

---

# **DIPLOMARBEIT**

---

Herr  
**Gerold Reisinger**

**Zur Bemessung einer Scher-  
Lochleibungsverbindung mit  
der FKM-Richtlinie und dem  
Eurocode 3**

Mittweida, 2023



Fakultät Ingenieurwissenschaften

---

# **DIPLOMARBEIT**

---

## **Zur Bemessung einer Scher- Lochleibungsverbindung mit der FKM-Richtlinie und dem Eurocode 3**

Autor:

**Herr**

**Gerold Reisinger**

Studiengang:

**Maschinenbau/Mechatronik**

Seminargruppe:

**KM18wMVA**

Erstprüfer:

**Prof. Dr.-Ing. Torsten Laufs**

Zweitprüfer:

**DI Thomas Kierner**

Einreichung:

**Mittweida, 31.Jänner 2023**

Verteidigung/Bewertung:

**Mittweida, 2023**



Faculty of engineering

---

# **DIPLOMATHESES**

---

## **For the design of a bearing stress shear joint using FKM guideline and Eurocode 3 standard**

author:

**Mr.**

**Gerold Reisinger**

course of studies:

**Mechanical Engineering/Mechatronics**

seminar group:

**KM18wMVA**

first examiner:

**Prof. Dr.-Ing. Torsten Laufs**

second examiner:

**DI Thomas Kierner**

submission:

**Mittweida, 31.Jänner 2023**

defence/ evaluation:

**Mittweida, 2023**



## **Bibliografische Beschreibung:**

Reisinger, Gerold:

Zur Bemessung einer Scher-Lochleibungsverbindung mit der FKM-Richtlinie und dem Eurocode 3. - 2023. – Umfang insgesamt 127 Seiten

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Diplomarbeit, 2023

## **Referat:**

Die vorliegende Arbeit behandelt die Bemessung einer Scher-Lochleibungsverbindung. Die Nachweisführung erfolgt anhand der Bemessungsgrundlage der europäischen Norm EN 1993-1-8 aus dem Eurocode 3 und der FKM-Richtlinie. Diese Arbeit soll einen Vergleich zwischen den Bemessungsmethoden aus Maschinenbau und Stahlbau liefern. Zusätzlich soll eine Methode aufgezeigt werden für eine mögliche zukünftige Weiterentwicklung der FKM-Richtlinie





## **Bibliographic description:**

Reisinger, Gerold:

Design of a bearing stress shear joint using FKM guideline and Eurocode 3 standard. - 2023. – Content in total 127 pages

Mittweida, Hochschule Mittweida, Faculty of engineering, Diplomathesis, 2023

## **Abstract:**

This diplomathesis is about the design of a bearing stress shear joint using the european standard EN 1993-1-8 from the Eurocode 3 and the FKM guideline. The purpose of this diplomathesis is to compare the design standards of mechanical and structural engineering. Additionally a possible future further development of the FKM guideline shall be shown by this diplomathesis.



## Vorwort

Im Laufe meiner technischen Karriere beginnend als Schüler einer höheren technischen Lehranstalt bis zum Konstrukteur im Maschinen- und Anlagenbau ist ein relativ unscheinbares Maschinenbauteil besonders faszinierend – die Schraube. Sie hält sowohl das Rad am Fahrzeug, genannt als Beispiel aus dem Maschinenbau. Schrauben halten aber auch ganze Gebäude zusammen, wie das Leadenhall Building in London, um ein Beispiel für den Stahlbau zu nennen. Mein Empfinden und Beobachten in meiner bisherigen beruflichen Laufbahn hat mir gezeigt, dass Schraubenverbindungen entweder überschätzt oder unterschätzt werden. Als mir schließlich von meinem Betreuer eine Untersuchung zwischen zweier Bemessungsvorschriften anhand einer Schraubenverbindung vorgeschlagen wurde, war für mich aus diesem Grund klar, diese Thematik für meine Abschlussarbeit zu wählen.

