwartete quadratische Beziehung heran.

Dass die Traglaststeigerung in den Ergebnissen der numerischen Simulation nicht so deutlich ausfällt wie in den Versuchen, kann auf zwei mögliche Ursachen zurückgeführt werden. Wie in Kapitel 6.3.1 beschrieben, war es notwendig, das Gewinde nicht zu fein zu vernetzen, um ein stabil rechnendes Modell zu erhalten. Dadurch verhalten sich die Elemente in diesem Bereich eher zu steif, gleichzeitig bekommen sie im Bereich der Scherfuge besonders große Verformungen, die die Elemente stark verzerren. Dies kann dazu führen, dass die stabilisierende Wirkung des Gewindes in der Berechnung nicht voll zum Tragen

kommen kann.

Außerdem könnte die Inhomogenität des Materials der getesteten Schrauben für eine Verstärkung des die Tragwirkung steigernden Effekts mit verantwortlich sein. Für die Berechnung ist das verwendete Materialmodell in der gesamten Schraube identisch. Bei den getesteten Schrauben könnte es sein, dass das Material nicht über den Querschnitt konstant war, sondern in den Randbereichen zum Gewinde hin bedingt durch den Produktionsprozess eine höhere Festigkeit besaß, so wie es bei den Schrauben mit Schaft der Fall war.[9] Wenn das Material des Gewindes über eine höhere Festigkeit und eine höhere Fließgrenze als der Gewindekern verfügt, wird die stabilisierende Wirkung der Gewindegänge zusätzlich verstärkt. [10]

Dass die Verbesserung des Traglastverhaltens durch das Gewinde für Schrauben mit Gewinde in der Scherfuge immer so groß ist, dass die Punkte im Interaktionsdiagramm in den Bereich der quadratischen Beziehung fallen oder sogar darüber liegen, wie es bei den getesteten Schrauben der Fall war, kann mit den gewonnenen Erkenntnissen nicht angenommen werden. Die Ergebnisse der numerischen Simulation liegen leicht darunter. Es ist durchaus möglich, dass dies, abhängig von der Materialbeschaffenheit, auch bei richtigen Schrauben der Fall sein kann.

Sicher ist aber, dass sich das Gewinde günstig auf das Tragverhalten auswirkt und die Ergebnisse immer oberhalb einer Schraube ohne Gewinde liegen.

[9] Bei den getesteten Gewindeschrauben wurde die Verteilung der Festigkeit nicht untersucht.

[10] Theoretisch wäre auch ein Einfluss von beim Herstellungsprozess von gerollten Gewinden eingeprägten Eigenspannungen denkbar, die sich mit dem zur Traglaststeigerung führenden mehr-axialen Spannungszustand überlagern. In der Regel werden Schrauben aber nach dem Aufrollen des Gewindes noch vergütet, wodurch die Eigenspannungen herausplastizieren[11], sodass dieser Einfluss entfällt.

[11] Vergl. Marten, *(2009)*, S. 61

7. Empfehlungen für die Normung

Die Ergebnisse der Versuche und die anschließende Untersuchung mithilfe der Methode der Finiten Elemente haben gezeigt, dass bei kombiniert belasteten Schrauben der quadratische Zusammenhang zwischen Zug- und Scherkraft-Komponente, auf den die Nachweisregeln der bis vor kurzem in Europa gültigen nationalen Normen zurückgehen, nicht gegeben ist.

Bei der Auftragung im Interaktionsdiagramm fallen vor allem die Ergebnisse der Schrauben mit Schaft in der Scherfuge deutlich unter die quadratische Beziehung (vergl. Abbildung 6.18). Bei den Versuchsergebnissen von Schrauben mit Gewinde in der Scherfuge war dieser Effekt nicht deutlich erkennbar (vergl. Abbildung 6.37). Die numerische Untersuchung am Schraubenmodell mit Gewinde in der Scherfuge zeigte, dass das Gewinde tatsächlich eine stabilisierende Wirkung gegenüber einem gewindefreien Schaft hat. Ein quadratischer Zusammenhang kann aber auch hier nicht angenommen werden.

Die Änderung des Nachweisformats in der DIN EN 1993-1-8[1] hin zu einer konservativeren Nachweisregel war also richtig. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse aber, dass die in der DIN EN 1993-1-8 gewählte Nachweisregel unwirtschaftlich weit auf der sicheren Seite liegt.

Eine weitere Problematik des Nachweisformats der DIN EN 1993-1-8 besteht darin, dass dieses keine Möglichkeit vorsieht, für Schrauben mit Schaft in der Scherfuge die höhere Zugtragfähigkeit des Schafts gegenüber dem Gewindequerschnitt zu berücksichtigen.

Auf der Grundlage der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit können nun Vorschläge erarbeitet werden, wie ein geändertes Nachweisformat in Zukunft aussehen kann. Dabei soll ein sicheres, mechanisch sinnvolles, wirtschaftliches und gut handhabbares Nachweisformat entwickelt werden, das auch die Berücksichtigung des Schafts in der Scherfuge gestattet.

7.1. Zusammenfassung von Aufbau und Hintergrund des aktuellen Nachweisformats der DIN EN 1993-1-8

Der Nachweis für eine kombiniert belastete Schraube aus Tabelle 3.4 der aktuellen Version der DIN EN 1993-1-8[2] lautet:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1,0 \tag{7.1}$$

$$mit \quad \frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} \leq 1,0$$

Dabei sind $F_{v,Ed}$ und $F_{t,Ed}$ die einwirkende Scherkraft- bzw. Zugkraft-Komponente und $F_{v,Rd}$ und $F_{t,Rd}$ die anzusetzenden Beanspruchbarkeiten unter reiner Scherkraft bzw. reinem Zug.

[1] DIN EN 1993-1-8:2012-10, *EC3 -Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen.*
[2] DIN EN 1993-1-8:2012-10, *EC3 -Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen*, S. 31.

Die so entstehende bi-lineare Interaktionskurve wurde in Abbildung 1.4 gezeigt. Wie dem Backgrounddokument zur Norm[3] zu entnehmen ist, war ursprünglich geplant, ein sich an der quadratischen Funktion orientierendes tri-lineares Nachweisformat nach dem Beispiel der Formel aus dem British Standard[4] (vergl. Abbildung 1.4) in die Norm aufzunehmen. Dieses hat gegenüber dem quadratischen Nachweis den Vorteil, dass für kleine Anteile einer Lastkomponente der Interaktionsnachweis entfallen kann. Da die vorgeschlagene Gleichung aber wie in Kapitel 1.2 beschrieben nicht die Anforderungen erfüllte, wurde sie schlicht in eine bi-lineare Funktion überführt. Die so entstandene Gleichung ist also nicht mechanisch begründet. Für kleine Zugbeanspruchungen ist der beabsichtigte Vorteil des nicht zu führenden Interaktionsnachweises unter den Tisch gefallen.

Bei der Berechnung der Beanspruchbarkeiten für reine Scherkraft und reinen Zug nach Tabelle 3.4 der DIN EN 1993-1-8 ist die jeweils versagende Fläche zu berücksichtigen. Bei der Berechnung der Schertragfähigkeit $F_{v,Rd}$ ist dies entweder der Schaftquerschnitt A oder der Spannungsquerschnitt des Gewindes A_S, je nachdem, welcher Querschnitt sich in der Scherfuge befindet. Da rein auf Zug belastete Schrauben immer im deutlich kleineren Gewindequerschnitt versagen, wird die Zugtragfähigkeit in der DIN EN 1993-1-8 ausschließlich unter Berücksichtigung des Spannungsquerschnitts A_S berechnet.

Durch das Fehlen einer Berechnungsmöglichkeit der Zugtragfähigkeit des Schafts wird die Anwendung der Nachweisformel Gleichung 7.1 für Schrauben mit Schaft in der Scherfuge noch unwirtschaftlicher. Wie in Kapitel 1.1 erwähnt, erwogen die Ersteller der DIN EN 1993-1-8 im Backgrounddokument daher, für den Fall des Schafts in der Scherfuge den Nachweis in der Form zu ändern, dass anstelle des Faktors 1,4 der Faktor 1,8 in der Nachweisformel verwendet wird[5]. Dieser Vorschlag wurde jedoch verworfen, um keine zwei unterschiedlichen Formeln mit identischen Koeffizienten in die Norm aufzunehmen (vergl. Kapitel 1.1).

7.2. Ausgangsgleichung für eine verbesserte Nachweisführung

Durch die Ergebnisse der Versuche an Schrauben und die Bestätigung durch die numerische Simulation kann nun eine Untergrenze für das kombinierte Tragverhalten bestimmt werden. Maßgebend sind hierfür die Ergebnisse der Schrauben mit Schaft in der Scherfuge der Festigkeitsklasse 10.9.

Wie in Abbildung 7.1 gezeigt, kann diese Untergrenze gut durch eine Interaktionsbeziehung mit der Potenz 1,5 beschrieben werden:

$$\left(\frac{N}{N_{max}}\right)^{1,5} + \left(\frac{V}{V_{max}}\right)^{1,5} \leq 1,0 \tag{7.2}$$

Diese Beziehung hat einen minimalen radialen Abstand von r_a=0,891 und deckt die Versuchsergebnisse der Festigkeitsklasse 10.9 mit Schaft in der Scherfuge gut ab.

Da es sich bei den zur Ermittlung der Untergrenze herangezogenen Versuchsergebnissen lediglich um die der einzigen getesteten Schraubenserie der maßgebenden Festigkeitsklasse

[3] Snijder u. a., *Background report EC3, Part A (1988).*
[4] BS 5950-1:2000, *Structural use of steelwork in building - Part 1.*
[5] Vergl. Snijder u. a., *Background report EC3, Part A (1988)*, S. 41 f.

10.9 handelt, ist theoretisch nicht auszuschließen, dass sich bei Versuchen mit Schrauben anderer Hersteller oder Materialzusammensetzungen geringfügig andere Ergebnisse ergeben könnten. Ein merkbarer Unterschied, der bedenklich weit auf der unsicheren Seite der vorliegenden Ergebnisse liegt, ist aber nicht zu erwarten.

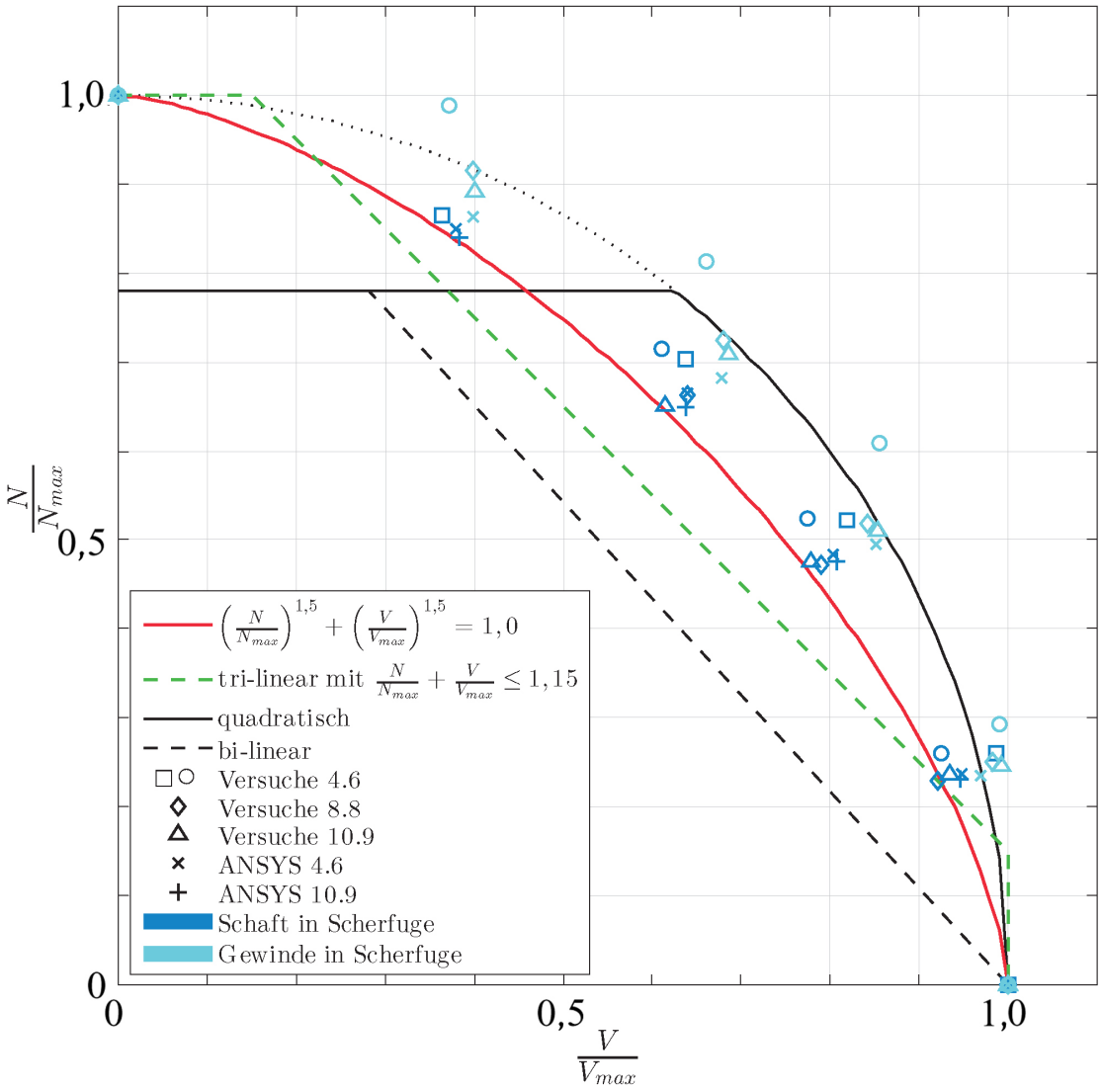


Abbildung 7.1.: Mögliche Gleichungen für das kombinierte Tragverhalten im Vergleich mit Versuchsergebnissen und Ergebnissen der numerischen Simulation, bezogen auf die jeweiligen reinen Tragfähigkeiten

Die hier getesteten Schrauben weisen ein selbst für die Festigkeitsklasse 10.9 sehr sprödes Verhalten mit einem Verhältnis von Fließgrenze zu Zugfestigkeit von ca. 0,95 auf (vergl. Tabelle D.1). Die Ergebnisse der deutlich duktileren getesteten Schrauben der Festigkeitsklasse 8.8 (vergl. Abbildungen D.3 und D.4) zeigen nur minimal größere radiale Abstände, sodass

davon ausgegangen werden kann, dass die Unterschiede innerhalb der Festigkeitsklasse 10.9 verschwindend gering sind.

Für Schrauben mit Gewinde in der Scherfuge wäre grundsätzlich eine günstigere Interaktionsbeziehung denkbar. Allerdings reichen die vorliegenden Ergebnisse nicht aus, um eine gesicherte Untergrenze bestimmen zu können. Zwar korrelieren die Versuchsergebnisse gut mit dem ursprünglichen quadratischen Ansatz, aber die Auswertung der numerischen Untersuchung zeigt, wie stark der tatsächliche Zusammenhang von der Beschaffenheit des Gewindes abhängt und dass es durchaus denkbar ist, dass für einige Schrauben mit Gewinde in der Scherfuge der quadratische Ansatz nicht auf der sicheren Seite liegt. Auch konnten im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine Parameterstudien für Schrauben mit Gewinde in der Scherfuge durchgeführt werden. Eine Änderung von Durchmesser oder Klemmlänge könnte hier – anders als bei Schrauben mit glattem Schaft – durchaus einen Einfluss haben, da sich hier die Geometrieverhältnisse ändern.

Die Ergebnisse belegen aber sicher, dass das Vorhandensein des Gewindes das Tragverhalten in jedem Fall verbessert. Damit ist eine Formel, die sich an dem Verhalten der Schrauben mit Schaft in der Scherfuge orientiert, auch für Schrauben mit Gewinde in der Scherfuge anwendbar.

Eine genauere Betrachtung würde nicht nur einen deutlichen Mehraufwand bedeuten, sondern auch zwei unterschiedliche Nachweisformate zur Folge haben, was die Normung unnötig verkompliziert. Zudem ist der Gewinn an ansetzbarer Tragfähigkeit im Unterschied von Gewinde zu Schaft in der Scherfuge vergleichsweise gering. Deshalb wird empfohlen, eine einheitliche Formel, die sich am Tragverhalten der hochfesten Schrauben mit Schaft in der Scherfuge orientiert, zu verwenden.

7.3. Möglichkeit der Überführung in eine tri-lineare Gleichung

In Abbildung 7.1 ist neben dem Potenzansatz aus Gleichung 7.2 auch ein tri-linearer Ansatz dargestellt, der auf den folgenden Gleichungen beruht:

$$\begin{aligned} &\frac{N}{N_{max}} \leq 1,0 \\ &\frac{N}{N_{max}} + \frac{V}{V_{max}} \leq 1,15 \\ &\frac{V}{V_{max}} \leq 1,0 \end{aligned} \tag{7.3}$$

Dieser tri-lineare Ansatz würde die Handhabung des Nachweises, wie bei der Erstellung der DIN EN 1993-1-8 beabsichtigt, vereinfachen, er ist allerdings mit einem minimalen radialen Abstand von r_a=0,813 für Schrauben mit ähnlich großen Lastanteilen deutlich konservativer.

7.4. Berücksichtigung der Zugtragfähigkeit des Schafts im Interaktionsnachweis

Eine deutlich bessere Ausnutzung für Schrauben mit Schaft in der Scherfuge bringt die im Nachweisformat der DIN EN 1993-1-8 ausgeschlossene Möglichkeit, die Zugtragfähigkeit des Schaftes im Interaktionsnachweis anzusetzen.

Um hier die Eindeutigkeit der Nachweisformel zu gewährleisten, wird vorgeschlagen, den Beanspruchbarkeiten für reinen Zug $F_{t,Rd}$ und reine Scherkraft $F_{v,Rd}$ einen Index hinzuzufügen, der unterscheidet, ob die jeweilige Tragfähigkeit des Schaft- oder des Spannungsquerschnitts vorliegt. Dies hat zudem den Effekt, dass die Bezeichnung der Schertragfähigkeit $F_{v,Rd}$ nicht mehr, wie es momentan der Fall ist, für zwei unterschiedliche Werte steht.

Angelehnt an die Bezeichnungen A für den Schaft- und Nennquerschnitt der Schraube und die Bezeichnung A_S für den für die Tragfähigkeiten des Gewindes anzusetzenden Spannungsquerschnitt wird vorgeschlagen, die Indizes A und S zu verwenden. Damit werden die Beanspruchbarkeiten des Schafts zu $F_{t,Rd,A}$ bzw. $F_{v,Rd,A}$ und die des Gewindequerschnitts zu $F_{t,Rd,S}$ bzw. $F_{v,Rd,S}$.

Da die reine Zugtragfähigkeit des Schafts nicht tabelliert vorliegt, kann diese auch vereinfachend über das Verhältnis von Schaft- zu Gewindequerschnitt aus der Beanspruchbarkeit des Gewindes berechnet werden[6]:

$$F_{t,Rd,A} = 1,25 \cdot F_{t,Rd,S} \tag{7.4}$$

7.5. Vorschlag für den Übertrag in die Norm

Auf Grundlage der vorangegangenen Überlegungen und unter Verwendung der in der DIN EN 1993-1-8 üblichen Benennungen ergeben sich folgende Vorschläge für eine zukünftige Normenregelung:

Gewinde in der Scherfuge

$$\left(\frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd,S}}\right)^{1,5} + \left(\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd,S}}\right)^{1,5} \leq 1,0 \tag{7.5}$$

Schaft in der Scherfuge

$$\left(\frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd,A}}\right)^{1,5} + \left(\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd,A}}\right)^{1,5} \leq 1,0 \tag{7.6}$$

$$mit \quad \frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd,S}} \leq 1,0$$

[6] Da das Verhältnis von Schaft- zu Gewindequerschnitt nicht für alle Schraubengrößen identisch ist, liegt der Faktor 1,25 für einige Schraubengrößen leicht auf der sicheren Seite.

Der Interaktionsnachweis kann dabei auch umgeschrieben werden zu

$$\left(\frac{F_{t,Ed}}{1,25 \cdot F_{t,Rd,S}}\right)^{1,5} + \left(\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd,A}}\right)^{1,5} \leq 1,0 \tag{7.7}$$

Die Überführung des Nachweises in ein tri-lineares Nachweiskonzept kann entsprechend der zuvor beschriebenen Gleichung 7.3 geschehen. Dies würde allerdings zu Lasten der Ausnutzbarkeit geschehen, diese wäre für Schrauben mit identisch großem Zug- und Scherlastanteil gegenüber der Potenzgleichung um gut 9% geringer.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Für die Bemessung von gleichzeitig auf Zug und Abscheren belasteten Schrauben muss der Einfluss, den beide Lastkomponenten aufeinander haben, berücksichtigt werden. In der bis vor kurzem gültigen deutschen Norm DIN 18800-1 „Stahlbauten - Bemessung und Konstruktion“ und in den nationalen Normen vieler anderer Länder wurde der Bemessungsnachweis nach einem quadratischen Ansatz geführt.

In dem in Deutschland Mitte 2012 bauaufsichtlich eingeführten Eurocode 3 „Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten“, der europaweit die nationalen Normen ersetzt, findet sich im Teil 1-8 „Bemessung von Anschlüssen“ ein davon abweichendes, bi-lineares und deutlich konservativeres Nachweisformat.

In der vorliegenden Arbeit wurden in einer umfangreichen Recherche die Hintergründe für diese grundlegende Bemessungsänderung erforscht und die bestehenden Untersuchungen, die in den 1960er bis 1980er Jahren zu diesem Thema durchgeführt wurden, neu aufgearbeitet und analysiert.

Es zeigt sich, dass keine der bestehenden Versuchsreihen über ausreichend Informationen verfügt, um eine gesicherte und qualitative Aussage über das tatsächliche Tragverhalten kombiniert belasteter Schrauben zu liefern.

Deshalb wurde im Rahmen dieser Arbeit eine eigene, umfangreiche Versuchsreihe entwickelt und durchgeführt. Für Schrauben mit Schaft und mit Gewinde in der Scherfuge wurden jeweils Schrauben der Festigkeitsklassen 4.6, 8.8 und 10.9 unter reinem Zug, ein- und zweischnittigem reinem Abscheren sowie unter vier unterschiedlichen Zug-Scherkraft-Verhältnissen getestet. Anschließend wurde nach der Methode der Finiten Elemente das Phänomen numerisch simuliert und das Tragverhalten genauer analysiert und erklärt. Außerdem wurde durch eine Parameterstudie am numerischen Modell die Übertragbarkeit auf nicht getestete Geometrien belegt.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die quadratische Interaktionsbedingung das tatsächliche Tragverhalten von kombiniert belasteten Schrauben überschätzt. Dies ist vor allem bei jenen Schrauben der Fall, die mit Schaft in der Scherfuge getestet wurden. Die Versuchsergebnisse der Schrauben mit Gewinde in der Scherfuge zeigen ein deutlich günstigeres Tragverhalten, die Versuchsergebnisse liegen hier näher oder sogar oberhalb der quadratischen Interaktionsbeziehung.

Auffällig bei der Versuchsauswertung sind die großen Inhomogenitäten, denen die Materialfestigkeit innerhalb der einzelnen Schraube unterliegt. Obgleich die Streuung der Ergebnisse von Schrauben einer Versuchsserie sehr gering ist, sind die Unterschiede der Festigkeit der einzelnen Schraube zwischen Gewinde- und Schaftbereich und über die Querschnittsdicke bei fast allen getesteten Serien sehr hoch.

Mithilfe von aufwendigen Materialtests wurde daher sichergestellt, dass die richtigen Bezugswerte für die Auswertung der durchgeführten Versuche vorliegen.

Die anhand der eigenen Versuche gewonnenen Erkenntnisse ermöglichten eine qualitative

Neuauswertung der Ergebnisse der vorangegangenen Studien. Auch wenn die Versuchsergebnisse der älteren Studien aufgrund der hier fehlenden Bezugswerte nicht quantitativ auswertbar sind, können die oben beschriebenen Effekte auch hier sichtbar gemacht werden.

Der Grund für die Unterschreitung des quadratischen Zusammenhangs und den Unterschied im Tragverhalten zwischen Schrauben mit Schaft und Schrauben mit Gewinde in der Scherfuge konnte anhand der Modellierung mit der Methode der Finiten Elemente festgestellt werden. Durch die numerische Simulation war es möglich, die Verformungen in der Schraube zu beobachten. Dadurch konnte gezeigt werden, dass die Reduzierung der belasteten Fläche unter der gleichzeitigen Wirkung der zwei Lastkomponenten die Traglast deutlich mindert. Durch die stabilisierende Wirkung des von der Zugkraft-Komponente nicht belasteten Gewindes fällt die Reduzierung der Fläche bei Schrauben mit Gewinde in der Scherfuge deutlich geringer aus, was zu einer Verbesserung des Tragverhaltens gegenüber einem gewindefreien Schaft führt.

Die im Rahmen dieser Arbeit gefundenen Erkenntnisse zeigen, dass die Änderung des Nachweisformats hin zu einer konservativeren Nachweisregel richtig war. Gleichzeitig zeigt sich aber auch, dass die bei der Erstellung der DIN EN 1993-1-8 gewählte neue Nachweisregel über keinerlei mechanischen Hintergrund verfügt und für kombiniert belastete Schrauben unwirtschaftlich weit auf der sicheren Seite liegt.

Um in Zukunft eine angemessene Bemessung zu ermöglichen, wurde daher zum Abschluss der Arbeit ein Vorschlag für eine neue Nachweisführung entwickelt. Dieser orientiert sich an der Tragwirkung der Schrauben mit Schaft in der Scherfuge. Maßgebend sind hierbei die Ergebnisse der Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9, da sich das Tragverhalten mit Abnahme der Duktilität des Werkstoffs verschlechtert. Für andere Schraubenfestigkeiten liegt er damit auf der sicheren Seite.