Damit dies erst möglich wurde, ist an einigen Personen in meinem Umfeld ein Dank auszusprechen, meiner Familie und Freundeskreis, die mich in allen Entscheidungen unterstützten. Besonders aber bei meiner Mutter die mich erst dazu motiviert hat das Aufbaustudium, welches über das Studien- & Technologie Transferzentrum Weiz organisiert ist, an der Hochschule Mittweida zu absolvieren.

Vor allem aber bei meinem Betreuer Herrn Professor Dr.-Ing. Torsten Laufs. Herr Professor Laufs hat mich nicht nur in dieser Diplomarbeit betreut, sondern dankenswerter Weise auch in den anderen Modulen, welche einen Betreuer der Hochschule Mittweida verlangten.

Ein besonders großes Dankeschön gilt vor allem aber meinem ehemaligen Klassenvorstand und Lehrer der technischen Mechanik an der höheren technischen Bundeslehranstalt in Andorf, an jener ich die Reife- und Diplomprüfung absolvierte, Herrn DI Thomas Kierner. Herr DI Kierner hat sich bereit erklärt die vorliegende Diplomarbeit als Zweitprüfer zu begutachten. Dies ist als Familienvater und Lehrer meines Erachtens nicht als selbstverständlich anzusehen und bin ihm daher dementsprechend sehr dankbar!

Der Firma CADFEM GmbH, welche mir eine vollwertige Testlizenz von ANSYS zur Verfügung gestellt hat, meinem derzeitigen Arbeitgeber der Firma Next Generation Recycling GmbH, meinem Kollegium, insbes. der IT-Abteilung und dem technischen Direktor welche mir die Ressourcen und Zeit für mein Studium zur Verfügung gestellt haben, möchte ich ebenfalls meinen aufrichtigen Dank aussprechen.

Meiner besten Freundin Lena Maria, die in Sachen der Grammatik in allen meiner Arbeiten einen zweiten Blick darauf geworfen hat, gebührt ebenfalls ein Dankeschön in dieser Diplomarbeit.

Neukirchen am Walde, Jänner 2023

Gerold Reisinger



# Inhalt

<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>3</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>5</b>
<b>Formelverzeichnis .....</b>	<b>7</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>9</b>
<b>Spezielle Abkürzungen.....</b>	<b>11</b>
<b>Formelzeichen.....</b>	<b>13</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>19</b>
1.1 <i>Allgemeines .....</i>	19
1.2 <i>Zielsetzung .....</i>	19
1.3 <i>Abgrenzung .....</i>	20
<b>2 Theoretische Grundlagen.....</b>	<b>21</b>
2.1 <i>Die Finite Elemente Methode.....</i>	21
2.1.1 Grundgedanke der FEM .....	21
2.1.2 Nichtlineare FEM .....	22
2.2 <i>Die FKM-Richtlinie .....</i>	25
2.2.1 Der Gültigkeitsbereich der FKM – Richtlinie.....	26
2.2.2 Sicherheitskonzept der FKM-Richtlinie .....	27
2.3 <i>Die EN 1993-1-8 aus dem Eurocode 3 .....</i>	28
2.3.1 Der Eurocode in Österreich .....	28
2.3.2 Die EN 1993-1-8 .....	28
2.3.3 Der Gültigkeitsbereich der EN 1993-1-8 .....	29
2.4 <i>Die Scher- Lochleibungsverbindung .....</i>	29
<b>3 Nachweisführung.....</b>	<b>34</b>
3.1 <i>Randbedingungen und Modellierung .....</i>	34
3.2 <i>Die Finite Elemente Analyse.....</i>	44
3.2.1 Allgemeine technische Daten.....	46
3.2.2 Analyse des Bauteils.....	47
3.2.3 Ermittlung der plastischen Formzahl für das Bauteil .....	51

---

3.3	<i>Bemessung nach der FKM-Richtlinie</i> .....	53
3.3.1	Spannungskennwerte .....	53
3.3.2	Werkstoffkennwerte .....	56
3.3.3	Konstruktionskennwerte .....	59
3.3.4	Bauteilfestigkeit .....	63
3.3.5	Sicherheitsfaktoren .....	63
3.3.6	Einzelnachweis des Bauteils .....	65
3.3.7	Einzelnachweis der Schraube .....	65
3.3.8	Nachweis .....	70
3.4	<i>Bemessung nach EN 1993-1-8</i> .....	73
3.4.1	Abscheren je Scherfuge .....	74
3.4.2	Lochleibung .....	76
3.4.3	Zugbeanspruchung der Schraube .....	80
3.4.4	Normalkraftbeanspruchung des Bauteils .....	80
3.4.5	Tragfähigkeit der Verbindungsmittelgruppe .....	81
3.4.6	Nachweis .....	83
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>84</b>
4.1	<i>Diskussion der Ergebnisse</i> .....	85
4.2	<i>Schlussfolgerung</i> .....	87
<b>5</b>	<b>Ergänzung und Ausblick</b> .....	<b>89</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>90</b>

## Anlagen

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung des Bezeichnungssystems, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 in Anlehnung an [1, S.405].....	11
Abbildung 2: Benennung der Verbindungsmittel, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 in Anlehnung an [2, Abschn. 6.2].....	12
Abbildung 3: Skizze des Sicherheitskonzeptes der FKM-Richtlinie, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 in Anlehnung nach [4, S.117].....	27
Abbildung 4: Unbelastete Scher- Lochleibungsverbindung, eigene Darstellung G. Reisinger 2023.....	30
Abbildung 5: Belastete Scher- Lochleibungsverbindung; eigene Darstellung G. Reisinger 2023 in Anlehnung an [10].....	31
Abbildung 6: Bezeichnung der Rand- und Lochabstände, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 nach [7] bzw. [9].....	32
Abbildung 7: Schematische Darstellung der Versagensmodi bei zu geringem Randabstand $e_1$ , eigene Darstellung G. Reisinger 2023.....	32
Abbildung 8: Schematische Darstellung des Versagensmodus bei zu geringem Randabstand $e_2$ , eigene Darstellung G. Reisinger 2023.....	33
Abbildung 9: Zugverband eines Gebäudes im Industriegebiet Keileweg, Rotterdam, Niederlande, eigene Aufnahme G. Reisinger Juli 2022.....	34
Abbildung 10: Darstellung der zu untersuchenden Verbindung, eigene Darstellung G. Reisinger 2023.....	36
Abbildung 11: Vereinfachtes Modell für die FEA, eigene Darstellung G. Reisinger 2023.....	37
Abbildung 12: Idealisierte Verspannungskörper in der Verbindung, eigene Darstellung G. Reisinger 2023.....	41
Abbildung 13: Gemittelte (oben) und nicht gemittelte (unten) Spannungsauswertung.....	44

---

Abbildung 14: Körper für den ebenen Spannungszustand.....	47
Abbildung 15: Farblicher Spannungsverlauf, die ersten beiden Bilder zeigen die 1. und 2. Hauptspannung Zug und die beiden Bilder darunter für Druck .....	48
Abbildung 16: Lastschritt bei der gewünschten Prüfkraft und dazugehörige Verschiebung. ....	49
Abbildung 17: Kraft-Weg Diagramm, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 .....	51
Abbildung 18: Ablaufdiagramm des FKM-Richtlinien Nachweises, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 .....	53
Abbildung 19: Ablaufdiagramm des EC3-Nachweises, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 .....	73
Abbildung 20: Verbindung mit Futterblech, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 in Anlehnung an Bild 5.5 nach [9].....	74
Abbildung 21: Schematische Darstellung der verantwortlichen Flächen für Blockversagen, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 .....	79
Abbildung 22: Vergleich zwischen $N_{u,Rd}$ und der vollplastischen Traglast, eigene Darstellung G. Reisinger 2023.....	85
Abbildung 23: Zugestandene Tragfähigkeit des Bauteils der einzelnen Richtlinien, eigene Darstellung G. Reisinger 2023.....	86
Abbildung 24: Zugestandene Tragfähigkeit auf Zug der Schraube, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 .....	86
Abbildung 25: Zugestandene Tragfähigkeit auf Scherung (zweischnittig) der Schraube, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 .....	87