Es ist anzumerken, dass die im Rahmen dieser Arbeit gefundene Untergrenze ausschließlich auf den Ergebnissen einer Versuchsserie beruht. Zur Sicherung der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Schrauben und Hersteller sollten hier noch weitere Versuche an Schrauben mit Festigkeitsklasse 10.9 durchgeführt werden. Es ist jedoch nicht zu erwarten, dass sich hierbei deutlich andere Ergebnisse zeigen. Schon der Unterschied der Ergebnisse zu denen der im Rahmen dieser Arbeit getesteten Schrauben der Festigkeitsklasse 8.8 ist sehr gering, obgleich diese ein deutlich duktileres Materialverhalten aufweisen. Damit können die hier gewonnenen Ergebnisse trotz der geringen Versuchsanzahl als sehr gute Basis für die entwickelte Empfehlung für eine zukünftige Nachweisführung angesehen werden.

Trotz des sichtbar besseren Tragverhaltens von Schrauben mit Gewinde in der Scherfuge wurde davon abgesehen, eine zweite Nachweisführung für diese Situation vorzuschlagen. Der auftretende Unterschied ist nicht so groß, dass dies die Verkomplizierung einer künftigen Nachweisformel durch zwei unterschiedliche Nachweisverfahren rechtfertigt. Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse reichen gleichzeitig nicht aus, um eine definitive Untergrenze für das Tragverhalten mit Gewinde in der Scherfuge anzugeben. Die hier beobachteten Ergebnisse lassen vermuten, dass eine Vielzahl von Faktoren Einfluss auf das Tragverhalten mit Gewinde haben könnte, die nicht untersucht werden konnten. Vor allem ein Einfluss von fertigungsbedingten Festigkeitsunterschieden zwischen Gewindegängen und Schraubenkern ist zu vermuten. Auch ob im Gegensatz zu Schrauben mit Schaft in der Scherfuge ein Einfluss der Geometrie eine Rolle spielen könnte, konnte im Rahmen dieser

Arbeit nicht überprüft werden. Durch andere Schraubendurchmesser und Verhältnisse von Durchmesser zu Klemmlänge könnte der stabilisierende Spannungszustand, der Ursache für die bessere Tragwirkung ist, beeinflusst sein. Für eine genauere Aussage besteht hier noch weiterer Untersuchungsbedarf.

Dennoch konnte eindeutig gezeigt werden, dass im Fall des Gewindes in der Scherfuge grundsätzlich ein besseres Tragverhalten vorliegt, sodass die anhand der Ergebnisse der Schrauben mit Schaft in der Scherfuge entwickelte Grenze auch für diesen Fall eine auf der sicheren Seite liegende Nachweisführung ermöglicht.

Literatur

Bilderbeek, D. W. *Voorspanbouten en handelsbouten op trek en afschuving*. Stevin-Laboratotium, Afdeling der Weg en Waterbouwkunde, Technische Hogeschool Delft, Scriptie 6-71-2. Delft, 1971.

BS 5950-1:2000. *Structural use of steelwork in building - Part 1: Code of practice for design -Rolled and welded sections*. London: BSI, 2000.

Chesson, E. J., N. L. Faustino und W. H. Munse. „High-Strength Bolts Subjected to Tension and Shear". In: *Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers* (ST 5 1965), S. 155–180.

Cox, H. und W. H. Munse. *Static Strength of Rivets Subjected to Combined Tension and Shear*. Civil Engineering Studies, Structural Research Series No. 22, University of Illinois. Urbana, Illinois, USA, 1956.

DASt-Richtlinie 021. *Schraubenverbindungen aus feuerverzinkten Garnituren M 39 bis M 64 entsprechend DIN 6914, DIN 6915, DIN 6916*. Düsseldorf: Deutscher Ausschuß für Stahlbau DASt, Stahlbau Verlags- und Service GmbH, 08/2006.

DIN 1050:1968-06. *Stahl im Hochbau*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 06/1968.

DIN 13-1:1999-11. *Metrisches ISO-Gewinde allgemeiner Anwendung – Teil 1: Nennmaße für Regelgewinde, Gewindedurchmesser von 1 mm bis 68 mm*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 11/1999.

DIN 18800-1:1990-11. *Stahlbauten - Teil 1: Bemessung und Konstruktion*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 11/1990.

DIN 18800-1:2008-11. *Stahlbauten - Teil 1: Bemessung und Konstruktion*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 11/2008.

DIN 7989:2001-04. *Scheiben für Stahlkonstruktionen – Teil 1: Produktklasse C*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 04/2001.

DIN 7990:2008-04. *Sechskantschrauben mit Sechskantmutter für Stahlkonstruktionen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 04/2008.

DIN EN 14399-1:2006-06. *Hochfeste planmäßig vorspannbare Schraubenverbindungen für den Metallbau – Teil 1: Allgemeine Anforderungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 06/2006.

DIN EN 14399-4:2006-06. *Hochfeste planmäßig vorspannbare Schraubenverbindungen für den Metallbau – Teil 4: System HV – Garnituren aus Sechskantschrauben und -muttern*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 06/2006.

DIN EN 14399-6:2006-06. *Hochfeste planmäßig vorspannbare Schraubenverbindungen für den Metallbau – Teil 6: Flache Scheiben mit Fase*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 06/2006.

DIN EN 1993-1-1:2012-10. *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 12/2010.

DIN EN 1993-1-8:2012-10. *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 12/2010.

DIN EN ISO 4014:2011-06. *Sechskantschrauben mit Schaft – Produktklassen A und B*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 06/2011.

DIN EN ISO 4017:2014-10. *Mechanische Verbindungselemente – Sechskantschrauben mit Gewinde bis Kopf – Produktklassen A und B*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, Oktober/2014.

DIN EN ISO 4032:2013-04. *Sechskantmuttern (Typ 1) – Produktklassen A und B*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 04/2013.

DIN EN ISO 4034:2013-04. *Sechskantmuttern (Typ 1) – Produktklasse C*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 04/2013.

DIN EN ISO 898-1:2013-05. *Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus Kohlenstoffstahl und legiertem Stahl – Teil 1: Schrauben mit festgelegten Festigkeitsklassen – Regelgewinde und Feingewinde*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, Mai/2013.

Hasselmann, U. und G. Valtinat. *Geschraubte Verbindungen*. Stahlbau-Kalender 2002. Ernst & Sohn Verlag, S. 343–421.

Hassler, M. *Versuche mit Schrauben bei kombinierter Zug- und Scherbeanspruchung*. Bericht aus dem Institut für Stahlbau und Holzbau der Universität Stuttgart, Bericht Nr. 1. Stuttgart, 1973.

Kloos, K.-H. und W. Thomala. *Schraubenverbindungen, Grundlagen, Berechnung, Eigenschaften, Handhabung*. 5. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2007. ISBN: 978-3-540-21282-9.

Knobloch, M. *Zum Tragsicherheitsnachweis scherbeanspruchter Schrauben im Stahlbau unter vorwiegend ruhender Belastung*. Dissertation an der Universität Essen GH. Essen, 1990.

Knobloch, M. und H. Schmidt. *Statistische Tragfähigkeitsdaten industriell gefertigter Schrauben unter vorwiegend ruhender Zug- und Abscherbeanspruchung im Gewinde.* Forschungsberichte aus dem Fachbereich Bauwesen, Universität-Gesamthochschule-Essen, Band 41. Essen, 1990.

Knobloch, M. und H. Schmidt. *Tragfähigkeit und Tragverhalten stahlbauüblicher Schrauben unter reiner Scherbeanspruchung und unter kombinierter Scher- Zugbeanspruchung.* Forschungsberichte aus dem Fachbereich Bauwesen, Universität-Gesamthochschule-Essen, Band 41. Essen, 1987.

Marten, F. *Zur Ermüdungsfestigkeit hochfester großer Schrauben.* Schriftenreihe des Instituts für Stahlbau der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Heft 24. Aachen: Shaker Verlag, 2009.

Petersen, C. *Stahlbau: Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten.* Aufl. 3, 2., durchgesehener Nachdruck. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg-Verlag, 1997. isbn: 3-528-28837-X.

Pratchett, T. und S. Baxter. *The Long Earth.* Great Britain: Corgi, Transworld Publishers, 2013. isbn: 978-0-552-16723-9.

Renner, A. und J. Lange. *The Influence of the Bolt Grade on its Behaviour under Combined Tension and Shear.* International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, Cape Town, South Africa, 2013.

Renner, A. und J. Lange. *Versuche zur Zug-Abscher-Tragwirkung von Schrauben.* Festschrift Peter Schaumann, Institut für Stahlbau, Leibniz Universität Hannover, 2014. und Stahlbau 83 (2014), Heft 4, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, S. 265–272.

Schaumann, P., P. Kleineidam und M. Seidel. *Zur FE-Modellierung von zugbeanspruchten Schraubenverbindungen.* Stahlbau 70 (2001), Heft 2, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, S. 73–84.

Sedlacek, G. und R. Schneider. *Background documentation to prEN 1993-1-8, Eurocode 3:Design of steel structures, Part 1.8: Design of Joints, Third draft.* Aachen, 2004.

Shakir-Khalil, H. und C. Ho. „Black Bolts under Combined Tension and Shear“. In: *The Structural Engineer* (57B, No. 4 12/1979), S. 69–76.

Snijder, H., D. Ungermann, J. Stark, G. Sedlacek, F. Bijlaard und A. Hemmert-Halswick. *Evaluation of test results on bolted connections in order to obtain strength funktions ans suitable model factors - Part A: results. Background report to Eurocode 3 "common unified rules for steel structures".* TNO-report. BI-88-087. Delft, 1988.

Snijder, H., D. Ungermann, J. Stark, G. Sedlacek, F. Bijlaard und A. Hemmert-Halswick. *Evaluation of test results on bolted connections in order to obtain strength*

funktions ans suitable model factors - Part B: evaluations. Background report to Eurocode 3 "common unified rules for steel structures". TNO-report. BI-88-087. Delft, 1988.

Steurer, A. *Trag- und Verformungsverhalten von auf Zug beanspruchten Schrauben*. Institut für Baustatik und Konstruktion, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich. Zürich, 1996.

A. Einzelergebnisse der alten Versuchsreihen

Chesson u.a. (1965)

Tabelle A.1.: Einzelergebnisse Chesson u.a. (1965), Gesamttraglast in kN

		Gewinde in der Scherfuge			Schaft in der Scherfuge					
Serie:		**A**	**F**	**B**	**C**	**D**	**E**	**G**	**H**	**I**
Stahlsorte:		A 325	A 354 BD	A 325	A 325 gehärtet	A 325	A 325	A 354 BD	A 325	A 325
Durchmesser:		3/4"	3/4"	3/4"	3/4"	3/4"	3/4"	3/4"	3/4"	1"
f_y Platten in N/mm^2		190 - 225	350	190 - 225	190 - 225	350	690	690	190 - 225	190 - 225
N_{max}*		168,7	240,0	183,8	219,1	181,9	178,0	247,5	187,6	306,5
$N_{max,Schaft}$**		-	-	216,3	257,8	214,1	209,5	291,3	220,8	360,7
0°	Nr. 1	163,2	237,5	185,5	218,0	182,4	179,7	246,4	189,0	304,7
	Nr. 2	168,7	242,4	181,7	220,2	181,5	176,4	248,7	186,2	308,3
	Nr. 3	174,1		184,2						
11,25°	Nr. 1	174,6		186,8						
	Nr. 2	174,5		190,7						
	Nr. 3	175,7		187,7						
22,5°	Nr. 1	155,7	200,2	177,9	218,9	186,4	180,8	235,8	213,1	305,6
	Nr. 2	153,7	201,9	183,3	220,0	186,2	184,2	217,4	206,4	299,4
	Nr. 3	153,8		178,8						
	Nr. 4	152,4								
	Nr. 5	153,5								
33,75°	Nr. 1	141,4	178,4	175,9	201,9	177,0	166,6	197,9	193,5	283,8
	Nr. 2	141,9	171,3	171,3		171,3	169,7	219,7	191,3	278,0
	Nr. 3	138,3		170,9						
45°	Nr. 1	126,3	163,7	161,9	196,2	167,0	163,7	205,7	179,7	272,2
	Nr. 2	122,8	163,6	169,5	192,4	167,5	154,4	204,6	177,9	283,4
	Nr. 3	124,3		162,4						
67,5°	Nr. 1	110,0		154,8	180,2	149,7				
	Nr. 2	110,8		152,6	178,6					
	Nr. 3	113,2		156,1						
90°	Nr. 1	112,9	171,3	153,0	181,5	148,1	146,8	188,2	163,7	278,0
	Nr. 2	116,4	157,0	159,2	181,0	152,6	146,8	193,5	167,3	265,1
	Nr. 3	120,1		157,9						

* reine Zugtragfähigkeit des Gewindes: Mittelwert der 0°-Versuche
** reine Zugtragfähigkeit des Schafts: N_{max} multipliziert mit A_{Schaft}/A_S

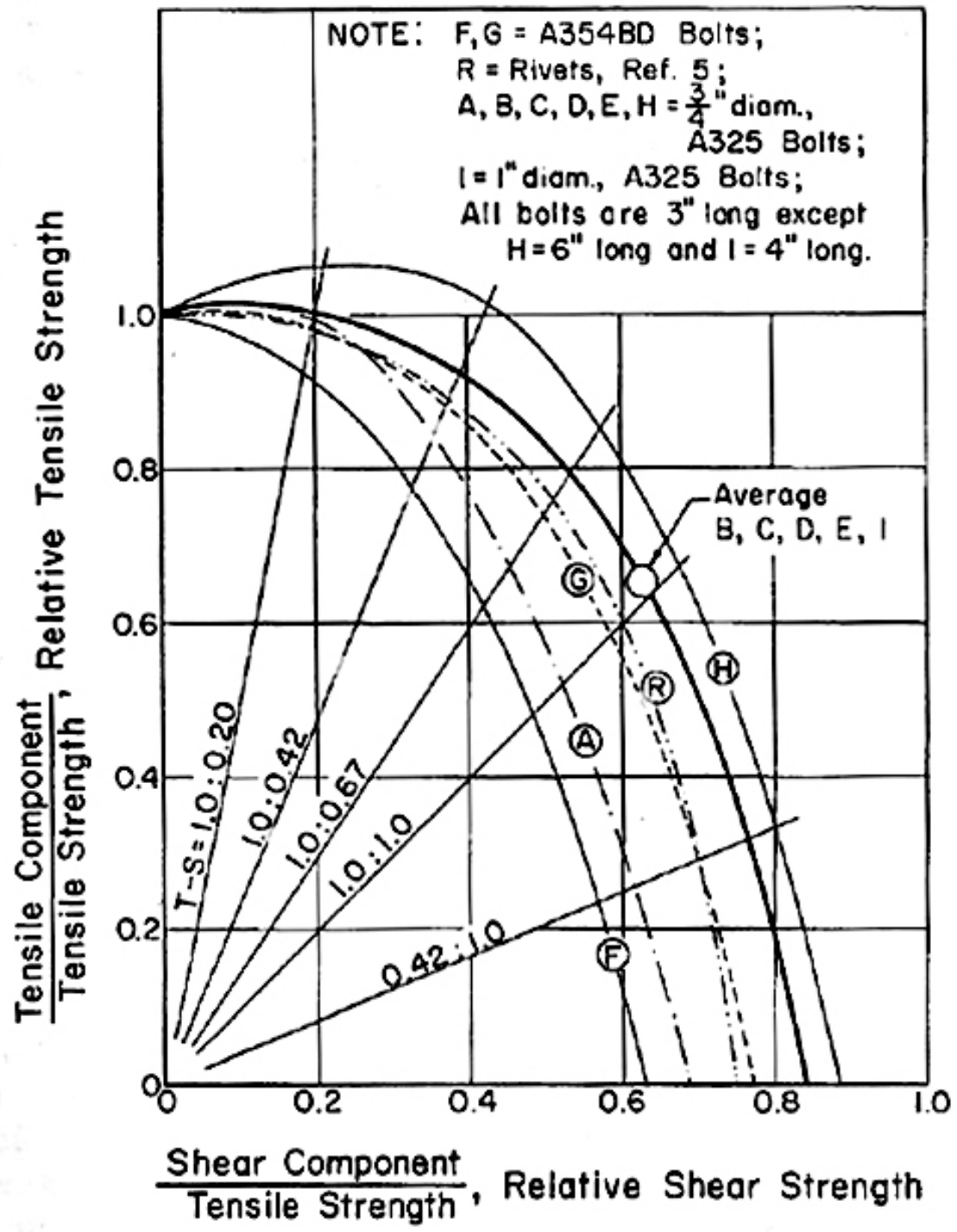


Abbildung A.1.: Ergebnisdiagramm Chesson u.a., Zug- und Scher-Komponente bezogen auf die Zugtragfähigkeit des Gewindes (ermittelt im 0°-Versuch), idealisierte Kurven durch Mittelwerte der Versuchsserien

Bilderbeek (1971)

Tabelle A.2.: Einzelergebnisse Bilderbeek (1971), Gesamttraglast in kN

		Gewinde in der Scherfuge				Schaft in der Scherfuge					
Größe:		M 12	M 20	M 12	M 20	M 12	M 20	M 12	M 20	M 12	M 20
Festigkeit:		4.6	4.6	8.8	8.8	4.6	4.6	8.8	8.8	10.9	10.9
N_{max}*		38,3	114,0	70,3	200,0	47,9	157,7	74,0	236,0	84,5	269,3
$N_{max,Schaft}$**		-	-	-	-	64,2	202,1	99,2	302,6	113,3	345,3
0°	Nr. 1	39,0	118,0	71,0	215	47,5	158	75,5	239,0	84,0	270
	Nr. 2	39,5	107,0	69,5	192	48,3	158	72,5	233,0	85,0	272
	Nr. 3	36,3	116,0		193		157			84,5	266
	Nr. 4		115,0								
15°	Nr. 1			*67,5*			*165*		*246,0*	*92,0*	
	Nr. 2			*64,5*			*167*		*239,0*	*91,0*	
30°	Nr. 1	*38,0*	*106,0*	*58,5*	*171*	49,4	*145*	*77,5*	*230,0*	*92,0*	*263*
	Nr. 2	*38,5*	*108,5*	*60,0*	*179*	50,0	*140*	*78,5*	*208,0*	*93,0*	*262*
	Nr. 3	*38,5*				*50,2*			*222,0*		
	Nr. 4					*48,5*					
45°	Nr. 1		*94,0*	*53,5*			*130*		*212,0*	*82,5*	*232*
	Nr. 2		*93,0*	*54,0*			*129*		*206,0*	*84,0*	*233*
60°	Nr. 1	29,5	87,0	50,5	*152*	*40,0*	*119*	65,5	212,0	80,0	225
	Nr. 2	30,3	83,5	*50,0*	*143*	*41,8*	*124*	*64,5*	*218,0*	80,0	221
	Nr. 3	*29,8*	*82,5*	*47,5*				*66,0*	*204,0*	*79,0*	222
	Nr. 4	*29,8*	*87,0*							*83,0*	225
	Nr. 5		*86,5*†							*78,0*	*222*
	Nr. 6		*82,5*†							*79,5*	*219*
	Nr. 7										*220*†
	Nr. 8										*217*†
75°	Nr. 1		80,0	*47,5*	*144*		122		*205,0*	*76,0*	207
	Nr. 2		82,0	*47,0*			127		*209,0*	*76,0*	215
	Nr. 3		*87,5*				*121*				
	Nr. 4		*88,0*				*123*				
90°	Nr. 1	32,5	86,0	46,0	144	41,5	124	64,0	218,0	83,5	230
	Nr. 2	32,5	84,0	49,5	134	40,8	127	66,5	216,0	82,5	228
	Nr. 3	29,0	*90,0*	*48,5*	*136*	*39,5*	*122*	*62,5*	*218,0*	*75,0*	216
	Nr. 4	*31,0*	*84,0*	*46,0*	*141*	*40,0*	*129*	*63,5*	*204,0*	*75,0*	219
	Nr. 5	*30,0*	*88,0*†				*126*†			*77,0*†	
	Nr. 6	*33,5*	*8,0*†				*125*†			*77,0*†	

* reine Zugtragfähigkeit des Gewindes: Mittelwert der 0°-Versuche
** reine Zugtragfähigkeit des Schafts: N_{max} multipliziert mit A_{Schaft}/A_S
kursiv: Material Scherplatten Fe52, sonst Fe 37, † Schrauben vorgespannt

Vergleichskurven im Diagramm:
$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + \gamma \cdot \tau^2}$
mit $\gamma = 3$ und
$\gamma = 2$

$\sigma_i = 4\ TF/cm^2 (400 N/mm^2)$ für 4.6

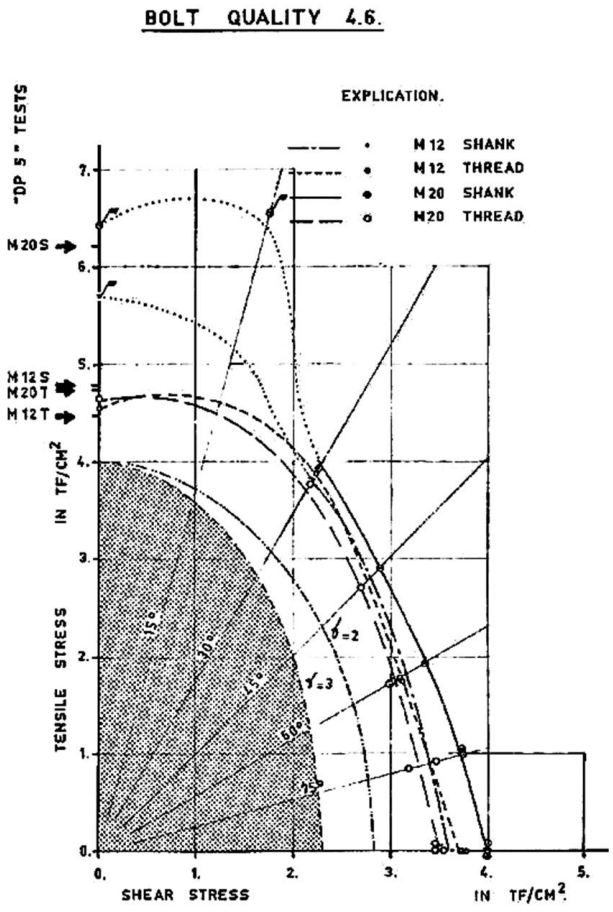


Abbildung A.2.: Ergebnisdiagramm Bilderbeek für Schrauben der Festigkeitsklasse 4.6, Zug- und Scherspannungs-Anteile in tons-force/cm^2 $\hat{=}$ 100 N/mm^2 (Traglast zerlegt in Zug- und Scher-Komponente, dividiert durch Querschnittsfläche, bei Schrauben mit Schaft bezogen auf den versagenden Querschnitt: 0° und 15° Fläche Gewinde, sonst Fläche Schaft), idealisierte Kurven durch Mittelwerte der Versuchsserien, Vergleich mit quadratischem Ansatz

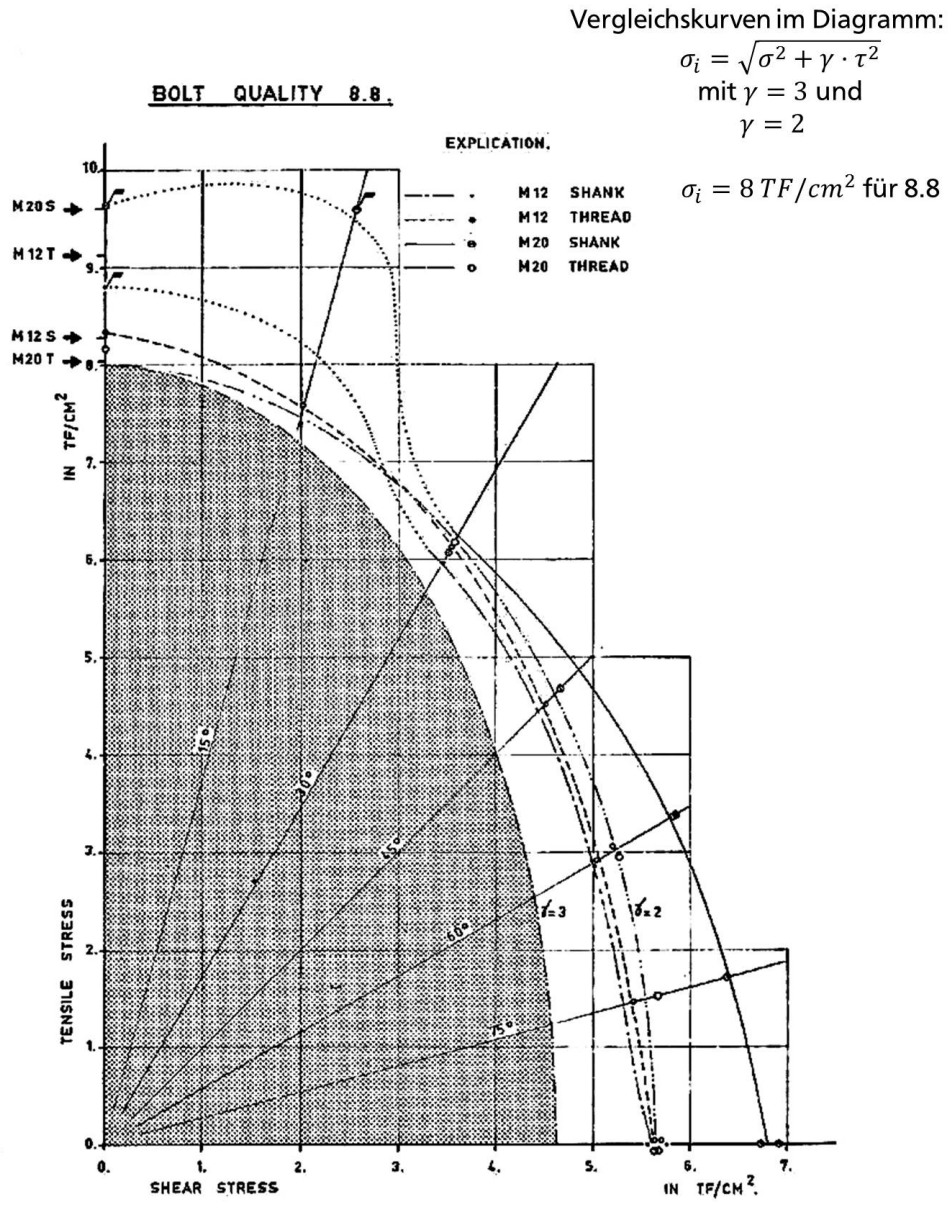


Abbildung A.3.: Ergebnisdiagramm Bilderbeek für Schrauben der Festigkeitsklasse 8.8, Zug- und Scherspannungs-Anteile in tons-force/cm^2 $\hat{=}$ 100 N/mm^2 (Traglast zerlegt in Zug- und Scher-Komponente, dividiert durch Querschnittsfläche, bei Schrauben mit Schaft bezogen auf den versagenden Querschnitt: 0° und 15° Fläche Gewinde, sonst Fläche Schaft), idealisierte Kurven durch Mittelwerte der Versuchsserien, Vergleich mit quadratischem Ansatz

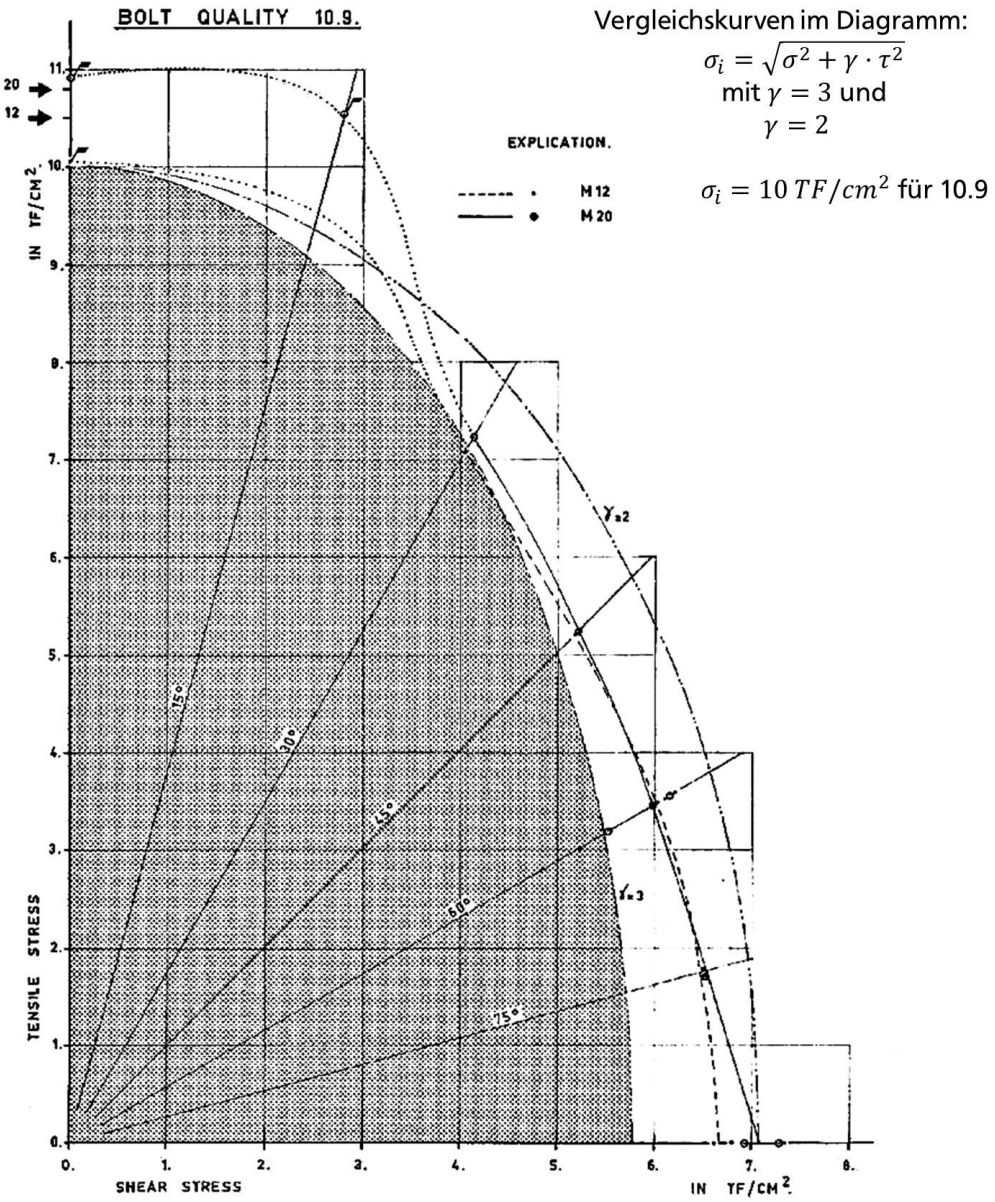


Abbildung A.4.: Ergebnisdiagramm Bilderbeek für Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9, Zug- und Scherspannungs-Anteile in tons-force/cm^2 $\hat{=}$ 100 N/mm^2 (Traglast zerlegt in Zug- und Scher-Komponente, dividiert durch Querschnittsfläche, bei Schrauben mit Schaft bezogen auf den versagenden Querschnitt: 0° und 15° Fläche Gewinde, sonst Fläche Schaft), idealisierte Kurven durch Mittelwerte der Versuchsserien, Vergleich mit quadratischem Ansatz

Hassler (1973)

Tabelle A.3.: Einzelergebnisse Hassler (1973), Zugkraft (N) und Scherkraft (V) in kN

		Schaft in der Scherfuge	
Größe:		M 24	
Festigkeit:		4.6	
N_{max}*		137,9	
$N_{max,Schaft}$**		176,5	
		N	V
100% Zug	Nr. 1	175,3	0,0
	Nr. 2	176,6	0,0
	Nr. 3	176,2	0,0
	Nr. 4	178,0	0,0
	Nr. 5	176,6	0,0
75% Zug	Nr. 1	131,0	73,6
	Nr. 2	131,0	71,1
	Nr. 3	131,0	72,6
	Nr. 4	131,0	78,5
	Nr. 5	131,0	76,0
50% Zug	Nr. 1	87,3	103,0
	Nr. 2	87,3	101,8
	Nr. 3	87,3	101,1
	Nr. 4	87,3	100,6
	Nr. 5	87,3	95,2
25 % Zug	Nr. 1	43,7	115,3
	Nr. 2	43,7	114,3
	Nr. 3	43,7	114,8
	Nr. 4	43,7	115,3
	Nr. 5	43,7	112,8
0% Zug	Nr. 1	0,0	122,6
	Nr. 2	0,0	125,1
	Nr. 3	0,0	124,1
	Nr. 4	0,0	126,0
	Nr. 5	0,0	122,6

* reine Zugtragfähigkeit des Gewindes: Mittelwert von 5 Zugversuchen an Stangen mit Gewinde

** reine Zugtragfähigkeit des Schafts: Mittelwert von 5 Zugversuchen an Rundstahlstangen

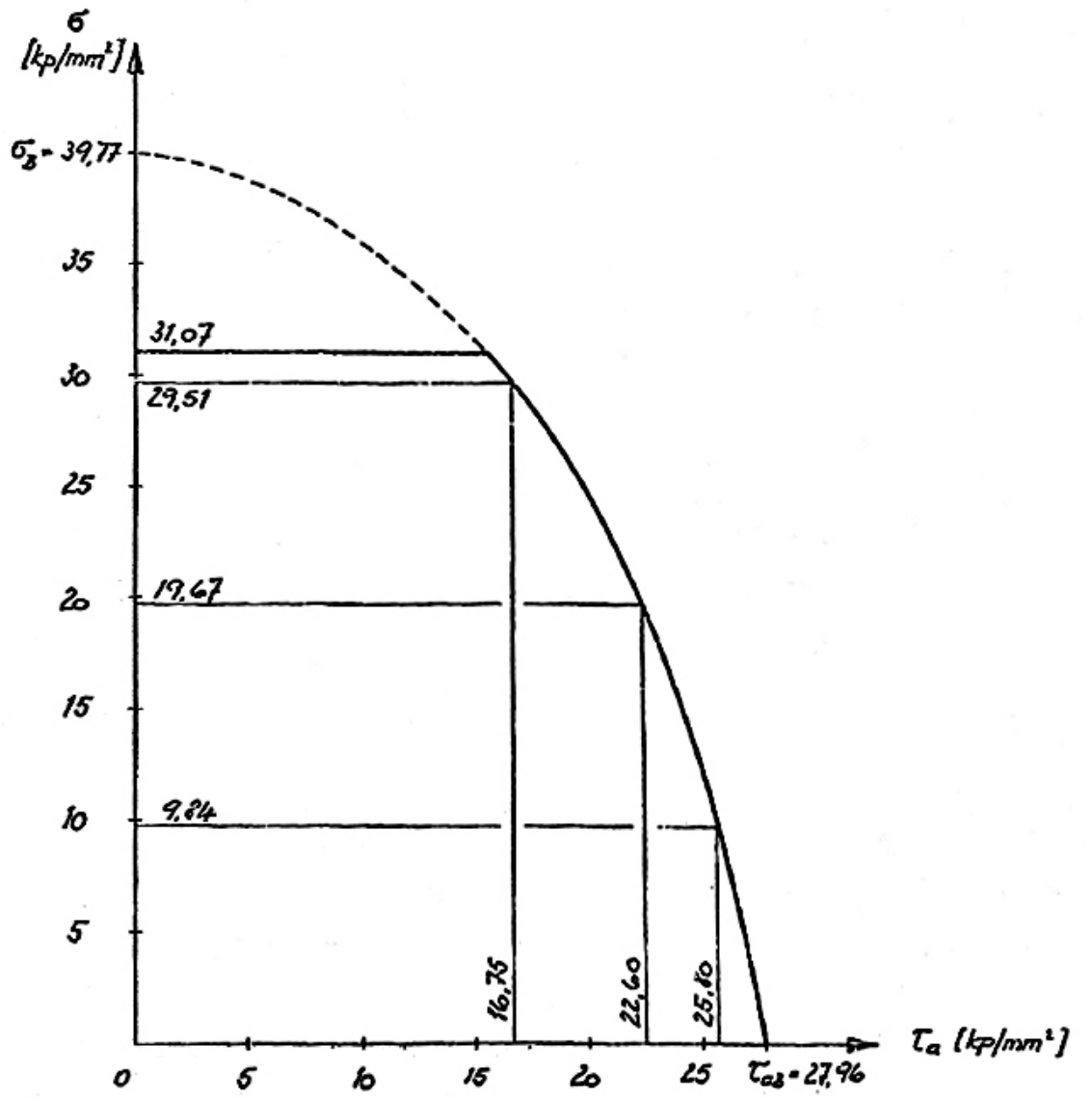


Abbildung A.5.: Ergebnisdiagramm Hassler, Zugspannungen und Scherspannungen in $kiloponds/mm^2 \hat{=} 9{,}81\ N/mm^2$, bezogen auf den Schaftquerschnitt, idealisierte Kurve durch Mittelwerte der Versuchsserie

Shakir-Khalil und Ho (1979), Versuche an Schrauben

Tabelle A.4.: Einzelergebnisse Shakir-Khalil und Ho (1979), Gesamttraglast in kN

		Gewinde in der Scherfuge		Schaft in der Scherfuge		
		$Serie\bar{A}$	$Serie\bar{B}$	$SerieA$	$SerieB$	$Serie\bar{C}$
Größe:		M 20	M 20	M 20	M 20	M 20
Festigkeit:		4.6	4.6	4.6	4.6	4.6
N_{max}*		133,7	118,8	133,7	118,8	122
$N_{max,Schaft}$**				171,4	152,4	156,4
0°	Nr. 1			133,0	120	125,5
	Nr. 2			131,0	119	118,5
	Nr. 3			137,0	118	
15°	Nr. 1	112,5	113,5	134,5	127	126,5
	Nr. 2	119,0	113,5	135,5	129	128,0
	Nr. 3	116,0	112,5	137,0	128	
30°	Nr. 1	104,5	103,5	120,0	122	117,5
	Nr. 2	104,0	105,5	123,5	119	118,5
	Nr. 3			123,5		
45°	Nr. 1			112,5	108	
	Nr. 2			113,5	108	
	Nr. 3			110,5		
60°	Nr. 1			103,0	101	
	Nr. 2			104,5	104	
	Nr. 3			103,0		
75°	Nr. 1			98,5	99	
	Nr. 2			99,0	103	
	Nr. 3			100,0		
90°	Nr. 1	85,0	77,0	99,0	105	94,5
	Nr. 2	88,5	76,5	101,5	103	96,0
	Nr. 3			100,0		

* reine Zugtragfähigkeit des Gewindes: Mittelwert der 0°-Versuche
** reine Zugtragfähigkeit des Schafts: N_{max} multipliziert mit A_{Schaft}/A_S

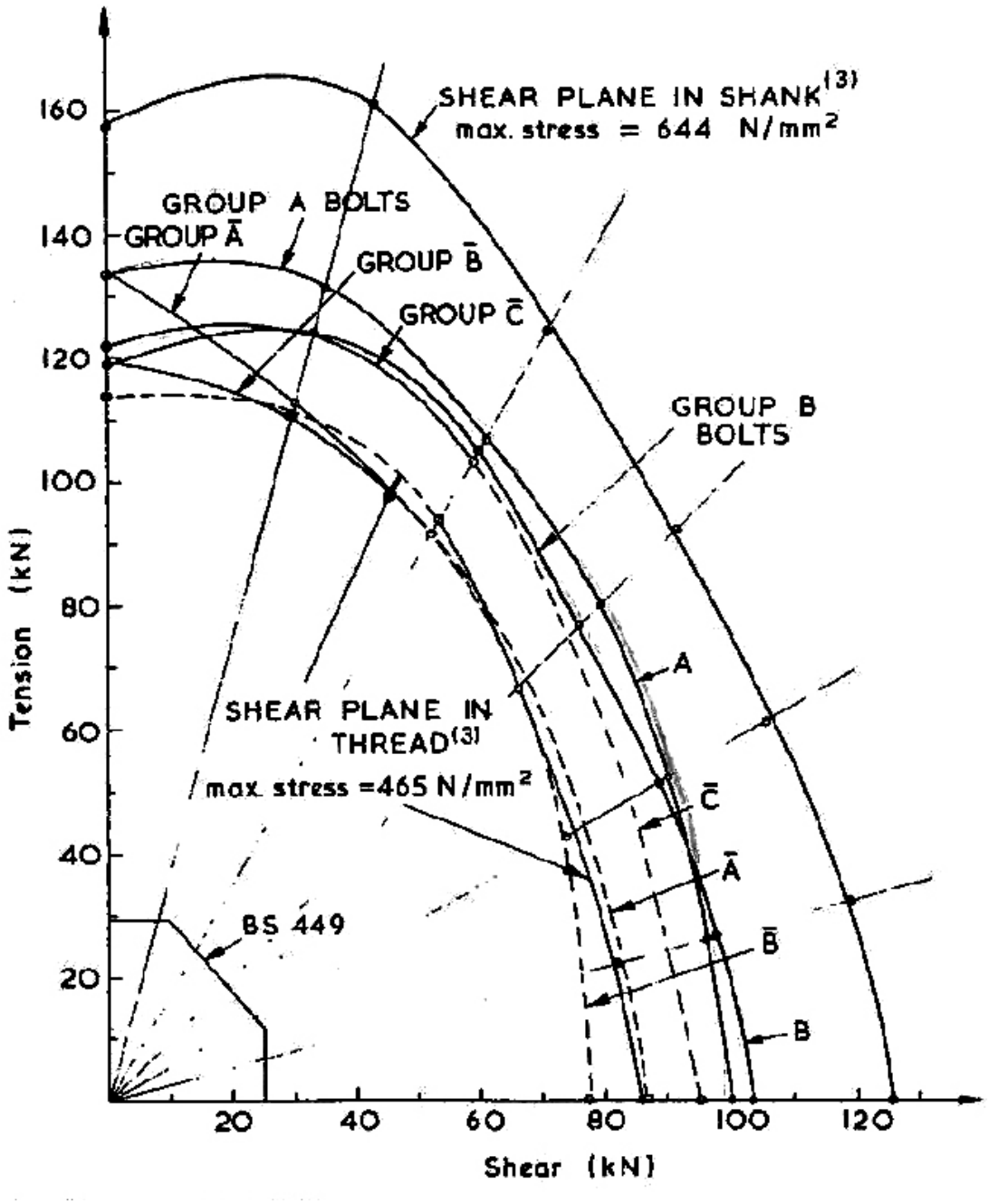


Abbildung A.6.: Ergebnisdiagramm Shakir-Khalil und Ho, Zug-Komponente und Scher-Komponente, idealisierte Kurven durch Mittelwerte der Versuchsserien, Vergleich mit damals gültiger Grenze des BS 449

Knobloch und Schmidt (1987)

Tabelle A.5.: Einzelergebnisse Knobloch & Schmidt (1987), Zug (N), Scherkraft (V) in kN

		Gewinde in der Scherfuge							
Größe:		M 16		M 24		M 16		M 24	
Festigkeit:		5.6		5.6		10.9		10.9	
N_{max}*		113,9		151,7		116		329,9	
		N	V	N	V	N	V	N	V
90 % Zug	Nr. 1	101,2	32,4	136,1	41,4	103,0	29,9	297,0	111,4
	Nr. 2	100,5	39,5	137,2	39,8	102,4	28,8	291,5	76,8
	Nr. 3	100,5	41,2			102,5	34,6	299,0	82,1
70 % Zug	Nr. 1	80,3	50,9	122,0	58,0	82,3	49,8	226,7	156,5
	Nr. 2	79,6	57,4	122,9	56,4	80,5	47,2	230,7	134,7
	Nr. 3			123,7	59,0	80,9	47,9	231,8	146,3
40 % Zug†	Nr. 1	49,1	64,5	*83,2*	*77,6*	44,5	56,7	131,1	194,2
	Nr. 2	45,3	65,1	*84,2*	*81,8*	44,3	63,2	130,0	176,8
	Nr. 3	52,7	63,9	*84,2*	*76,0*	46,3	62,3	132,2	181,4
0 % Zug	Nr. 1	0,0	72,2	0,0	92,5	0,0	70,6	0,0	204,5
	Nr. 2	0,0	73,3	0,0	92,8	0,0	70,4	0,0	212,8
	Nr. 3	0,0	74,0	0,0	94,1	0,0	69,4	0,0	209,8
		Gewinde in der Scherfuge							
Größe:		Ø 20 mm		Ø 20 mm		Ø 20 mm		Ø 20 mm	
Festigkeit:		St 37		St 52		C 45		42 CrMo 4	
$N_{max,Schaft}$**		116,8		166,3		216,3		289,9	
		N	V	N	V	N	V	N	V
70 % Zug‡	Nr. 1	79,0	60,3	*96,4*	*85,4*	152,5	122,8	203,4	117,3
	Nr. 2	82,7	61,4	*97,8*	*92,7*	150,3	120,1	191,9	150,6
	Nr. 3	78,2	58,9	*105,6*	*84,3*	152,4	118,5	201,9	137,3
50 % Zug	Nr. 1	59,0	67,6	84,4	98,0	108,9	134,1	154,3	154,6
	Nr. 2	59,7	67,7	83,5	99,6	109,0	136,4	144,7	158,7
	Nr. 3	59,1	68,1	78,8	97,3	107,8	137,1	145,4	160,1
30 % Zug	Nr. 1	34,8	75,4	49,1	101,8	66,6	131,8	86,9	187,2
	Nr. 2	34,4	75,4	49,8	101,4	65,2	129,8	85,9	184,2
	Nr. 3	34,6	73,9			64,1	138,7		
0 % Zug	Nr. 1	0,0	79,7	0,0	112,2	0,0	145,0	0,0	185,6
	Nr. 2	0,0	83,4	0,0	111,3	0,0	142,1	0,0	179,4
	Nr. 3	0,0	82,2	0,0	111,7	0,0	139,1	0,0	184,8

* reine Zugtragfähigkeit des Gewindes: Mittelwert von 5 Zugproben-Versuchen, umgerechnet auf A_S, ** reine Zugtragfähigkeit des Schafts: Mittelwert von 3 Zugproben-Versuchen, umgerechnet auf A_{Schaft}, † kursiv: 55 % Zug, ‡ kursiv: 60 % Zug

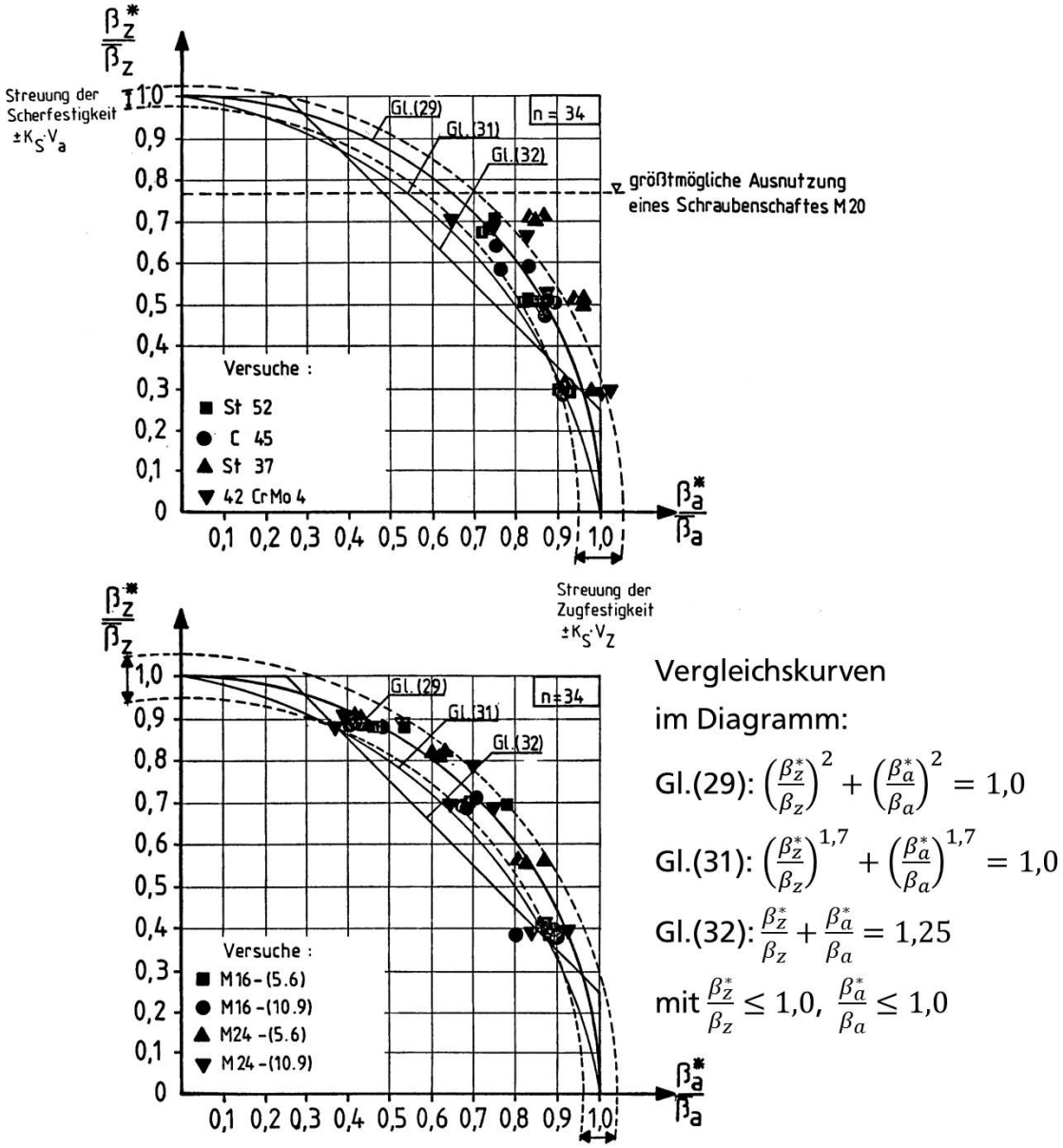


Abbildung A.7.: Ergebnisdiagramm Knobloch und Schmidt, oben: Schaft, unten: Gewinde in der Scherfuge, Zug-Komponente bezogen auf die Zugtragfähigkeit (ermittelt an Zubproben) und Scher-Komponente bezogen auf die Schertragfähigkeit (ermittelt im reinen Scherversuch) des Querschnitts, Vergleich mit quadratischer Kurve und aus Streuung der reinen Zug- und Scherfestigkeit abgeschätzem Streuband (Bezeichnungen im oberen Diagramm vertauscht) sowie zwei anderen Gleichungsvorschlägen

B. Versuchsaufbau

Die folgenden Seiten zeigen maßstäbliche Zeichnungen der verwendeten Versuchsaufbauten: Konstruktionen K1 – K3 (Abbildungen B.2 – B.5) für einschnittige Versuche unter verschiedenen Winkeln zur Schraubenlängsachse, Konstruktion K4 (Abbildung B.7) für Abscherversuche, zweischnittig.

Die Versuchsaufbauten K1 bis K3 bestehen jeweils aus zwei identischen Teilen, die durch die zu testende Schraube miteinander verbunden werden. Die Platten der beiden Teile sind verschweißt.

Für den Versuchsaufbau K4 werden zwei Platten mit Doppellaschen verbunden, auf einer Seite mit der zu testenden Schraube, auf der anderen Seite mit zwei Schrauben, so dass der Aufbau nach Versagen auseinander genommen werden kann.