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Erforderliche Parameter um die Gültigkeit der FKM-Richtlinie zu gewährleisten, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 .....	26
Tabelle 2: Tabellarische Übersicht der Eurocodes, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 nach [15].....	28
Tabelle 3: Übersicht der vertretenen Stahlsorten in der aktuellen Fassung [7], eigene Darstellung G. Reisinger 2023 .....	29
Tabelle 4: Übersicht Komponenten und erste Randbedingungen für die Berechnung, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 .....	35
Tabelle 5: Schraubendaten für M12 laut [5, Tab. A11], eigene Darstellung G. Reisinger 2023 .....	39
Tabelle 6: Schrauben – bzw. Mutterabmessungen der benötigten Durchmesser, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 .....	40
Tabelle 7: Übersicht Lastrandbedingungen, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 .....	43
Tabelle 8: Materialdaten für das Bauteil und die Schraube, eigene Darstellung G. Reisinger 2023.....	46
Tabelle 9: Ergebnisse der Hauptspannungen, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 .....	47
Tabelle 10: Werte aus dem ersten Lastschritt für die plastische Formzahl, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 .....	52
Tabelle 11: Werkstoffnormwerte; eigene Darstellung nach [6, Tab. 5.1.1] für S235JR, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 .....	56
Tabelle 12: Herleitung der Tabellenwerte 3.2.1 in [6] analog zu [25], eigene Darstellung G. Reisinger 2023.....	57
Tabelle 13: Sicherheitsfaktoren, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 .....	63

---

Tabelle 14: Statischer Festigkeitsnachweis mit Nennspannungen für die Schraube, eigene Darstellung G. Reisinger 2023.....	66
Tabelle 15: Übersicht Nachweis der Komponenten (FKM), eigene Darstellung G. Reisinger 2023 .....	70
Tabelle 16: Nachweisführung FKL 12.9, eigene Darstellung G. Reisinger 2023.....	70
Tabelle 17: Vergleich der Lochleibungstragfähigkeit zwischen aktueller Norm und der Entwurfsversion, eigene Darstellung G. Reisinger 2023.....	76
Tabelle 18: Grundkriterium für die Gesamttragfähigkeit der Verbindungsmittelgruppe ....	81
Tabelle 19: Bemessungswerte der Tragfähigkeit der Verbindungsmittelgruppe, eigene Darstellung G. Reisinger 2023.....	82
Tabelle 20: Nachweisergebnisse nach EN 1993-1-8, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 .....	83

## Formelverzeichnis

Gleichung 1: Berechnung der Nettoquerschnittsfläche .....	37
Gleichung 2: Gleichung für die zulässige Zugspannung auf die Kraft F umgeformt .....	38
Gleichung 3: allgemeine Drehmomentgleichung.....	39
Gleichung 4: Zur Ermittlung von der handfesten Montagevorspannung.....	40
Gleichung 5: Berechnung für $D_{km}$ .....	40
Gleichung 6: Verhältnis zwischen Bauteilaußendurchmesser und Auflageaußendurchmesser.....	42
Gleichung 7: Verhältnis zwischen der Klemmlänge der Bauteile und dem Auflageaußendurchmesser.....	42
Gleichung 8: Bestimmung des Tangens des Kegelwinkels .....	42
Gleichung 9: Ermittlung des Grenzaußendurchmessers .....	43
Gleichung 10: Formel zur Berechnung der Aufliegenden Verspannungskörperfläche auf Bauteil 1.....	43
Gleichung 11: Ermittlung der elastischen Grenzlast.....	52
Gleichung 12: Berechnung der Vergleichsspannung .....	54
Gleichung 13: Berechnung der hydrostatischen Spannung .....	55
Gleichung 14: Berechnung des Mehrachsigenitätsgrads .....	55
Gleichung 15: Allgemein gültige Formel zur Bestimmung von $d_{eff}$ .....	56
Gleichung 16: Berechnung des technologischen Größenfaktors .....	58
Gleichung 17: Bauteilnormwert für die Zugfestigkeit .....	58
Gleichung 18: Bauteilnormwert für die Streckgrenze .....	59