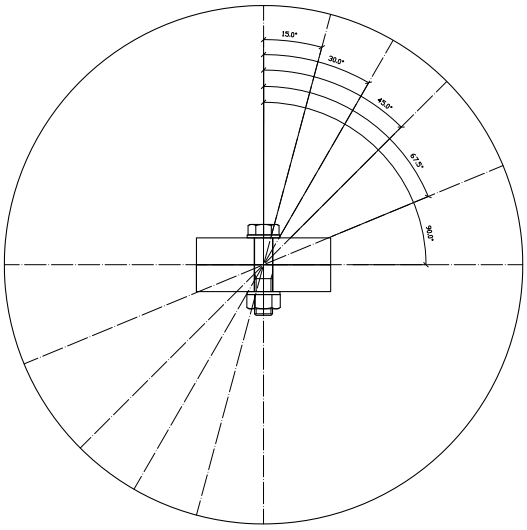
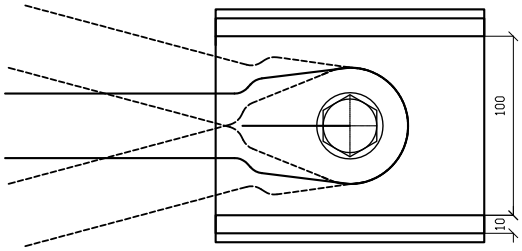


Abbildung B.1.: Übersicht über die getesteten Winkel

Randbedingungen:
- Material: Stahl, Festigkeit S 355
- Lochdurchmesser: 21 mm
- Kopfplattendicken in K1 – K3: 40 mm, Seiten- und Klemmplatten: 10 mm
- Dicke der mittleren Platten in K4: 30 mm, Laschen und Futterbleche: 15 mm

Draufsicht (mit Drehmomentschlüssel)



Ansicht

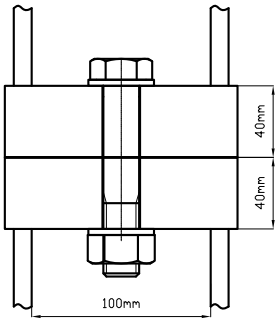


Abbildung B.2.: Draufsicht und Ansicht der Konstruktionen zum Testen von Schrauben unter unterschiedlichen Winkeln zur Schraubenlängsachse

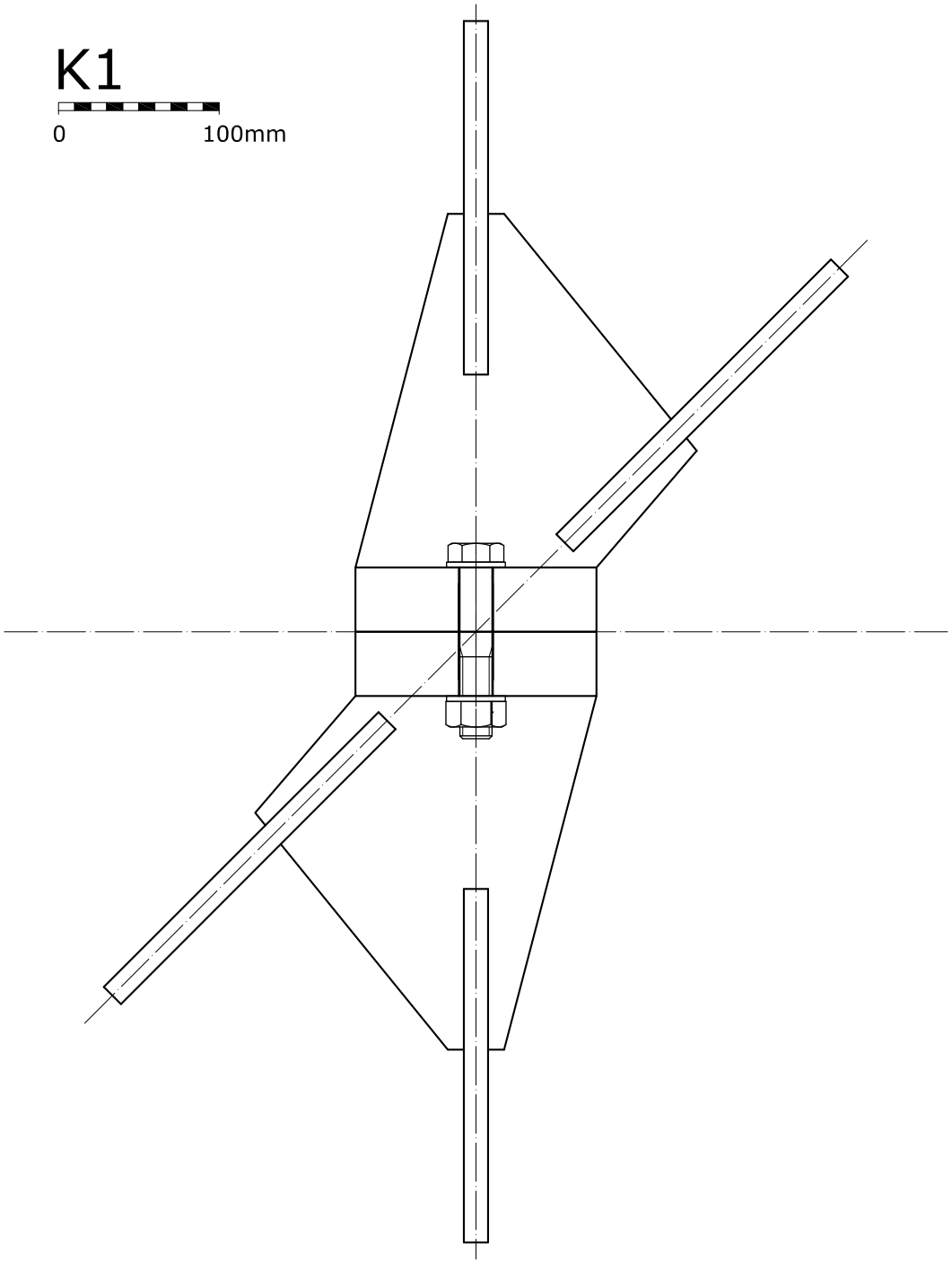


Abbildung B.3.: Versuchskonstruktion für Winkel 0° und 45°

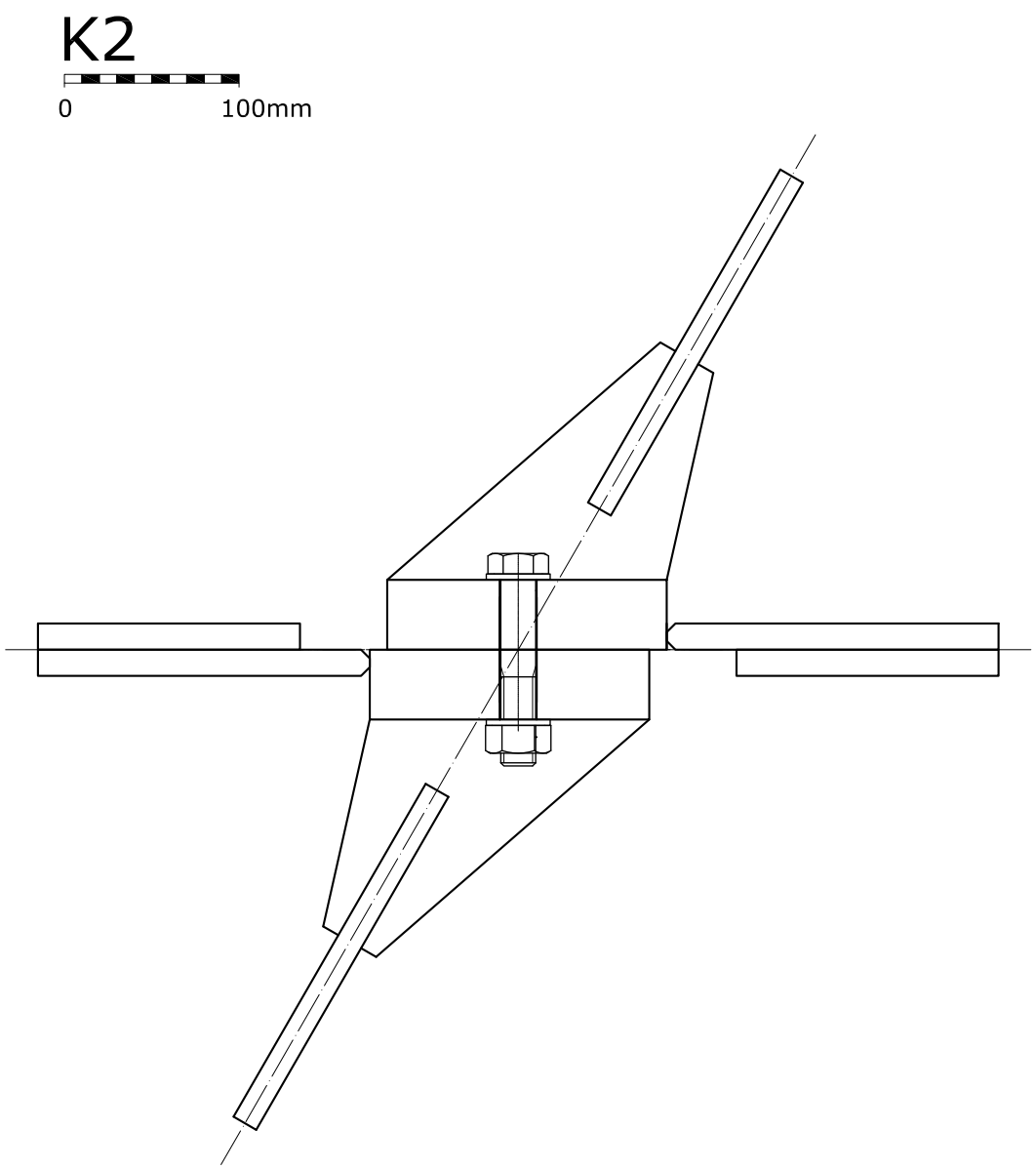


Abbildung B.4.: Versuchskonstruktion für Winkel 30° und 90°

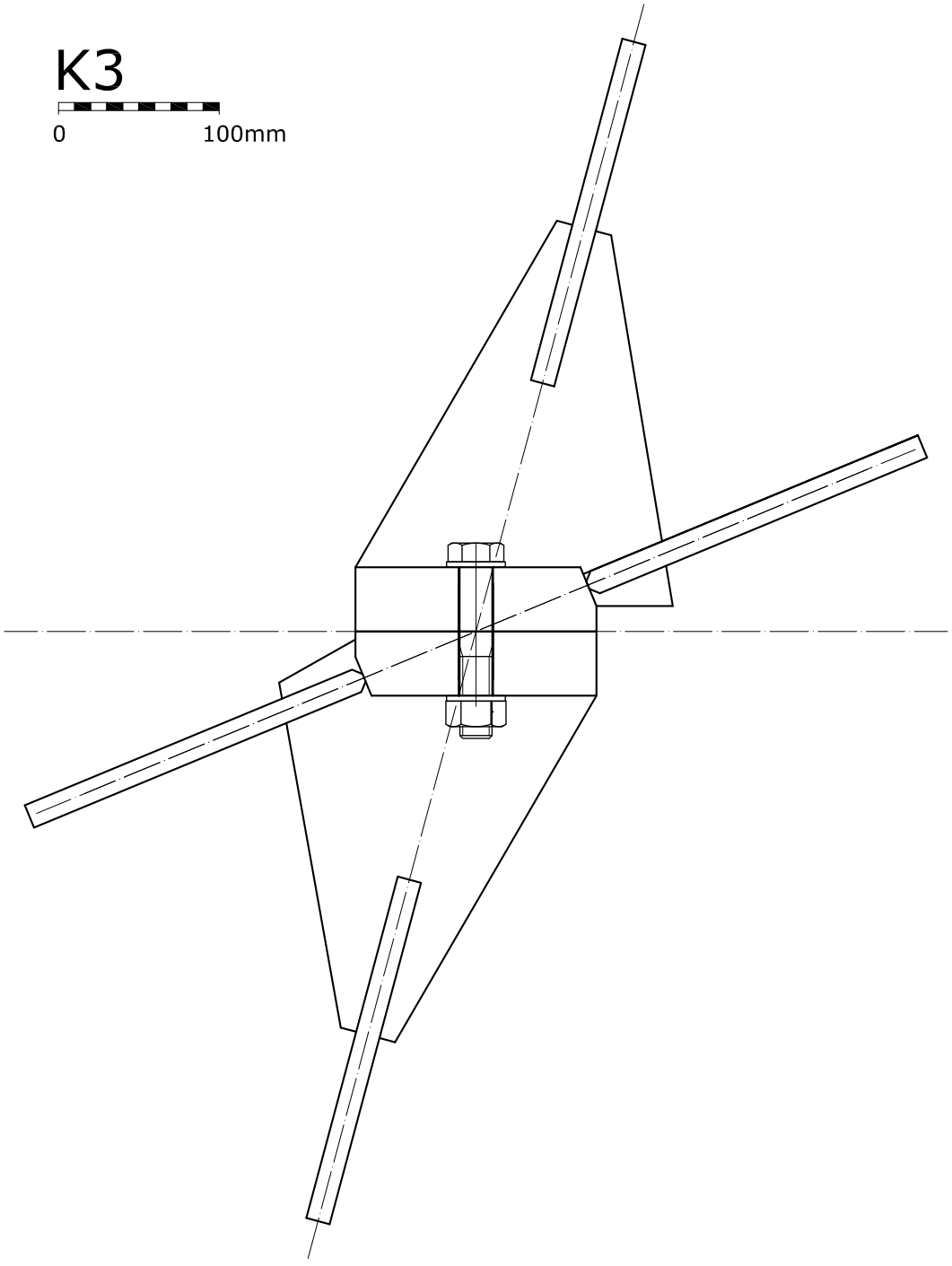


Abbildung B.5.: Versuchskonstruktion für Winkel 15° und 67,5°

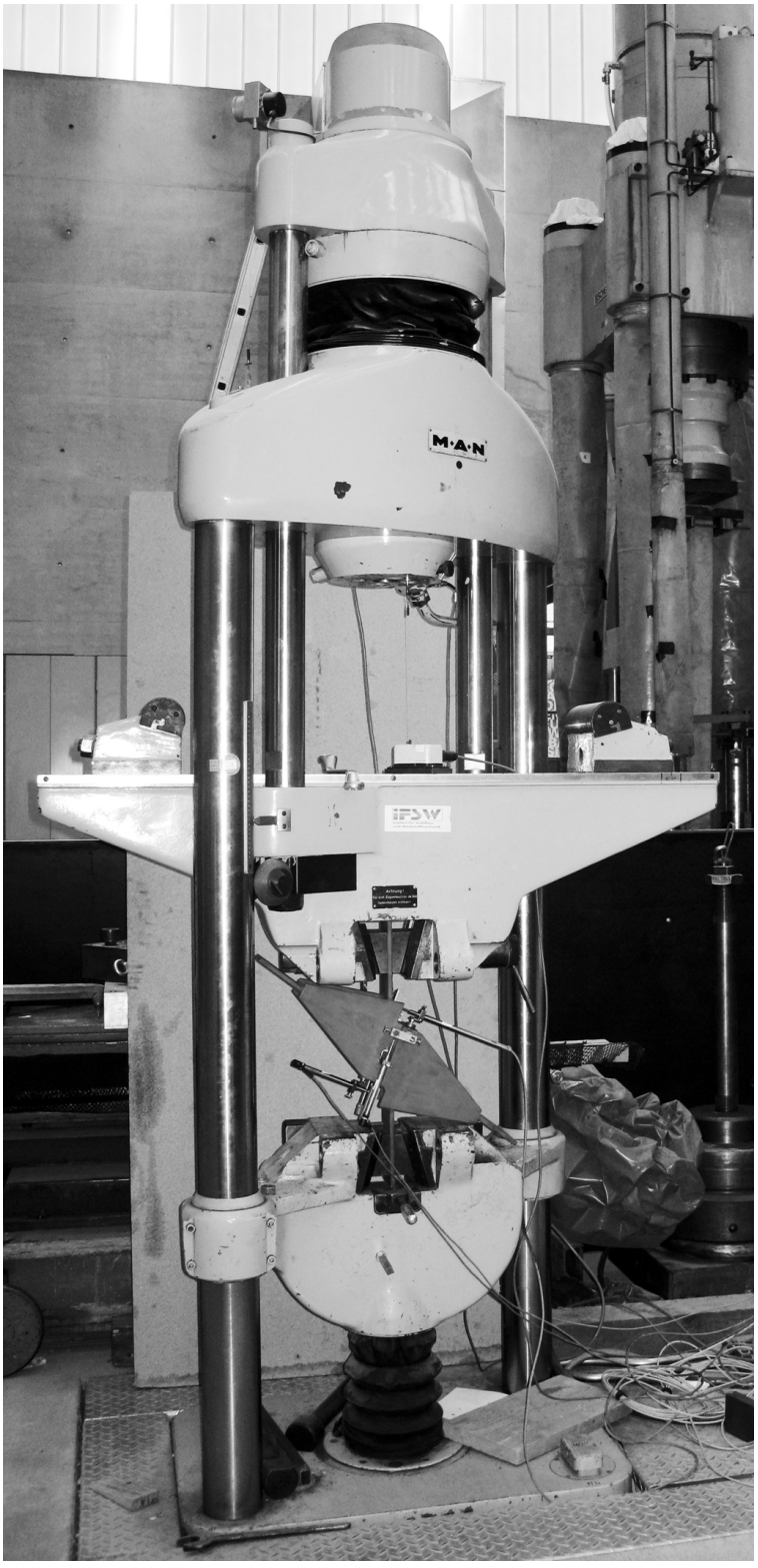


Abbildung B.6.: Versuchskonstruktion eingespannt in Zugprüfmaschine (Lastwinkel 67,5°)

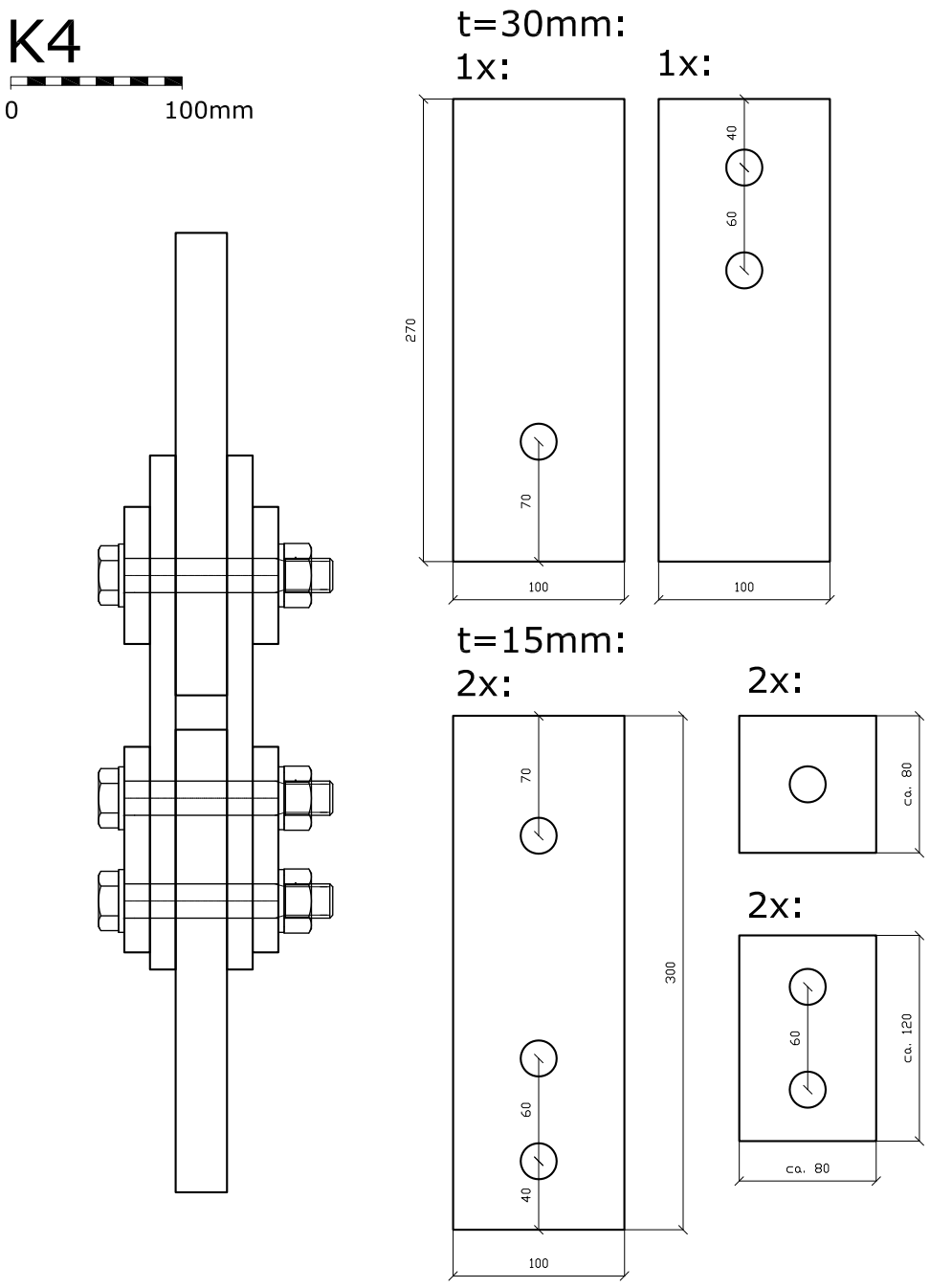


Abbildung B.7.: Versuchskonstruktion für zweischnittiges Abscheren

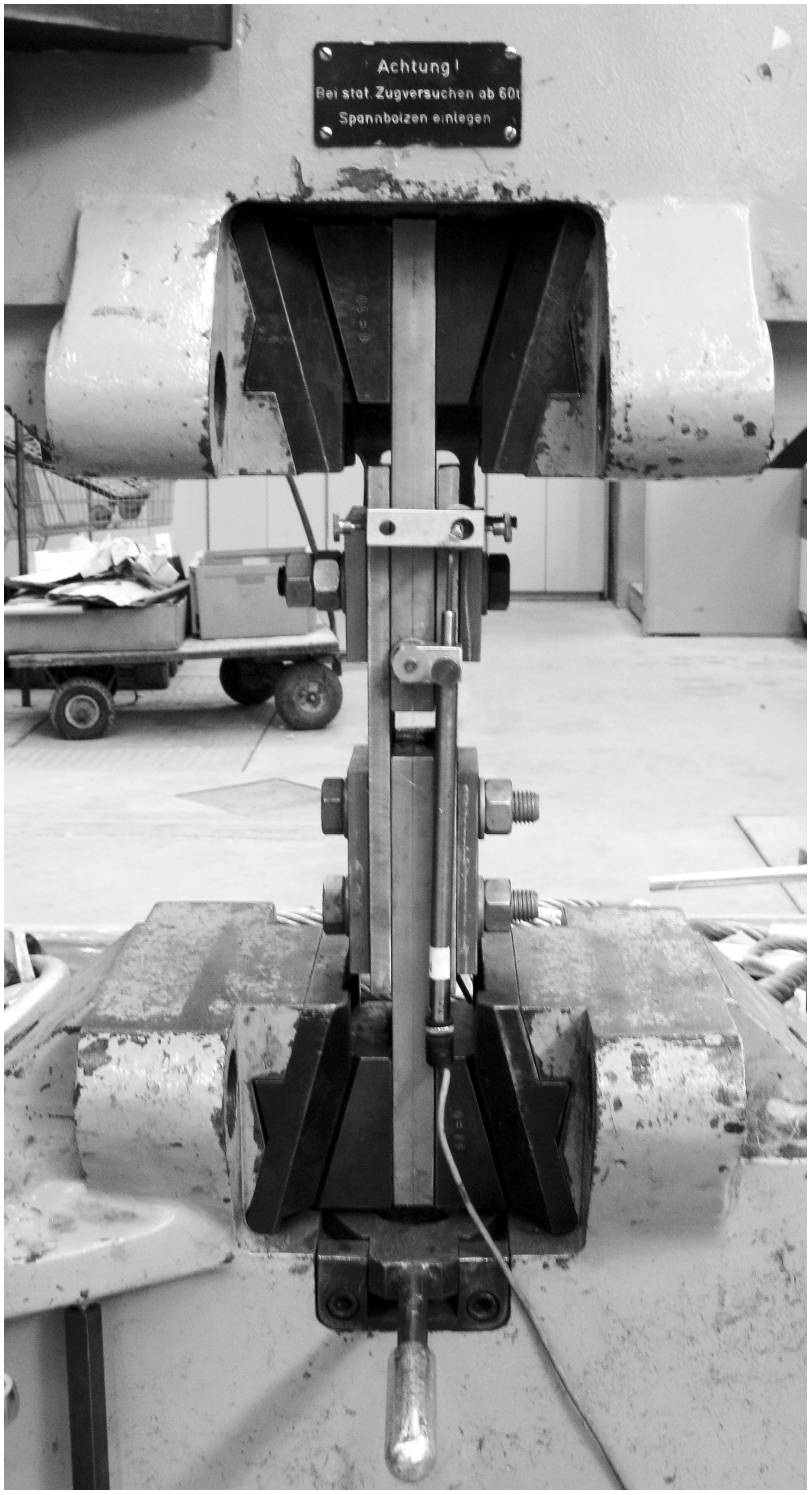


Abbildung B.8.: Versuchskonstruktion für zweischnittiges Abscheren, eingespannt in Zugprüfmaschine

C. Ergebnisse der Versuche an Schrauben

Tabelle C.1.: Einzelergebnisse Gewinde in Scherfuge, Festigkeit 4.6, in KN

		Versagens-last $\mathbf{F_{ges}}$	Mittelwert $\bar{x}$	Variations-Koeffizient $\frac{s}{\bar{x}}$	Zug-anteil N	Scher-anteil V
0°	Nr. 1	**107,4**	106,0	1,25%	107,4	0,0
	Nr. 2	**106,0**			106,0	0,0
	Nr. 4	**104,2**			104,2	0,0
	Nr. 5	**106,3**			106,3	0,0
15°	Nr. 1	**107,8**	108,4	0,51%	104,1	27,9
	Nr. 2	**108,8**			105,1	28,2
	Nr. 3	**108,7**			105,0	28,1
30°	Nr. 1	**100,1**	99,6	3,04%	86,7	50,1
	Nr. 2	**96,4**			83,5	48,2
	Nr. 3	**102,4**			88,7	51,2
45°	Nr. 1	**92,6**	91,2	1,60%	65,5	65,5
	Nr. 2	**91,4**			64,6	64,6
	Nr. 3	**89,7**			63,4	63,4
67, 5°	Nr. 1	**82,2**	81,0	3,76%	31,5	75,9
	Nr. 2	**83,2**			31,8	76,9
	Nr. 3	**77,5**			29,7	71,6
90°	Nr. 1	**84,6**	80,0	4,62%	0,0	84,6
	Nr. 2	**77,3**			0,0	77,3
	Nr. 3	**81,3**			0,0	81,3
	Nr. 4	**76,7**			0,0	76,7
90° 2-schnittig	Nr. 1	**149,7**	150,9	1,51%	0,0	74,9
	Nr. 2	**148,6**			0,0	74,3
	Nr. 3	**153,8**			0,0	76,9
	Nr. 4	**151,5**			0,0	75,8