---

Gleichung 19: Bauteilnormwert für die Bruchdehnung.....	59
Gleichung 20: Berechnung der plastischen Formzahl.....	60
Gleichung 21: Berechnung der Referenzdehnung.....	61
Gleichung 22: Kriterium zum Ermitteln der ertragbaren Dehnung.....	61
Gleichung 23: Berechnung des Verfestigungsfaktors .....	62
Gleichung 24: Abgleich zur Ermittlung der plastischen Stützzahl .....	62
Gleichung 25: Bauteilfestigkeit .....	63
Gleichung 26: Berechnung des Gesamtsicherheitsfaktors .....	64
Gleichung 27: Vollständige Gleichung für die Berechnung des Gesamtsicherheitsfaktors .....	64
Gleichung 28: Berechnung des Auslastungsgrades als Festigkeitsnachweis .....	65
Gleichung 29: Berechnung des Bemessungswert für die Abschertragfähigkeit der Schraube .....	74
Gleichung 30: Abminderungsbeiwert für die Abschertragfähigkeit.....	75
Gleichung 31: Begrenzung der Lochleibungstragfähigkeit bei mehreren Schrauben. ....	78
Gleichung 32: Ermittlung des Widerstands gegen Blockversagen.....	79
Gleichung 33: Bemessungswert für die Zugbeanspruchung einer Schraube.....	80
Gleichung 34: Bemessungswert für die Nettoquerschnittstragfähigkeit .....	81

## Abkürzungsverzeichnis

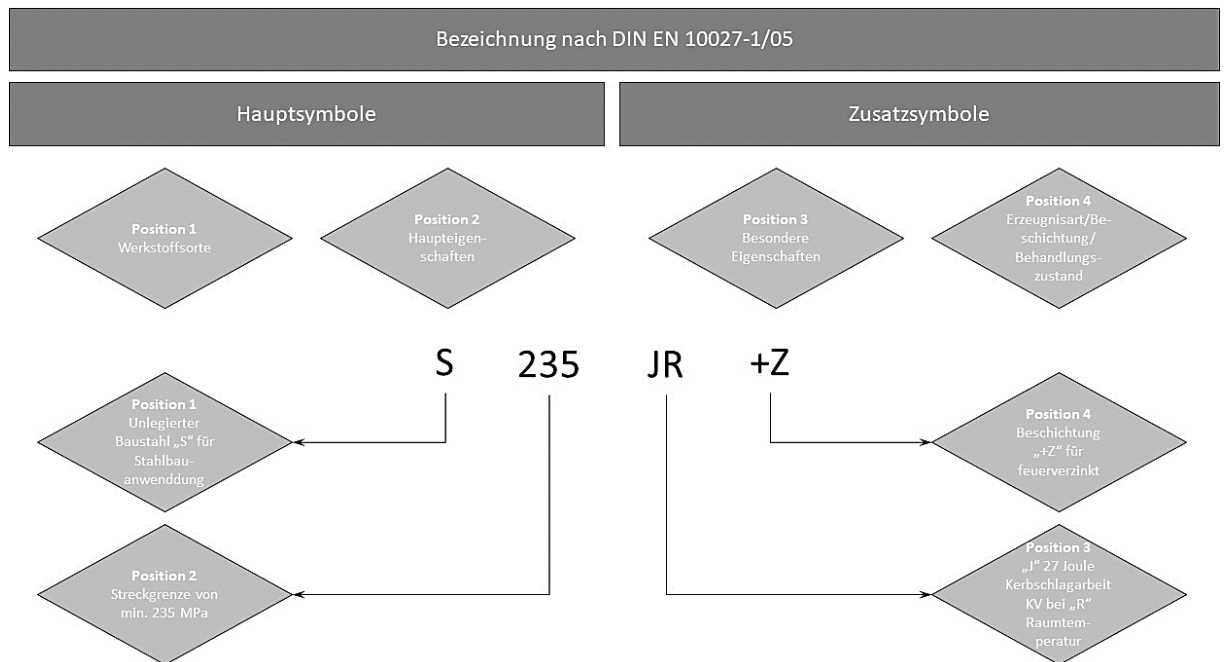
<b>Abschn.</b>	Abschnitt
<b>bezgl.</b>	bezüglich
<b>bzw.</b>	Beziehungsweise
<b>CE</b>	Conformité européenne
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung
<b>EC3</b>	Eurocode 3, Normenreihe für den Stahlbau
<b>E-Modul</b>	Elastizitätsmodul, Materialkennwert
<b>EN</b>	Europäische Norm
<b>ENV</b>	Europäische Vornorm/Normenvorschlag, Vorgänger der EN
<b>e.V.</b>	eingetragener Verein
<b>FEA</b>	Finite Elemente Analyse, Angewandte Finiten Elemente Methode
<b>FEM</b>	Finite Elemente Methode
<b>FKM</b>	Forschungskuratorium Maschinenbau
<b>Gl.</b>	Gleichung
<b>GmbH</b>	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
<b>HV</b>	Härte nach Vickers
<b>inkl.</b>	inklusive
<b>insbes.</b>	insbesondere
<b>ISO</b>	International standardization organisation
<b>FKL</b>	Festigkeitsklasse
<b>lt.</b>	laut
<b>max.</b>	Maximum, maximal
<b>min.</b>	Minimum, minimal
<b>mm</b>	Millimeter, Längeneinheit
<b>mm<sup>2</sup></b>	Quadratmillimeter, Flächeneinheit