Tabelle C.2.: Einzelergebnisse Gewinde in Scherfuge, Festigkeit 8.8 und 10.9, in KN

		8.8					10.9				
		Bruch-last F_{ges}	Mittel $\bar{x}$	Variations-Koeffizient $\frac{s}{\bar{x}}$	Zug-anteil N	Scher-anteil V	**Bruch-last F_{ges}**	Mittel $\bar{x}$	Variations-Koeffizient $\frac{s}{\bar{x}}$	Zug-anteil N	Scher-anteil V
0°	Nr. 1	**230,5**	228,7	0,79%	230,5	0,0	**264,4**	269,1	1,55%	264,4	0,0
	Nr. 2	**226,9**			226,9	0,0	**270,7**			270,7	0,0
	Nr. 3	**228,6**			228,6	0,0	**272,3**			272,3	0,0
15°	Nr. 1	**216,4**	216,8	1,00%	209,0	56,0	**247,6**	248,6	1,32%	239,2	64,1
	Nr. 2	**214,8**			207,5	55,6	**252,3**			243,7	65,3
	Nr. 3	**219,1**			211,6	56,7	**246,0**			237,6	63,7
30°	Nr. 1	**194,5**	191,3	1,52%	168,4	97,3	**223,2**	220,7	1,01%	193,3	111,6
	Nr. 2	**190,4**			164,9	95,2	**218,9**			189,6	109,5
	Nr. 3	**188,9**			163,6	94,5	**220,0**			190,5	110,0
45°	Nr. 1	**168,7**	167,5	0,63%	119,3	119,3	**194,3**	194,6	0,53%	137,4	137,4
	Nr. 2	**166,7**			117,9	117,9	**195,7**			138,4	138,4
	Nr. 3	**167,1**			118,2	118,2	**193,7**			137,0	137,0
67, 5°	Nr. 1	**152,5**	149,4	1,93%	58,4	140,9	**173,6**	173,1	2,01%	66,4	160,4
	Nr. 2	**146,8**			56,2	135,6	**176,3**			67,5	162,9
	Nr. 3	**148,9**			57,0	137,6	**169,4**			64,8	156,5
90°	Nr. 1	**151,9**	154,7	3,73%	0,0	151,9	**176,0**	176,7	4,37%	0,0	176,0
	Nr. 2	**161,3**			0,0	161,3	**184,7**			0,0	184,7
	Nr. 3	**150,8**			0,0	150,8	**169,3**			0,0	169,3
90° 2-schnittig	Nr. 1		281,0	0,49%			**343,9**	322,1	4,35%	0,0	172,0
	Nr. 2	**280,7**			0,0	140,4	**327,4**			0,0	163,7
	Nr. 3	**279,8**			0,0	139,9	**324,9**			0,0	162,5
	Nr. 4	**282,5**			0,0	141,3	**307,7**			0,0	153,9
	Nr. 5						**305,9**			0,0	152,9
	Nr. 6						**322,6**			0,0	161,3

Tabelle C.3.: Einzelergebnisse Schaft in Scherfuge, Festigkeit 4.6 Serie 1 und 2, in KN

		4.6, Serie 1					4.6, Serie 2				
		Bruch-last F_{ges}	Mittel $\bar{x}$	Variations-Koeffizient $\frac{s}{\bar{x}}$	Zug-anteil N	Scher-anteil V	**Bruch-last F_{ges}**	Mittel $\bar{x}$	Variations-Koeffizient $\frac{s}{\bar{x}}$	Zug-anteil N	Scher-anteil V
0°	Nr. 1	**144,1**	142,9	0,81%	144,1	0,0	**124,4**	125,6	1,06%	124,4	0,0
	Nr. 2	**142,7**			142,7	0,0	**124,9**			124,9	0,0
	Nr. 3	**141,8**			141,8	0,0	**124,6**			124,6	0,0
	Nr. 4						**127,0**			127,0	0,0
	Nr. 5						**127,1**			127,1	0,0
15°	Nr. 1	**139,2**	140,3	0,67%	134,5	36,0	**137,5**	136,5	1,38%	132,8	35,6
	Nr. 2	**140,6**			135,8	36,4	**134,3**			129,7	34,8
	Nr. 3	**141,0**			136,2	36,5	**137,6**			132,9	35,6
30°	Nr. 1	**126,7**	127,1	0,94%	109,7	63,4	**143,0**	140,9	1,49%	123,8	71,5
	Nr. 2	**126,1**			109,2	63,1	**138,8**			120,2	69,4
	Nr. 3	**128,4**			111,2	64,2	**140,9**			122,0	70,5
45°	Nr. 1	**115,3**	115,3	0,87%	81,5	81,5	**128,7**	126,3	1,63%	91,0	91,0
	Nr. 2	**114,3**			80,8	80,8	**125,4**			88,7	88,7
	Nr. 3	**116,3**			82,2	82,2	**124,9**			88,3	88,3
67, 5°	Nr. 1	**105,3**	106,4	1,74%	40,3	97,3	**117,4**	115,6	2,53%	44,9	108,5
	Nr. 2	**105,3**			40,3	97,3	**117,1**			44,8	108,2
	Nr. 3	**108,5**			41,5	100,2	**112,2**			42,9	103,7
90°	Nr. 1	**112,8**	112,1	1,79%	0,0	112,8	**120,2**	120,9	1,61%	0,0	120,2
	Nr. 2	**113,6**			0,0	113,6	**119,4**			0,0	119,4
	Nr. 3	**109,8**			0,0	109,8	**123,1**			0,0	123,1
90° 2-schnittig	Nr. 1	**200,4**	199,1	1,19%	0,0	100,2	**233,5**	230,7	1,34%	0,0	116,8
	Nr. 2	**200,6**			0,0	100,3	**227,4**			0,0	113,7
	Nr. 3	**196,4**			0,0	98,2	**231,2**			0,0	115,6

Tabelle C.4.: Einzelergebnisse Schaft in Scherfuge, Festigkeit 8.8 und 10.9, in KN

		8.8					10.9				
		Bruch-last F_{ges}	Mittel $\bar{x}$	Variations-Koeffizient $\frac{s}{\bar{x}}$	Zug-anteil N	Scher-anteil V	**Bruch-last F_{ges}**	Mittel $\bar{x}$	Variations-Koeffizient $\frac{s}{\bar{x}}$	Zug-anteil N	Scher-anteil V
0°	Nr. 1	**232,4**	231,5	1,05%	232,4	0,0	**275,3**	274,5	1,11%	275,3	0,0
	Nr. 2	**229,3**			229,3	0,0	**278,4**			278,4	0,0
	Nr. 3	**229,7**			229,7	0,0	**273,4**			273,4	0,0
	Nr. 4	**234,5**			234,5	0,0	**270,1**			270,1	0,0
	vorgespannt						***275,4***			*275,4*	*0,0*
15°	Nr. 1	**245,3**	242,8	0,94%	236,9	63,5	**291,0**	293,6	0,84%	281,1	75,3
	Nr. 2	**240,9**			232,7	62,3	**295,9**			285,8	76,6
	Nr. 3	**242,1**			233,9	62,7	**293,8**			283,8	76,0
	vorgespannt						***292,2***			*282,2*	*75,6*
30°	Nr. 1	**235,7**	234,4	2,40%	204,1	117,9	**266,2**	264,5	2,32%	230,5	133,1
	Nr. 2	**239,2**			207,2	119,6	**257,7**			223,2	128,9
	Nr. 3	**228,2**			197,6	114,1	**269,6**			233,5	134,8
	vorgespannt						***267,4***			*231,5*	*133,7*
45°	Nr. 1	**202,0**	204,8	1,17%	142,8	142,8	**238,3**	237,2	1,61%	168,5	168,5
	Nr. 2	**206,0**			145,7	145,7	**232,9**			164,7	164,7
	Nr. 3	**206,3**			145,9	145,9	**240,3**			169,9	169,9
	vorgespannt						***235,7***			*166,6*	*166,6*
67,5°	Nr. 1	**182,1**	183,0	0,49%	69,7	168,2	**218,3**	218,1	1,93%	83,5	201,7
	Nr. 2	**183,0**			70,0	169,1	**213,8**			81,8	197,5
	Nr. 3	**183,9**			70,4	169,9	**222,2**			85,0	205,3
	vorgespannt 1						***216,6***			*82,9*	*200,1*
	vorgespannt 2						***217,4***			*83,2*	*200,9*
90°	Nr. 1	**194,8**	195,1	0,14%	0,0	194,8	**229,4**	230,4	2,23%	0,0	229,4
	Nr. 2	**195,2**			0,0	225,9	**195,2**			0,0	225,9
	Nr. 3	**195,3**			0,0	195,3	**236,0**			0,0	236,0
	vorgespannt						***235,7***			*0,0*	*235,7*
90° 2-schnittig	Nr. 1	**366,3**	366,8	0,43%	0,0	183,2	**429,3**	430,8	1,16%	0,0	214,7
	Nr. 2	**368,0**			0,0	184,0	**436,4**			0,0	218,2
	Nr. 3	**364,7**			0,0	182,4	**426,8**			0,0	213,4
	Nr. 4	**368,0**			0,0	184,0					

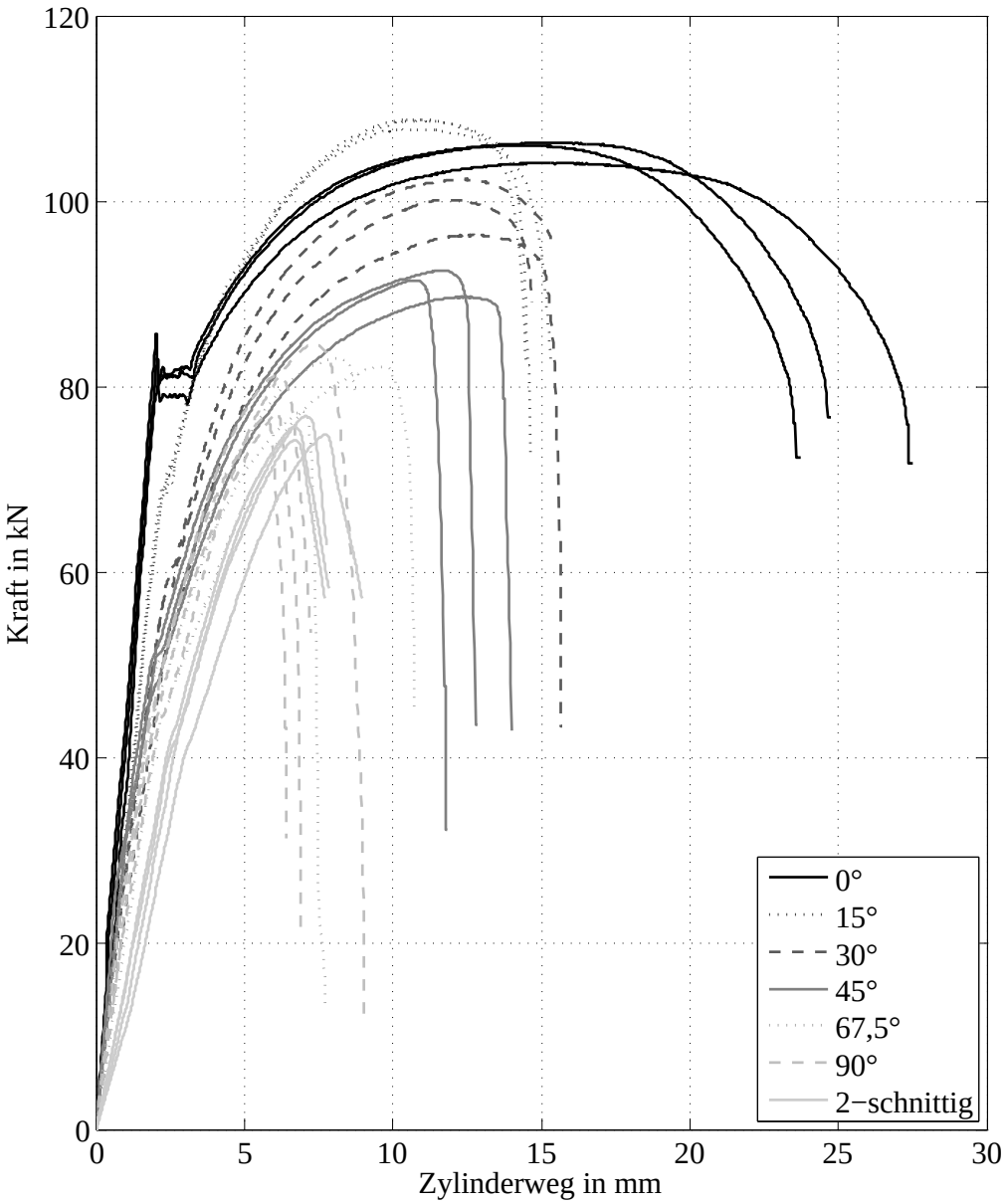


Abbildung C.1.: Maschinenkraft-Maschinenweg-Diagramme, Einzelversuche Gewinde in der Scherfuge, Festigkeit 4.6 (halbe Maschinenkraft für 2-schnittige Scherversuche)

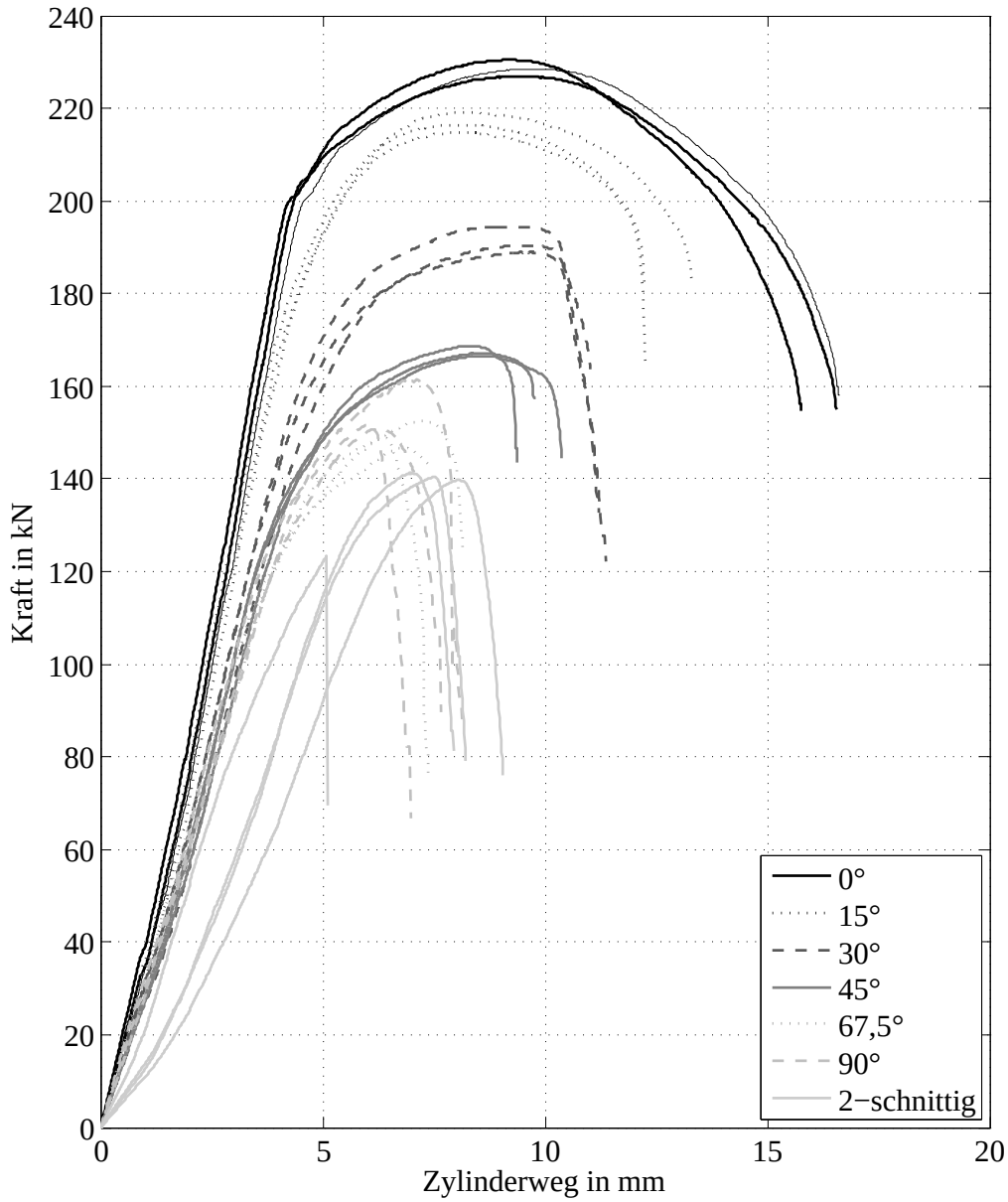


Abbildung C.2.: Maschinenkraft-Maschinenweg-Diagramme, Einzelversuche Gewinde in der Scherfuge, Festigkeit 8.8 (halbe Maschinenkraft für 2-schnittige Scherversuche)

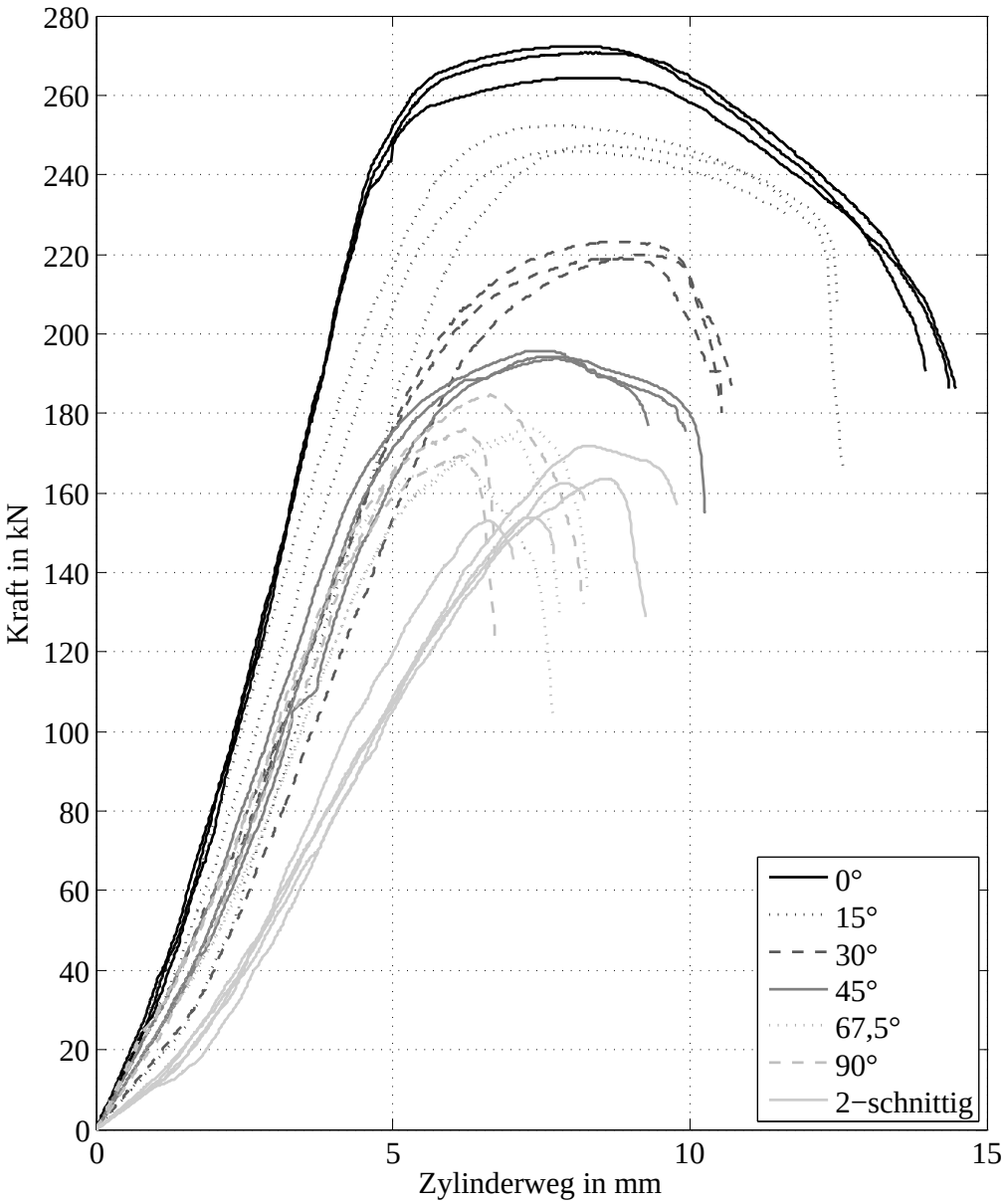


Abbildung C.3.: Maschinenkraft-Maschinenweg-Diagramme, Einzelversuche Gewinde in der Scherfuge, Festigkeit 10.9 (halbe Maschinenkraft für 2-schnittige Scherversuche)

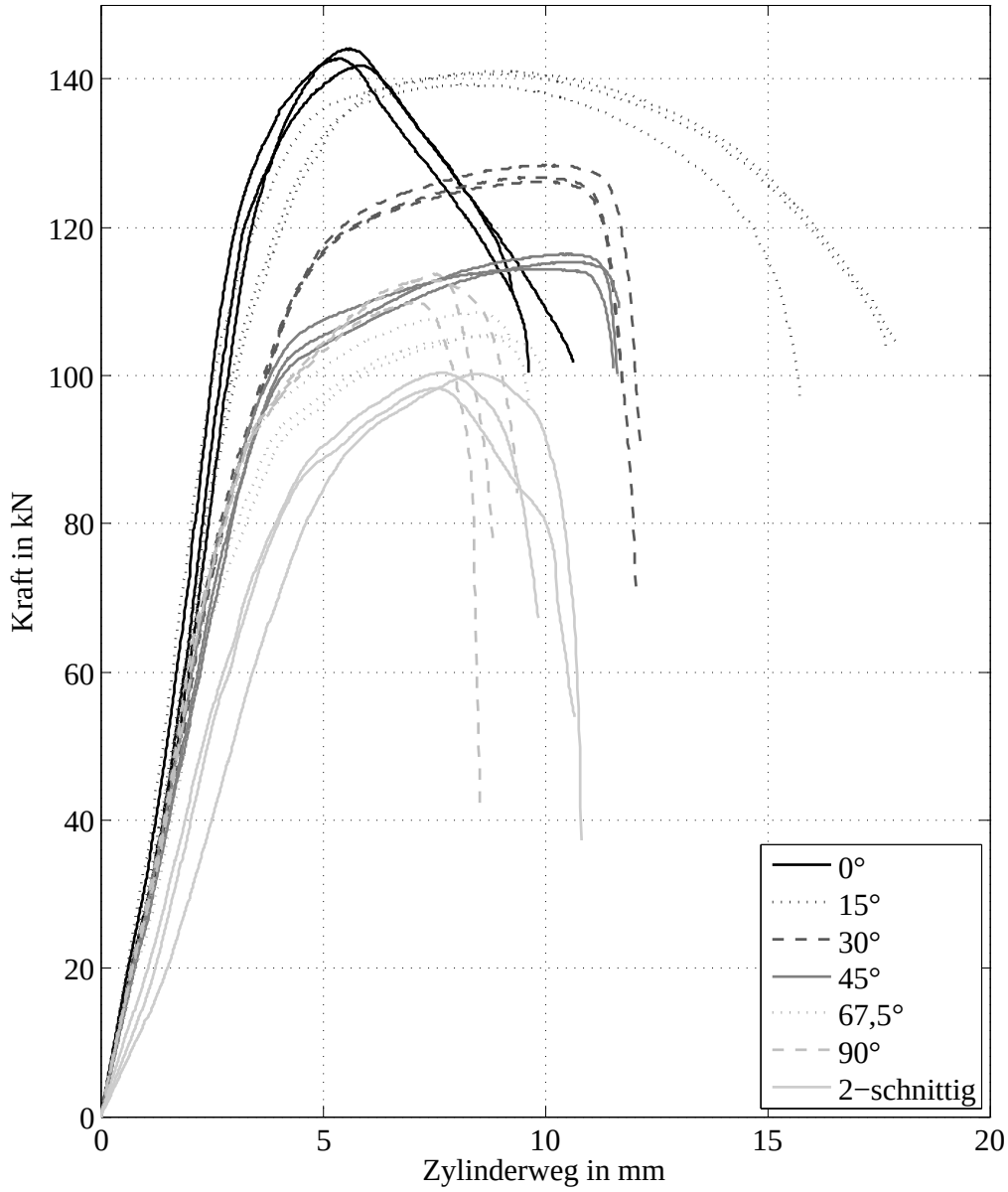


Abbildung C.4.: Maschinenkraft-Maschinenweg-Diagramme, Einzelversuche Schaft in der Scherfuge, Festigkeit 4.6, Serie 1 (halbe Maschinenkraft für 2-schnittige Scherversuche)

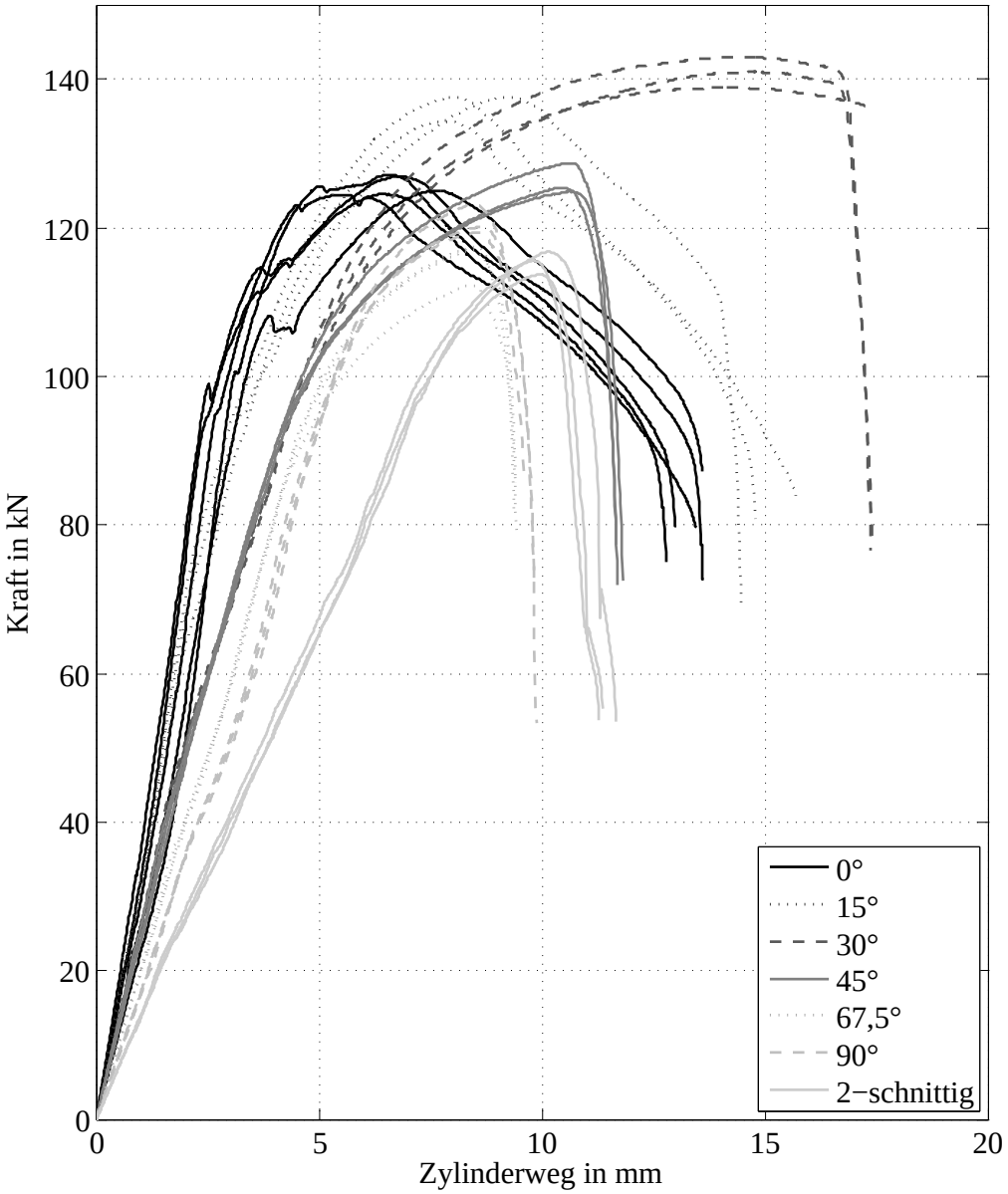


Abbildung C.5.: Maschinenkraft-Maschinenweg-Diagramme, Einzelversuche Schaft in der Scherfuge, Festigkeit 4.6, Serie 2 (halbe Maschinenkraft für 2-schnittige Scherversuche)

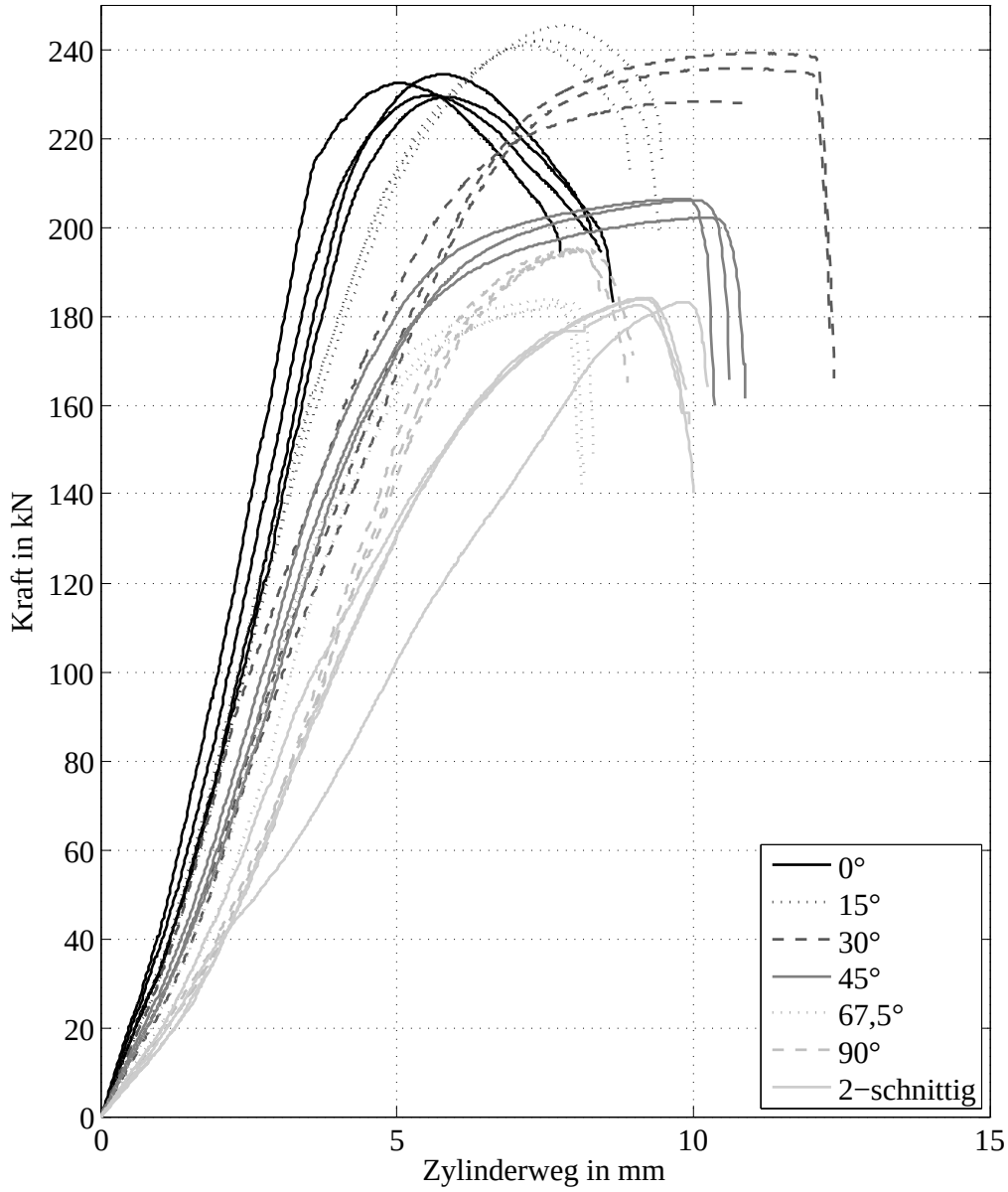


Abbildung C.6.: Maschinenkraft-Maschinenweg-Diagramme, Einzelversuche Schaft in der Scherfuge, Festigkeit 8.8 (halbe Maschinenkraft für 2-schnittige Scherversuche)

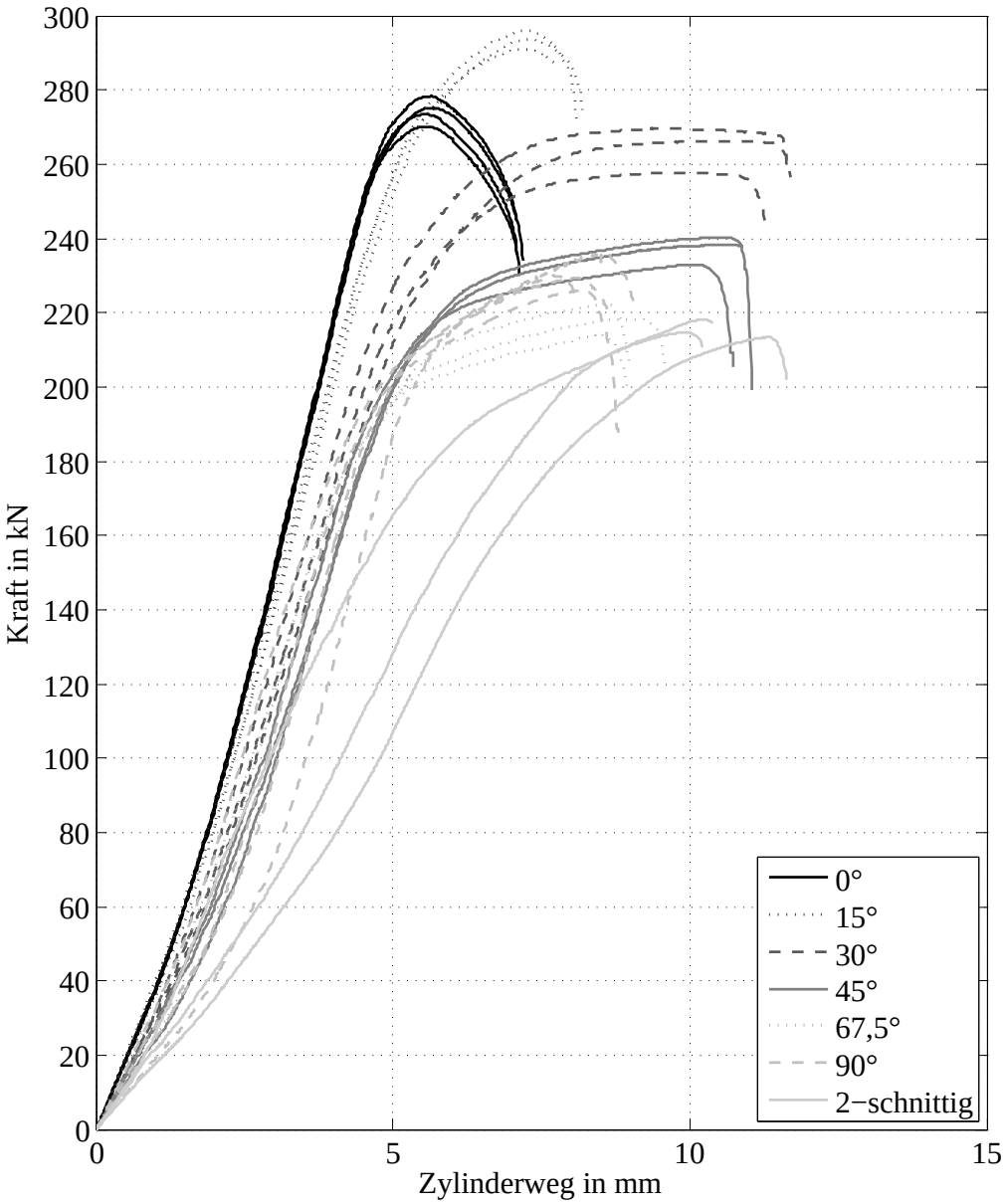


Abbildung C.7.: Maschinenkraft-Maschinenweg-Diagramme, Einzelversuche Schaft in der Scherfuge, Festigkeit 10.9 (halbe Maschinenkraft für 2-schnittige Scherversuche)

Abbildung C.8.: Schrauben nach Versuch, Gewinde in der Scherfuge, Festigkeit 4.6; von links nach rechts: Versuch unter 0°, 15°, 30°, 45°, 67,5°, 90°, 2-schnittiges Abscheren

Abbildung C.9.: Schrauben nach Versuch, Gewinde in der Scherfuge, Festigkeit 8.8

Abbildung C.10.: Schrauben nach Versuch, Gewinde in der Scherfuge, Festigkeit 10.9

Abbildung C.11.: Schrauben nach Versuch, Schaft in der Scherfuge, Festigkeit 4.6, Serie 1

Abbildung C.12.: Schrauben nach Versuch, Schaft in der Scherfuge, Festigkeit 4.6, Serie 2

Abbildung C.13.: Schrauben nach Versuch, Schaft in der Scherfuge, Festigkeit 8.8

Abbildung C.14.: Schrauben nach Versuch, Schaft in der Scherfuge, Festigkeit 10.9

D. Ergebnisse der Materialtests

Tabelle D.1.: Einzelergebnisse der Zugprobenversuche in N/mm^2

		Fließgrenze/ 2%-Dehngrenze $f_y/R_{p0,2}$	Bruch-festigkeit F_u	Mittelere Bruchfestigkeit $\bar{x}$	Variatons-Koefizient $\frac{s}{\bar{x}}$	Bruch-Dehnung ϵ_{Bruch}
4.6-1	Probe 1	406,5	486,8	482,2	1,52%	19,4%
	Probe 2	401,0	486,0			20,5%
	Probe 3	389,9	473,7			21,8%
4.6-2	Probe 1	345,8	501,5	502,2	2,30%	25,1%
	Probe 2	380,3	523,3			24,3%
	Probe 3	331,8	496,7			27,8%
	Probe 4	317,7	491,7			31,9%
	Probe 5	342,7	506,1			26,2%
	Probe 6	322,5	494,0			29,5%
8.8	Probe 1	605,4	813,3	820,1	1,50%	17,6%
	Probe 2	635,4	812,8			18,0%
	Probe 3	656,7	834,3			16,0%
10.9	Probe 1	1064,7	1122,4	1105,7	1,57%	14,8%
	Probe 2	1035,5	1087,7			14,9%
	Probe 3	1057,9	1107,0			16,1%

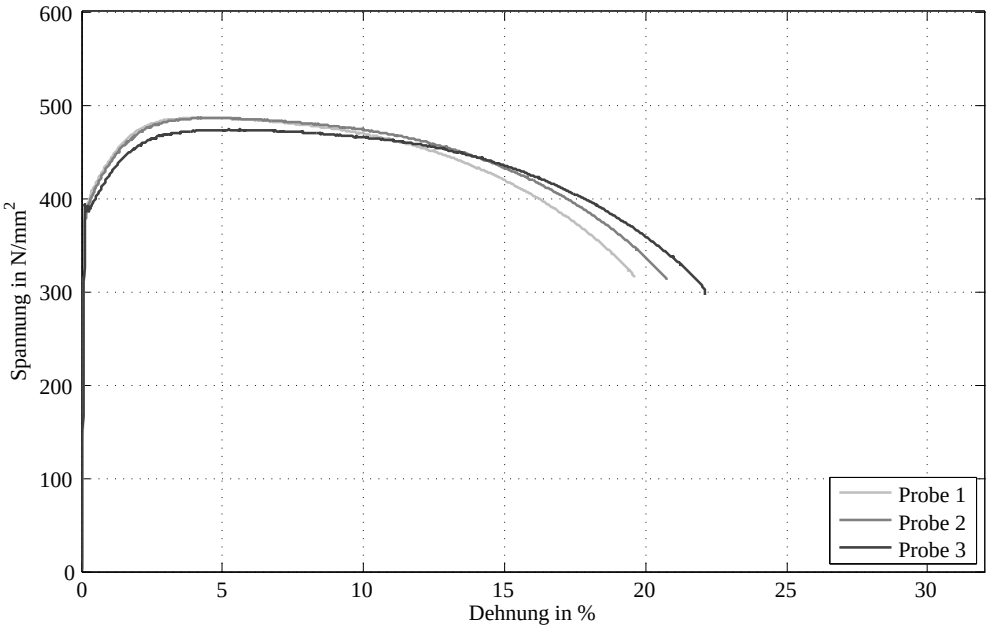


Abbildung D.1.: Spannungs-Dehnungsdiagramm, Zugproben aus Schrauben mit Schaft, Festigkeit 4.6, Serie 1

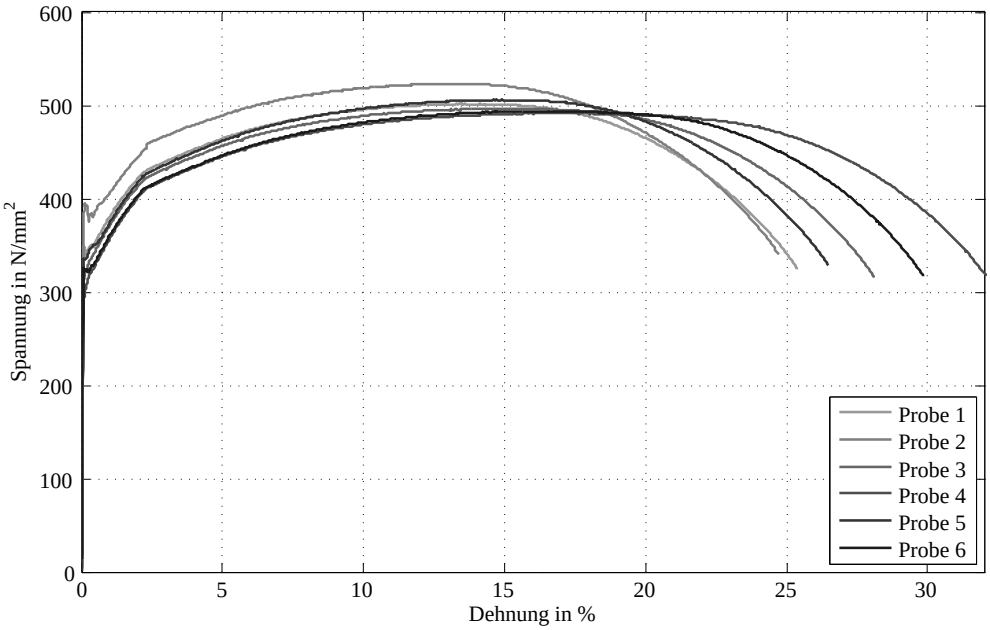


Abbildung D.2.: Spannungs-Dehnungsdiagramm, Zugproben aus Schrauben mit Schaft, Festigkeit 4.6, Serie 2

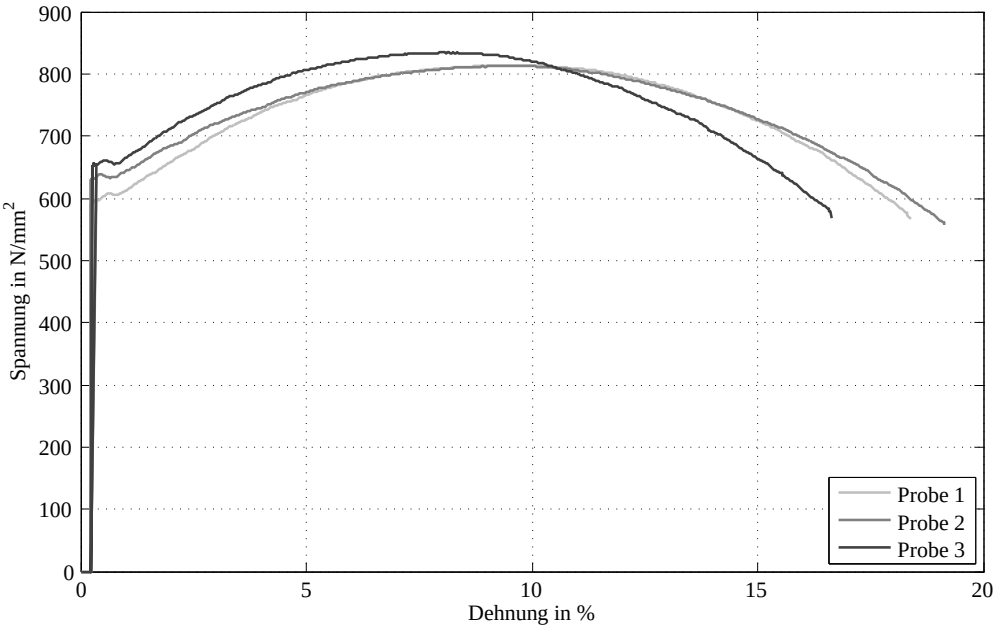


Abbildung D.3.: Spannungs-Dehnungsdiagramm, Zugproben aus Schrauben mit Schaft, Festigkeit 8.8

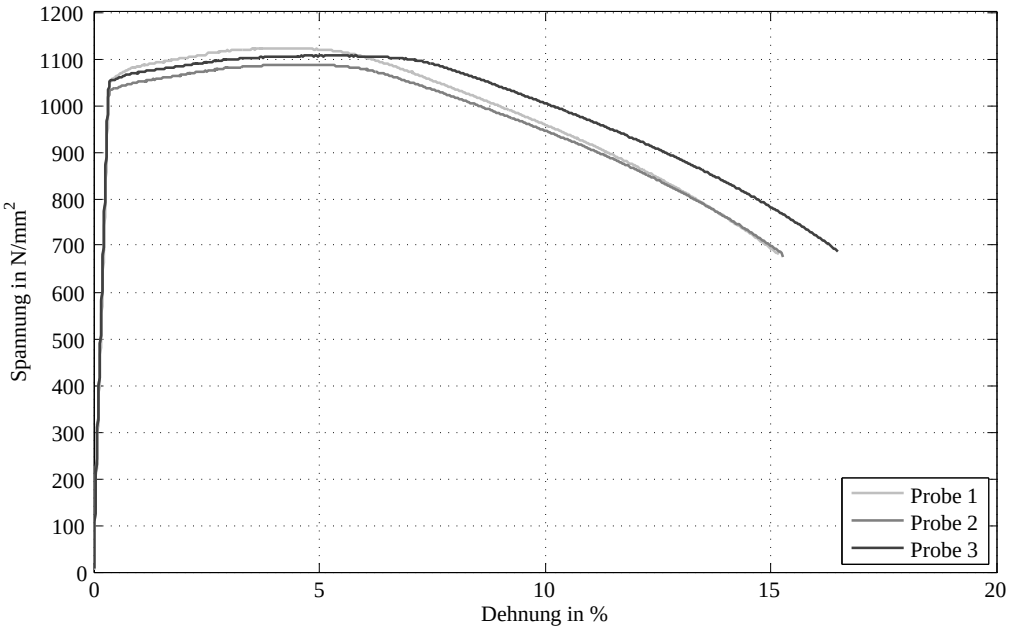


Abbildung D.4.: Spannungs-Dehnungsdiagramm, Zugproben aus Schrauben mit Schaft, Festigkeit 10.9

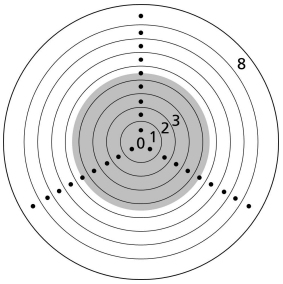


Abbildung D.5.: Messpunkte über den Querschnitt zur Vickershärteprüfung

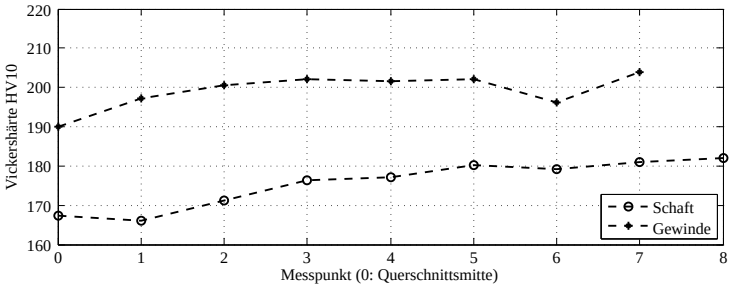


Abbildung D.6.: Vickershärte über Querschnitt, gemittelt aus 3 Punkten, Material 4.6-1

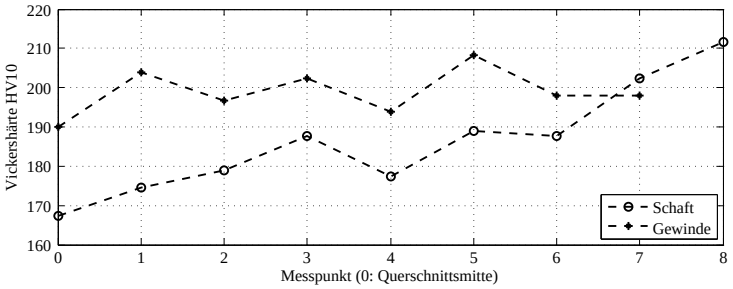


Abbildung D.7.: Vickershärte über Querschnitt, gemittelt aus 3 Punkten, Material 4.6-2

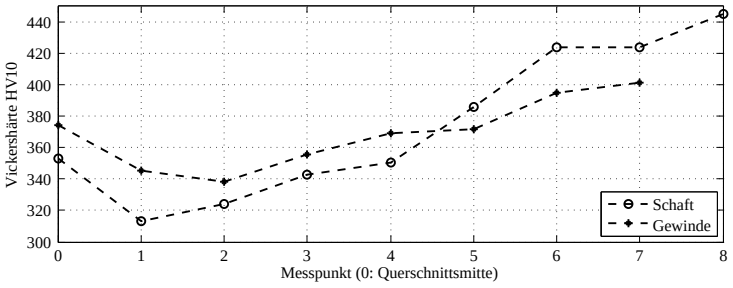


Abbildung D.8.: Vickershärte über Querschnitt, gemittelt aus 3 Punkten, Material 8.8

Abnahmeprüfzeugnis
Certificate of tests
DIN EN 10204/3.1

Lieferbedingungen
DIN ISO 898-1 DIN EN 14399-4
DIN EN ISO 10684

Auftrags Nr. **Seite** **1** von **1**

Umfang der Lieferung

Pos. Nr.	Stück	Artikel Nr.	Festigkeits-klasse	Abmessung	Material	Schmelze	Kennzeichnung
1		272011512	10.9	M20x115	32CrB4	668952717849W01	
2							
3							
4							
5							

Werkstoffanalyse in %

Pos. Nr.	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	B	Ti	Mo	Ni	Pb
1	0,3170	0,1540	0,8710	0,0100	0,0080	0,0320	1,1500	0,0030				
2												
3												
4												
5												

Pos. Nr.	Zugversuch N/mm²	Prüflast KN	Schrägzug-versuch Winkel °	Schrägzug-versuch N/mm²	Aufweit versuch 6%	Rand-entkohlung	Härte HB	Härte HV	Härte HRC	Oberflächen-härte HV 0,3
1			10	1120				340		351
2										
3										
4										
5										

Pos. Nr.	Ø mm	Streckgrenze N/mm²	Dehnung %	Brucheinschnürung %	Kerbschlagarbeit Joule ISO-U	Kerbschlagarbeit Joule ISO-V	Schichtdicke in ym
1							58-68
2							
3							
4							
5							

Abbildung D.9.: Auszug aus dem Abnahmeprüfzeugnis der getesteten Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 mit Schaft in der Scherfuge

E. Neudarstellung der Versuchsergebnisse der bestehenden Versuchsreihen

System der in den Diagrammen verwendeten Zeichen:

○	Prüfkörper-Festigkeitsklasse 4.6 oder vergleichbar
□	Prüfkörper-Festigkeitsklasse 5.6 oder vergleichbar
♢	Prüfkörper-Festigkeitsklasse 8.8 oder vergleichbar
△	Prüfkörper-Festigkeitsklasse 10.9 oder vergleichbar
▷	amerikanische Festigkeitsklasse A 325
◁	amerikanische Festigkeitsklasse A 325, gehärtet
▽	amerikanische Festigkeitsklasse A 354 BD
graue Umrandung	Schraube mit Schaft in der Scherfuge versagt im Gewinde
×	Einzelversuche aller im Diagramm dargestellten Versuchsreihen, um bei der Betrachtung die Streuung einschätzen zu können.