<b>MPa</b>	Megapascal, Einheit der Spannung und Druck
<b>MSG</b>	Metallschutzgasschweissen
<b>N</b>	Newton, Einheit der Kraft
<b>Pos.</b>	Position
<b>S.</b>	Seite
<b>s</b>	Sekunde, Einheit der Zeit
<b>SLV</b>	Scher – Lochleibungsverbindung
<b>Spez.</b>	Spezifiziert, spezifisch
<b>Tab.</b>	Tabelle
<b>TGL</b>	Technische Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen
<b>VDI</b>	Verein Deutscher Ingenieure
<b>vgl.</b>	Vergleich

# Spezielle Abkürzungen

In diesem Abschnitt werden die speziellen Abkürzungen bezgl. Werkstoffbezeichnung und jene die für die Verbindungselemente verwendet wurden, kurz dargestellt.

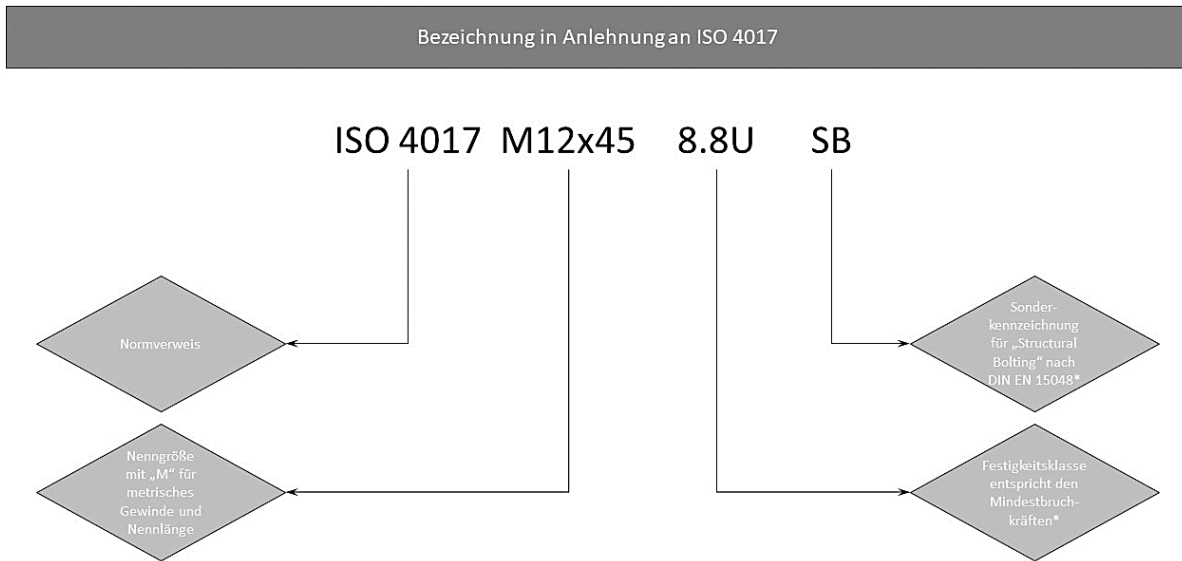
Die Stahlsortenbezeichnung setzt sich wie folgt zusammen:



**Abbildung 1: Darstellung des Bezeichnungssystems, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 in Anlehnung an [1, S.405]**

Es müssen nicht immer alle Positionen zwangsläufig besetzt sein.

Die Bezeichnung für die Verbindungselemente setzt sich wie folgt zusammen:



**Abbildung 2: Benennung der Verbindungsmittel, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 in Anlehnung an [2, Abschn. 6.2]**

\* Vergleich dazu liefert [3, S.908]

Die Bezeichnungen für Mutter und Unterlegscheibe erfolgte analog zu dem Modell.



# Formelzeichen<sup>1</sup>

## Allgemeine Formelzeichen

<b>A</b>	Fläche eines Querschnitts; auch für die Bruchdehnung
<b>arctan</b>	Arcustangens, Umkehrfunktion von tan
<b>b</b>	Breite eines prismatischen Körpers
<b>d</b>	Durchmesser allgemein
<b>E</b>	Elastizitätsmodul
<b>F</b>	Kraft
<b>h</b>	Höhe eines prismatischen Körpers
<b>l</b>	Wirkabstand, auch Länge allgemein
<b>lg</b>	Logarithmus zur Basis 10
<b>ln</b>	Natürlicher Logarithmus
<b>l<sub>0</sub></b>	Ursprungslänge
<b>M<sub>b</sub></b>	Biegemoment
<b>n</b>	Anzahl allgemein
<b>O</b>	Oberfläche eines Körpers
<b>P<sub>ü</sub></b>	Überlebenswahrscheinlichkeit (aus [4])
<b>R<sub>e</sub></b>	Fließgrenze/Streckgrenze, aus dem französischen <i>Résistance élastique</i>
<b>R<sub>m</sub></b>	Zugfestigkeit, aus dem französischen <i>Résistance mécanique</i>
<b>R<sub>p</sub></b>	Dehngrenze meist gleich Streckgrenze, aus dem französischen <i>Résistance plastique</i>
<b>s</b>	Stärke eines Bleches
<b>tan</b>	Tangens, Trigonometrische Funktion

---

<sup>1</sup> Die in den Unterabschnitten des Kapitels „Formelzeichen“ können im Wortlaut mit den genannten Quellen zum Teil übereinstimmen, ebenso können die aus „Allgemeine Formelzeichen“ in den jeweiligen Quellen in ähnlicher oder gleicher Form zu finden sein.

$V$	Volumen eines Körpers
$w_b$	Widerstandsmoment für die Biegung
$w_t$	Widerstandsmoment für die Torsion
$\Delta$	Griechischer Großbuchstabe Delta als Formelzeichen einer Differenz
$\varepsilon$	Dehnung allgemein
$\sigma_{zul}$	Zulässige Normalspannungen
$\tau$	Scher - /Schubspannung allgemein