Wurden von einer Festigkeitsklasse mehrere Versuchsreihen durchgeführt, so werden für die weiteren Reihen die Symbole in Grautönen gefüllt.

E.1. Versuche mit Gewinde in der Scherfuge

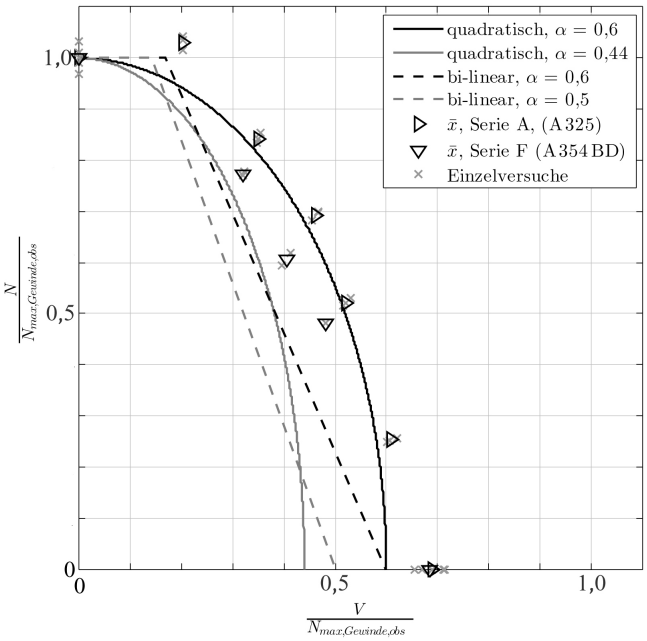


Abbildung E.1.: Versuchsergebnisse Chesson u.a. (1965), Gewinde in Scherfuge, Neudarstellung mit auf Zugtragfähigkeit bezogenen Werten

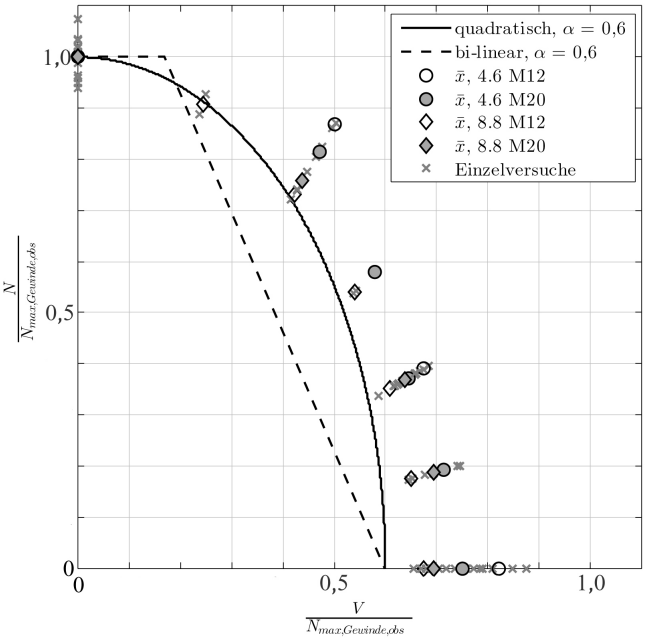


Abbildung E.2.: Versuchsergebnisse Bilderbeek (1971), Gewinde in Scherfuge, Neudarstellung mit auf Zugtragfähigkeit bezogenen Werten

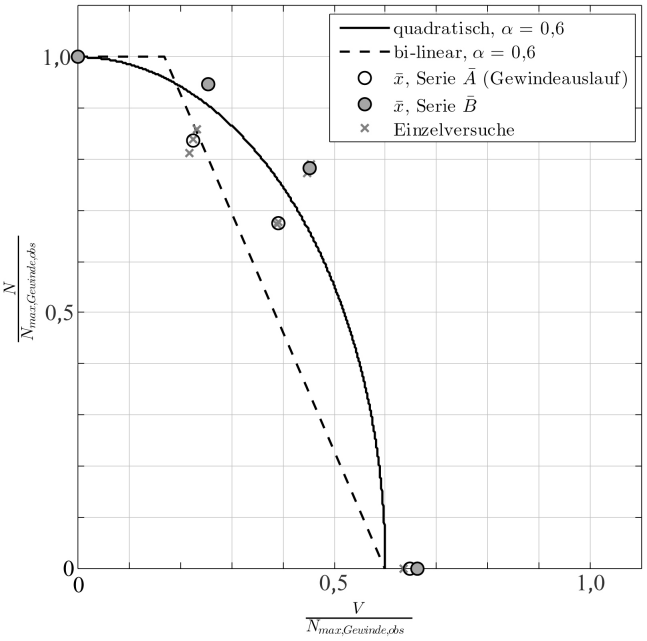


Abbildung E.3.: Versuchsergebnisse Shakir-Khalil und Ho (1979), Gewinde in Scherfuge, Neudarstellung mit auf Zugtragfähigkeit bezogenen Werten

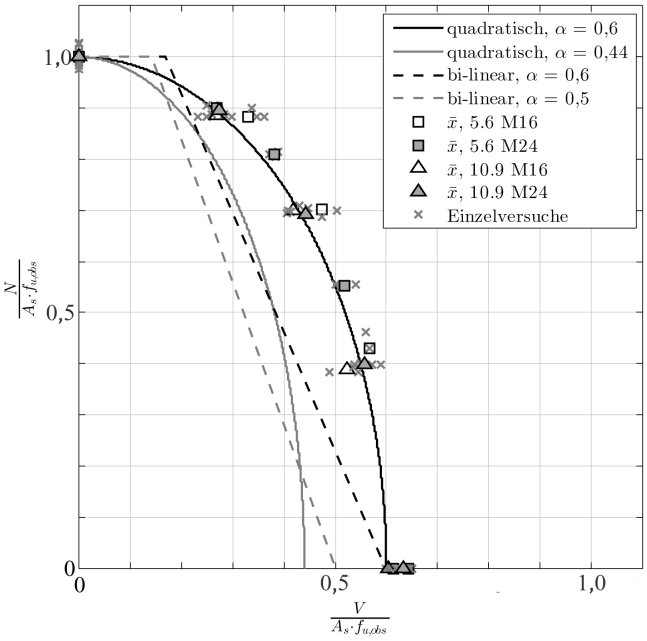


Abbildung E.4.: Versuchsergebnisse Knobloch und Schmidt (1987), Gewinde in Scherfuge, Neudarstellung mit auf Zugtragfähigkeit bezogenen Werten

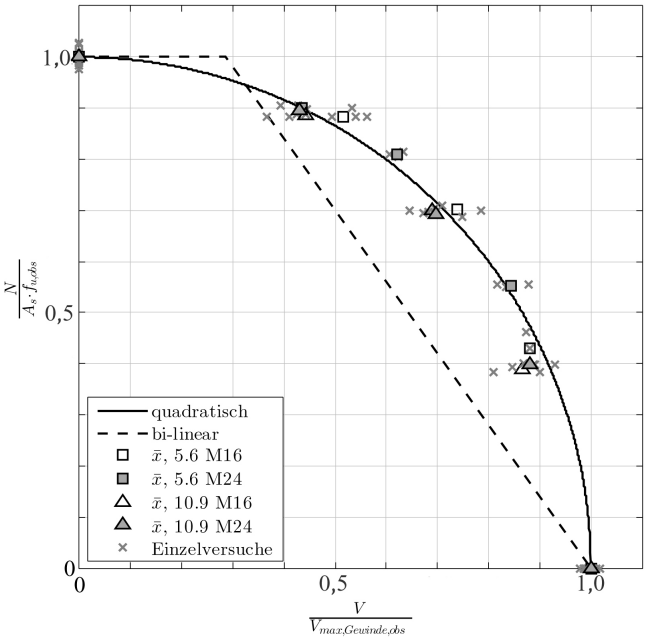


Abbildung E.5.: Versuchsergebnisse Knobloch und Schmidt (1987), Gewinde in Scherfuge, Neudarstellung mit auf Zug- und Schertragfähigkeit bezogenen Werten

E.2. Versuche mit Schaft in der Scherfuge

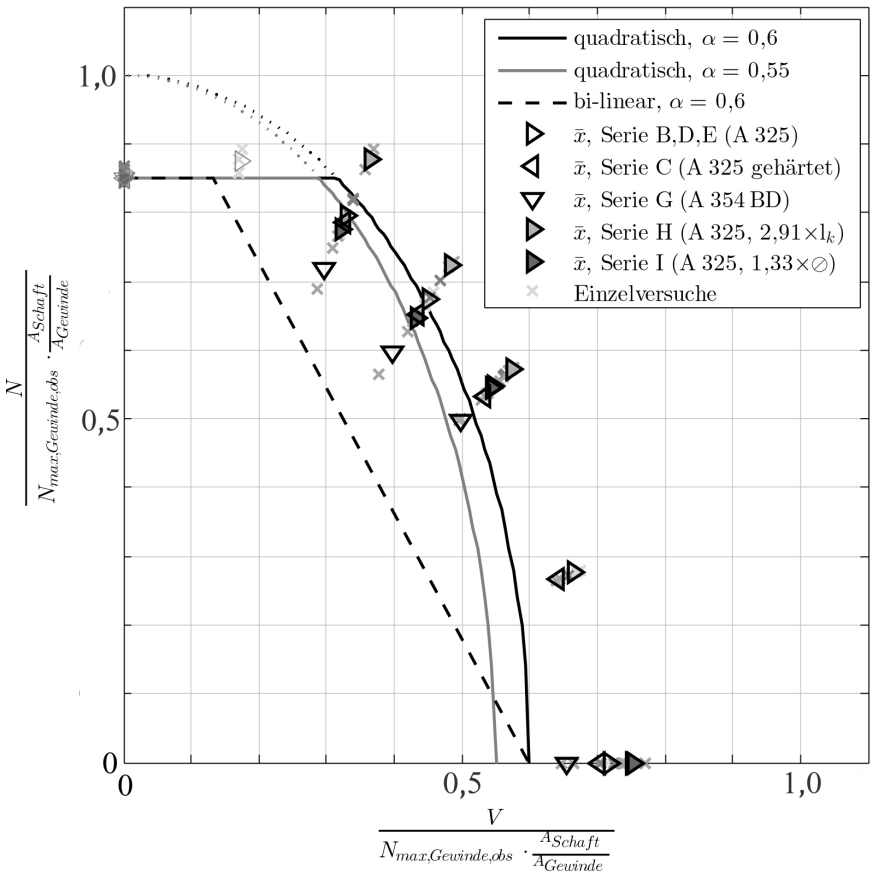


Abbildung E.6.: Versuchsergebnisse Chesson u.a. (1965), Schaft in Scherfuge, Neudarstellung mit bezogenen Werten auf die auf den Schaftquerschnitt skalierte Zugtragfähigkeit des Gewindes

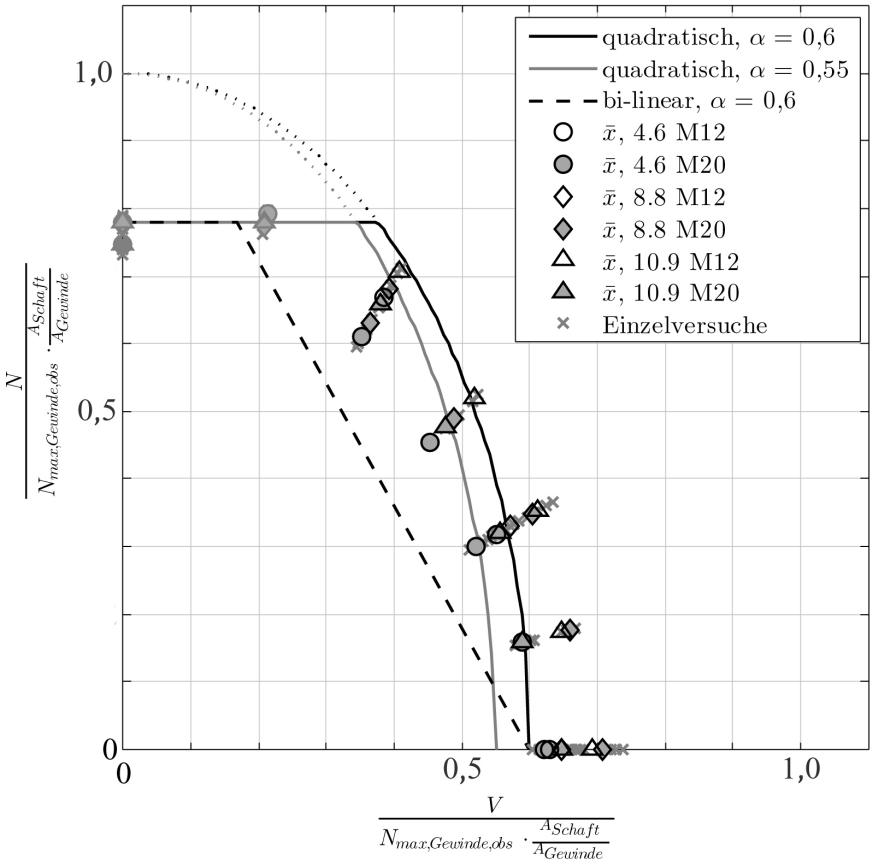


Abbildung E.7.: Versuchsergebnisse Bilderbeek (1971), Schaft in Scherfuge, Neudarstellung mit bezogenen Werten auf die auf den Schaftquerschnitt skalierte Zugtragfähigkeit des Gewindes

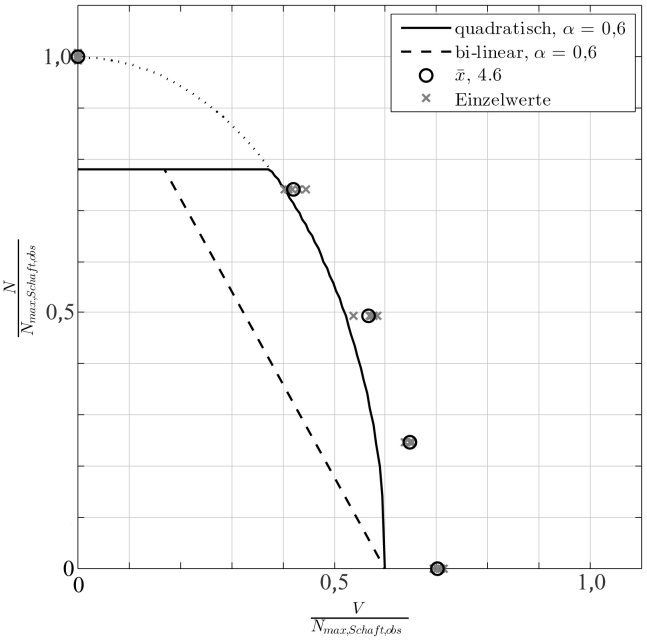


Abbildung E.8.: Versuchsergebnisse Hassler (1973), Schaft in Scherfuge, Neudarstellung mit auf Zugtragfähigkeit bezogenen Werten

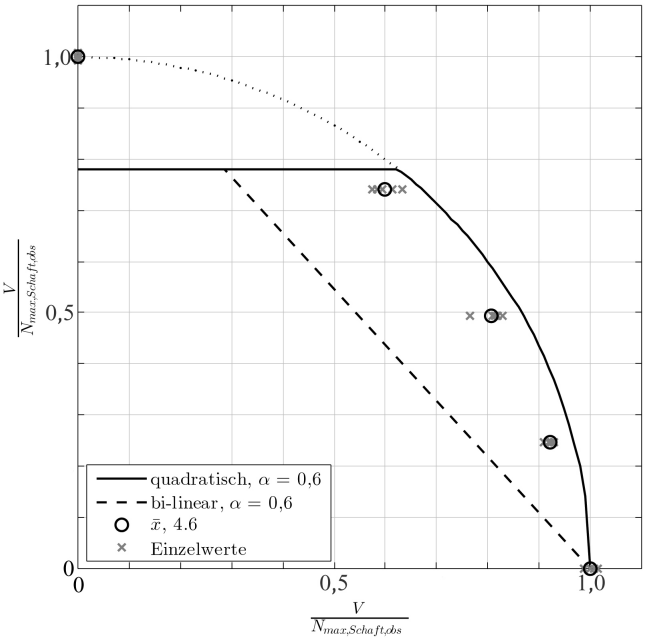


Abbildung E.9.: Versuchsergebnisse Hassler (1973), Schaft in Scherfuge, Neudarstellung mit auf Zug- und Schertragfähigkeit bezogenen Werten

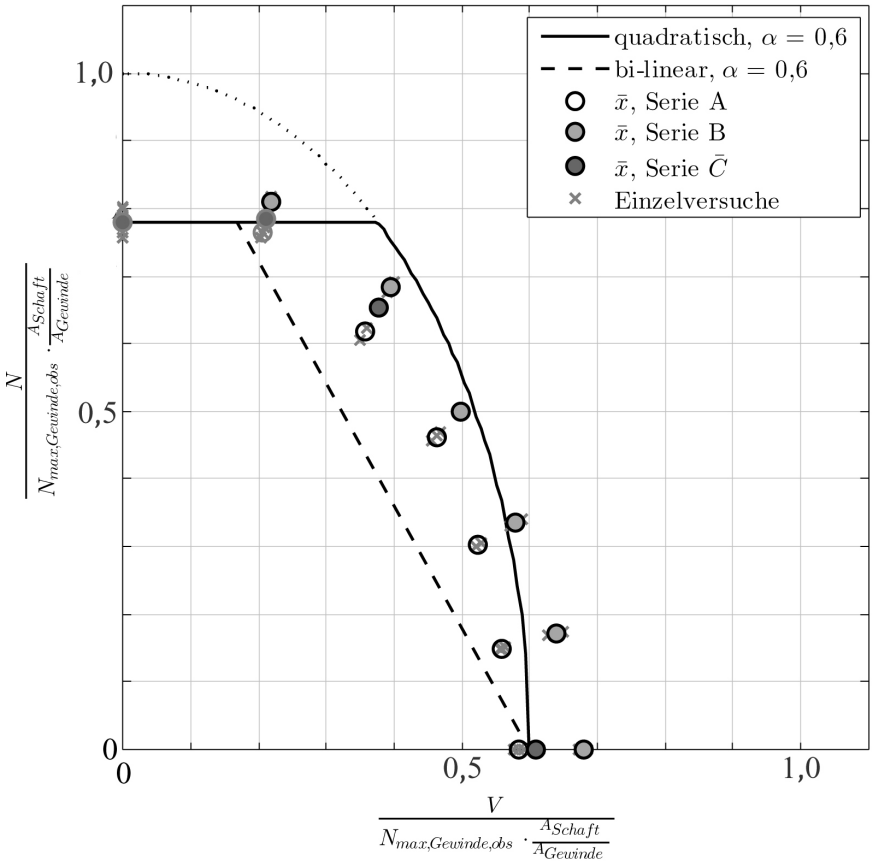


Abbildung E.10.: Versuchsergebnisse Shakir-Khalil und Ho (1979), Schaft in Scherfuge, Neudarstellung mit bezogenen Werten auf die auf den Schaftquerschnitt skalierte Zugtragfähigkeit des Gewindes

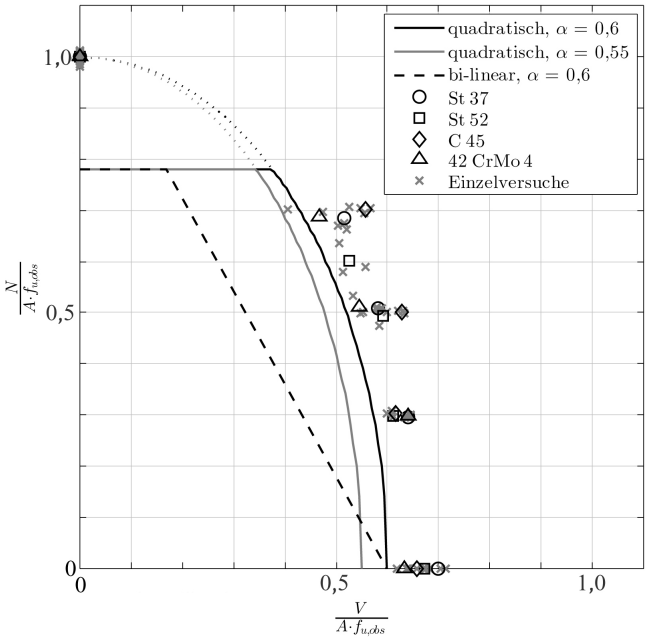


Abbildung E.11.: Versuchsergebnisse Knobloch und Schmidt (1987), Schaft in Scherfuge, Neudarstellung mit auf Zugtragfähigkeit bezogenen Werten

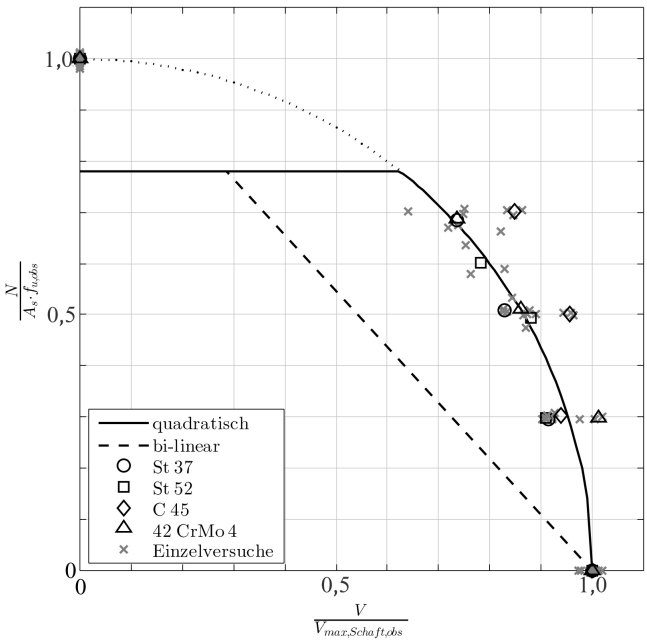


Abbildung E.12.: Versuchsergebnisse Knobloch und Schmidt (1987), Schaft in Scherfuge, Neudarstellung mit bezogenen Werten auf die auf den Schaftquerschnitt skalierte Zugtragfähigkeit des Gewindes

F. Ergebnisse der Parameterstudien mithilfe der Methode der Finiten Elemente

F.1. Variation der Klemmlänge

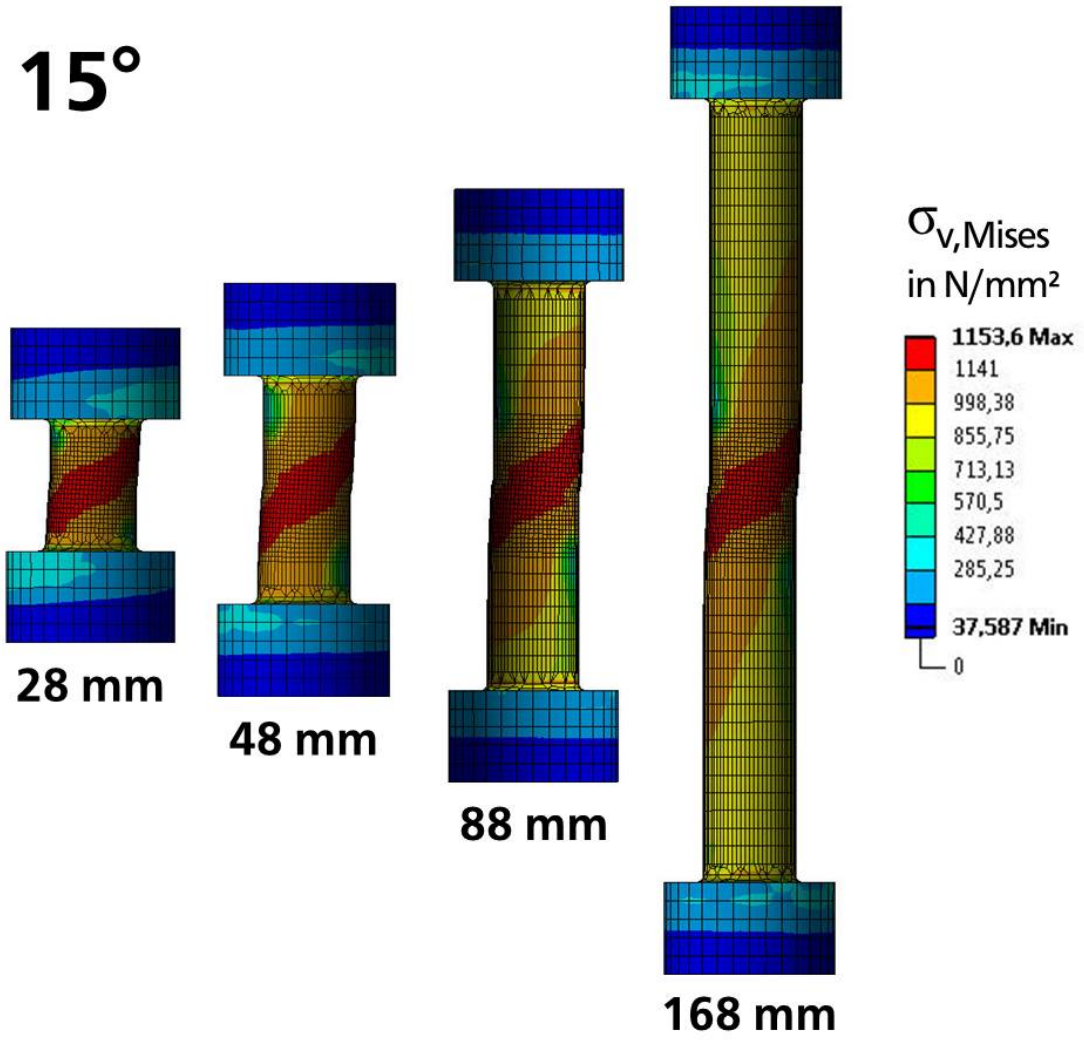


Abbildung F.1.: Verformung und Vergleichsspannungsverläufe bei maximaler Last, Festigkeitsklasse 10.9, unterschiedliche Klemmlängen, Lastwinkel 15°

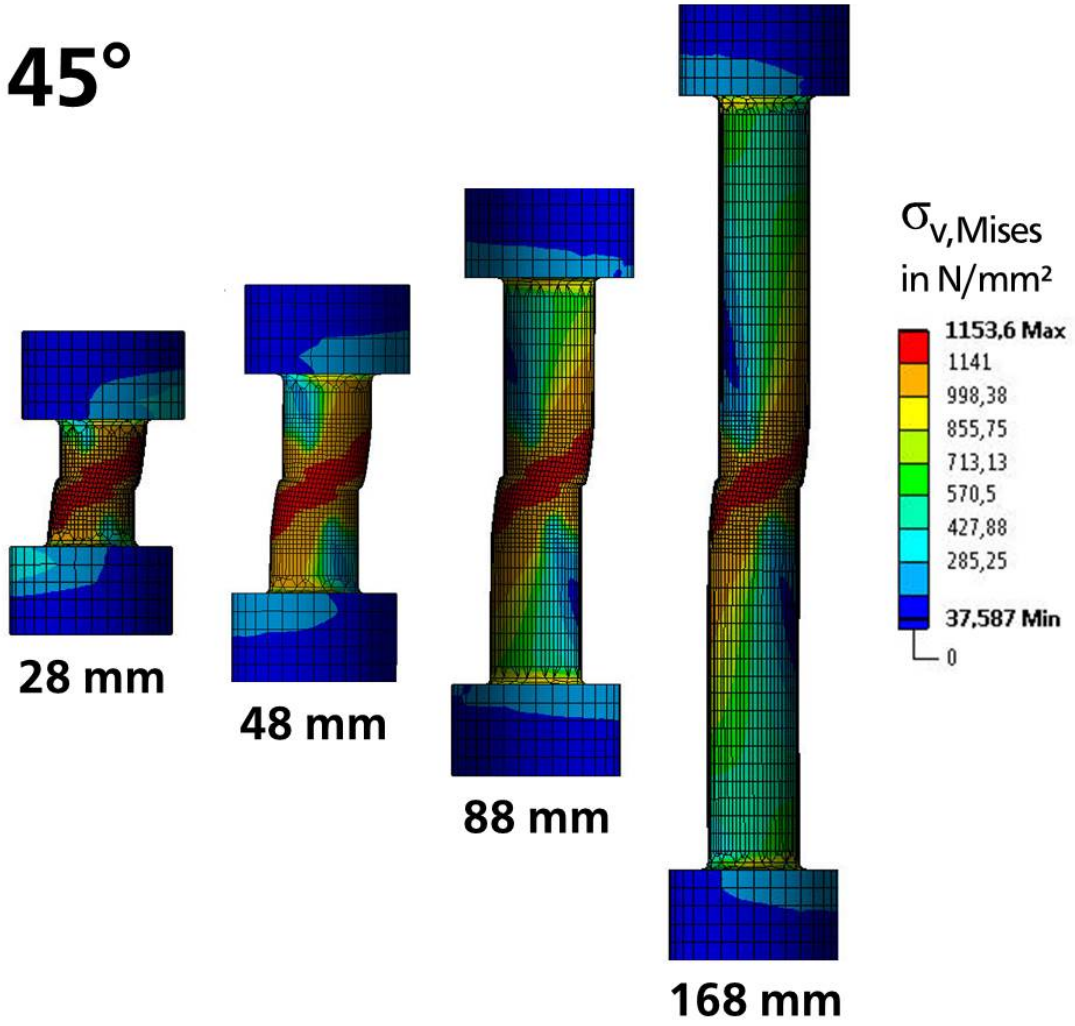


Abbildung F.2.: Verformung und Vergleichsspannungsverläufe bei maximaler Last, Festigkeitsklasse 10.9, unterschiedliche Klemmlängen, Lastwinkel 45°

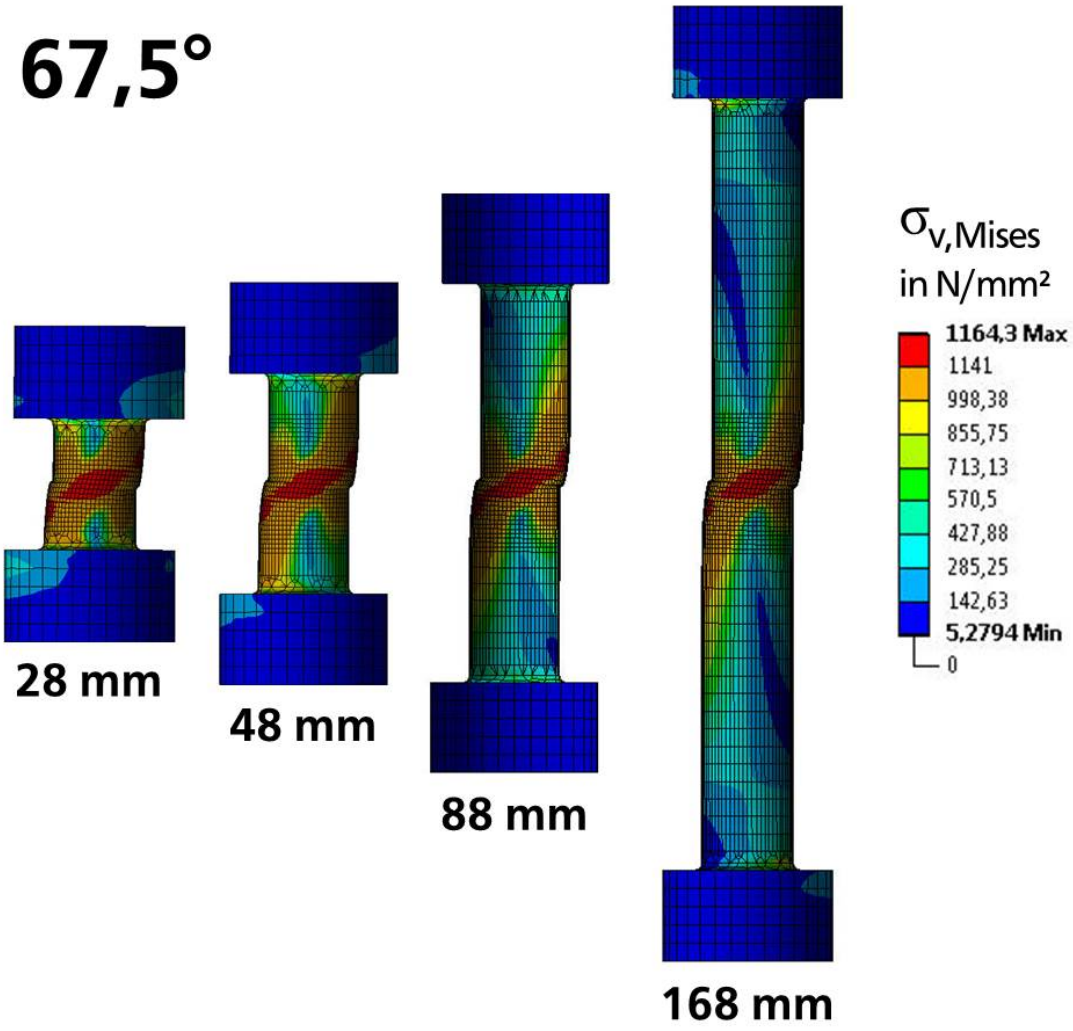


Abbildung F.3.: Verformung und Vergleichsspannungsverläufe bei maximaler Last, Festigkeitsklasse 10.9, unterschiedliche Klemmlängen, Lastwinkel 67,5°

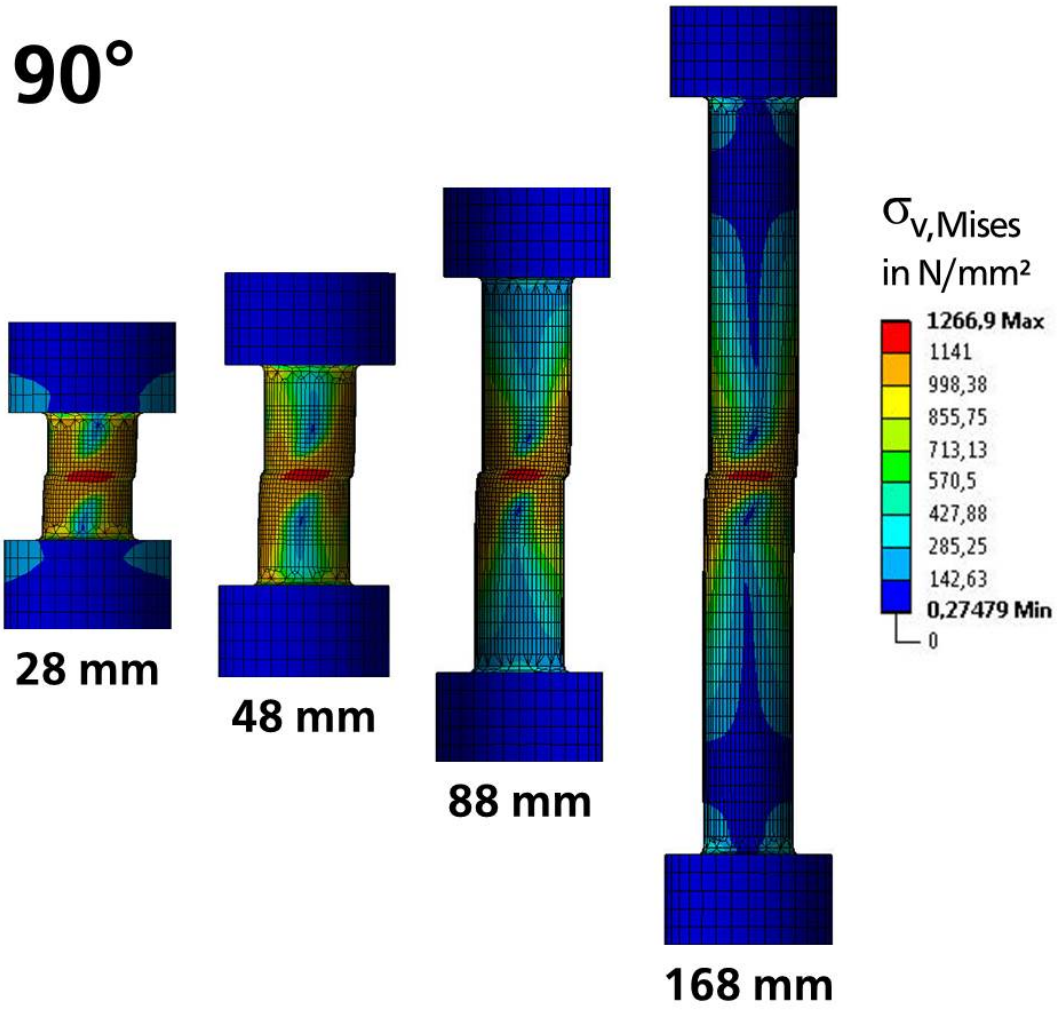


Abbildung F.4.: Verformung und Vergleichsspannungsverläufe bei maximaler Last, Festigkeitsklasse 10.9, unterschiedliche Klemmlängen, Lastwinkel 90°

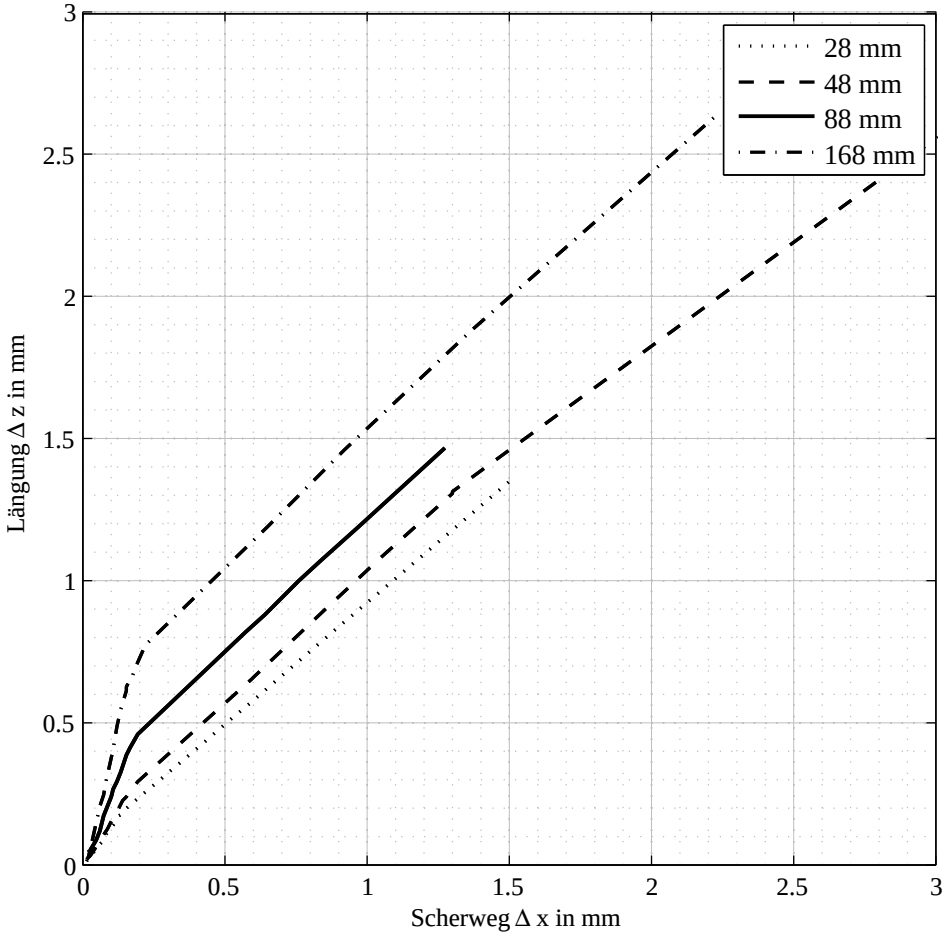


Abbildung F.5.: Längung der Schraube über Scherweg, Festigkeit 10.9, Lastwinkel 15°, unterschiedliche Klemmlängen

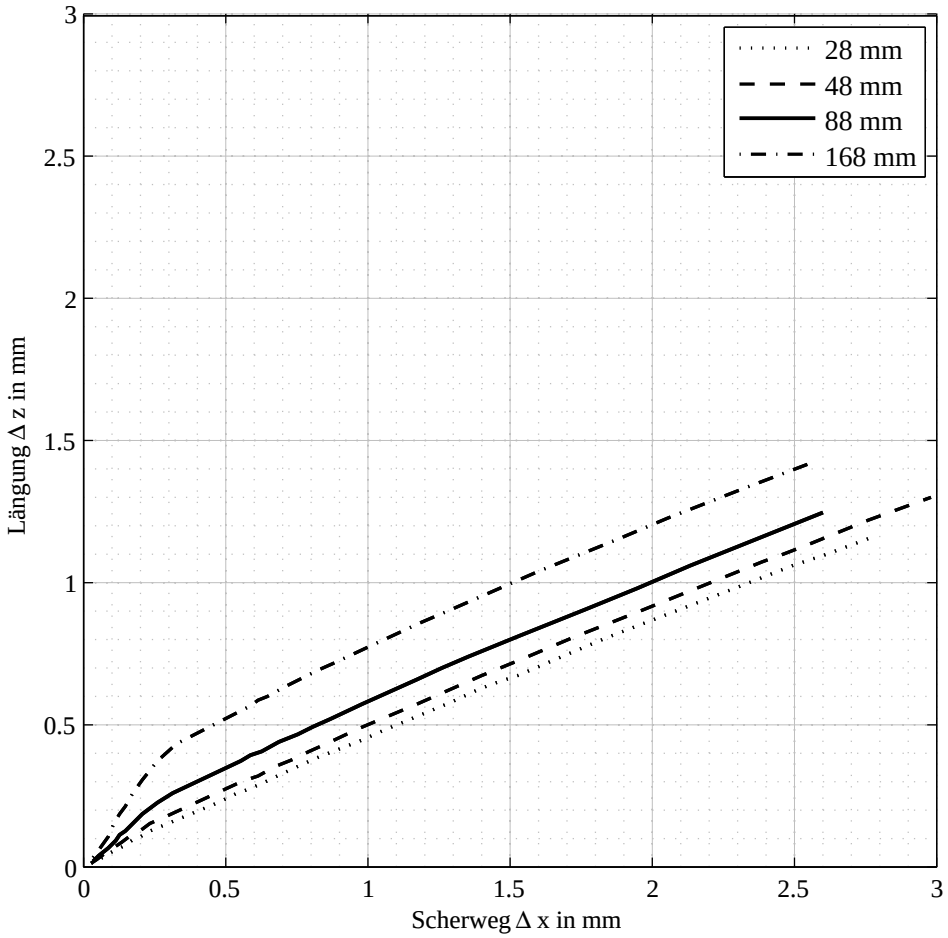


Abbildung F.6.: Längung der Schraube über Scherweg, Festigkeit 10.9, Lastwinkel 45°, unterschiedliche Klemmlängen

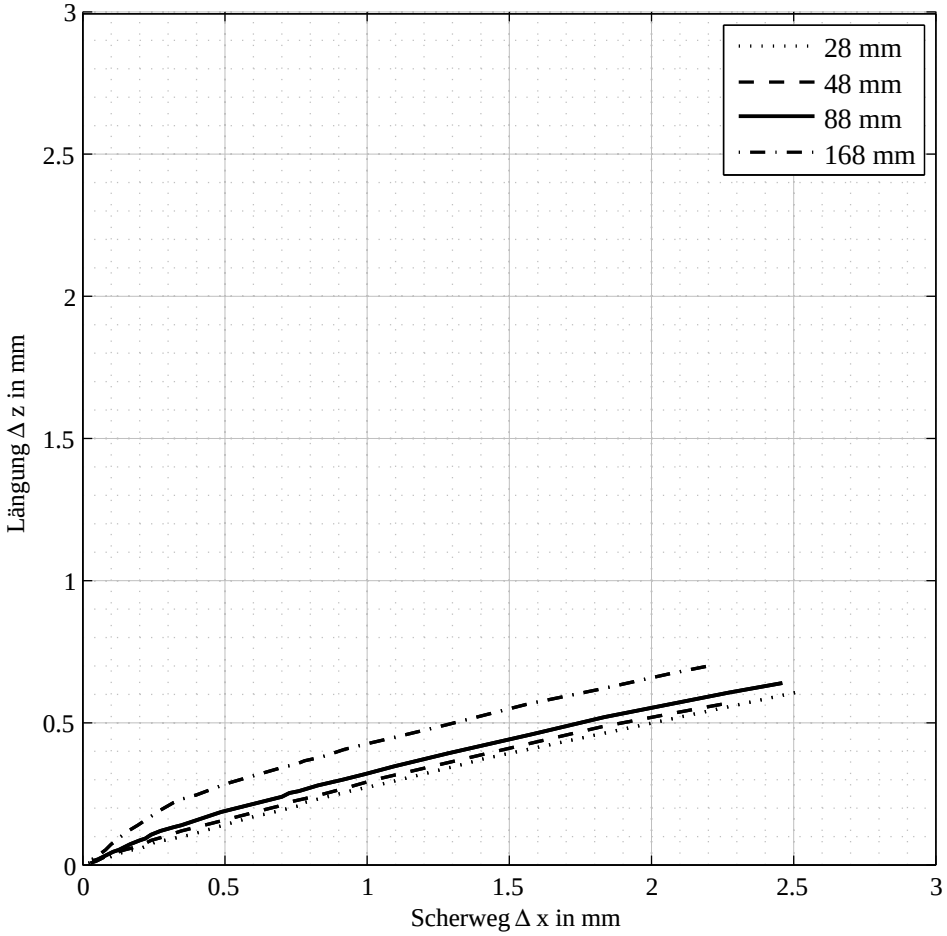


Abbildung F.7.: Längung der Schraube über Scherweg, Festigkeit 10.9, Lastwinkel 67,5°, unterschiedliche Klemmlängen

F.2. Variation des Lochspiels

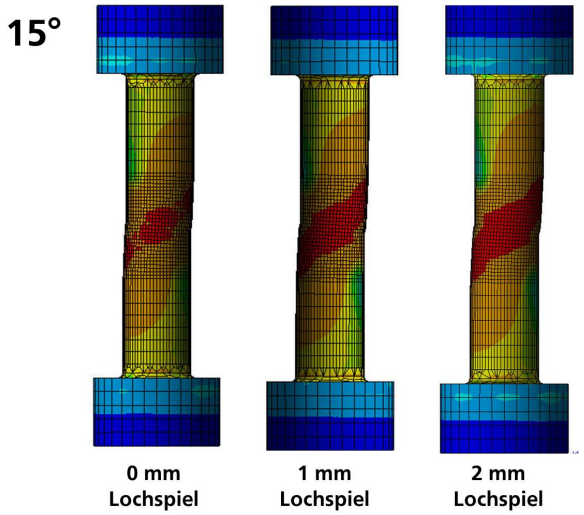


Abbildung F.8.: Verformung und Vergleichsspannungsverläufe bei maximaler Last, Festigkeitsklasse 10.9, unterschiedliche Lochspiele, Lastwinkel 15°

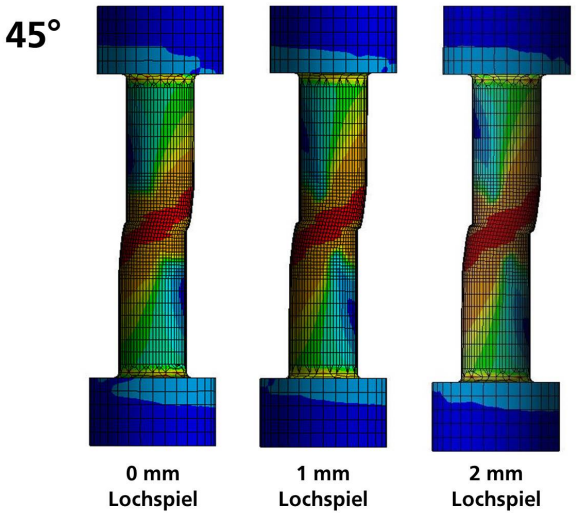


Abbildung F.9.: Verformung und Vergleichsspannungsverläufe bei maximaler Last, Festigkeitsklasse 10.9, unterschiedliche Lochspiele, Lastwinkel 45°

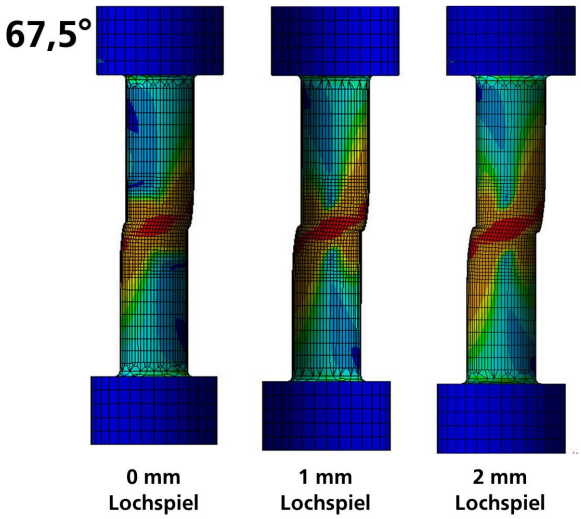


Abbildung F.10.: Verformung und Vergleichsspannungsverläufe bei maximaler Last, Festigkeitsklasse 10.9, unterschiedliche Lochspiele, Lastwinkel 67,5°

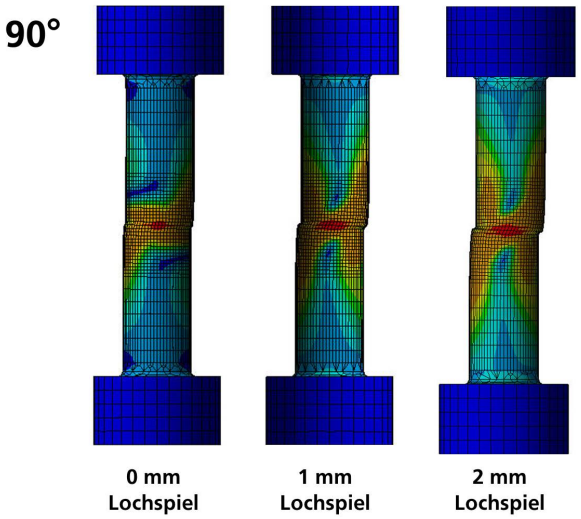


Abbildung F.11.: Verformung und Vergleichsspannungsverläufe bei maximaler Last, Festigkeitsklasse 10.9, unterschiedliche Lochspiele, Lastwinkel 90°

DASt-Richtlinien (deutscherstahlbau.de)

Forschungsberichte (deutscherstahlbau.de)