**Formelzeichen aus [5] oder im direkten Zusammenhang stehend:**

$A_N$	Nennquerschnitt der Schraube
$A_S$	Spannungsquerschnitt
$A_{DK}$	Grundfläche des Druckkegels in der Trennfuge
$A_{d3}$	Kernquerschnitt
$d_x$	mit Index „2“ Flankendurchmesser; mit Index „3“ Kerndurchmesser; mit Index „S“ Spannungsdurchmesser
$d_a$	Innendurchmesser der ebenen Schraubenkopfauflage am Radiusübergang des Schafts
$D_A$	Ersatzaußendurchmesser des Bauteils in der Trennfuge
$D_A'$	Ersatzaußendurchmessers des Bauteils
$D_{A,Gr}$	Grenzaußendurchmesser, max. möglicher Durchmesser des Verspannungskegels
$D_a$	Fasendurchmesser der ebenen Mutterauflagefläche
$d_{ha}$	Innendurchmesser der ebenen, kopfseitigen Auflagefläche der verspannten Bauteile
$D_{ha}$	Innendurchmesser der einschraub - bzw. muttergewindeseitigen ebene Auflagefläche der verspannten Bauteile
$D_{KI}$	Innendurchmesser der ebenen Schraubenkopfauflage
$D_{Km}$	Wirksamer Durchmesser für das Reibmoment in der Auflage des Schraubenkopfs oder der Mutter
$d_w$	Auflageaußendurchmesser
$F_M$	Montagevorspannkraft
$F_{Qmax}$	Maximale Querkraft (Abscherkraft)
$h_{DK}$	Höhe des Druckkegels bis zur Trennfuge

---

$l_K$	Klemmlänge
$M_A$	Schraubenanzugsmoment
$P$	Gewindesteigung
$w$	Verbindungskoeffizient (Unterscheidung Durchsteckverbindung, Einschraubverbindung)
$y$	Durchmesserverhältnis
$\beta_L$	Längenverhältnis
$\mu_G$	Reibzahl im Gewinde
$\mu_K$	Reibzahl der Kopf/Mutternaufgabe
$\varphi$	Kegelwinkel des Verspannungskörpers

**Formelzeichen aus [6] oder im direkten Zusammenhang stehend:**

$a_{\text{äq}}$	Seitenlänge eines Quadrates mit äquivalenter Fläche zum $A_S$
$a_{d,m}$	Konstante für $K_{d,m}$
$a_{GH}$	Auslastungsgrad beruhend auf der Gestaltänderungshypothese
$a_{GH}$	Auslastungsgrad beruhend auf der Normalspannungshypothese
$a_{SK}$	Auslastungsgrad der Bauteilfestigkeit im örtlichen Spannungskonzept
$a_{SK,x}$	Auslastungsgrad der Bauteilfestigkeit im Nennspannungskonzept mit Zusatz der Spannungsart („z“ Zug/Druck; „b“ Biegung; „t“ Torsion, „S“ Schub)
$a_{SK,sv}$	Vergleichsauslastungsgrad
$A_N$	Werkstoff Normwert von der Bruchdehnung
$d_{\text{eff}}$	effektiver Durchmesser
$f_{el}$	elastische Grenzlast
$f_{pl}$	vollplastische Traglast
$f_R$	Verfestigungsfaktor
$f_\sigma$	Druckfestigkeitsfaktor
$f_\tau$	Schubfestigkeitsfaktor
$h$	Mehrachsigenigkeitsgrad
$I_{AS}$	Flächenträgheitsmoment 2. Grades im Spannungsquerschnitt
$j$	Sicherheitsfaktor

$j_F$	Teilsicherheitsfaktor Material
$j_G$	Teilsicherheitsfaktor für zugelassene Fehler bei Gussbauteilen
$j_{ges}$	Gesamtsicherheitsfaktor
$j_m$	Sicherheitsfaktor für $R_m$ bei Normaltemperatur oder kurzzeitig höherer Temperatur
$j_{mt}$	Sicherheitsfaktor für die Zeitstandfestigkeit (bei langzeitiger höherer Temperatur)
$j_p$	Sicherheitsfaktor für $R_p$ bei Normaltemperatur oder kurzzeitig höherer Temperatur
$j_{pt}$	Sicherheitsfaktor für die Zeitdehngrenze (bei langzeitiger höherer Temperatur)
$j_s$	Teilsicherheitsfaktor Last
$\Delta_j$	Teilsicherheitssummand für nichtduktilen Gusswerkstoff
$K_A$	Anisotropiefaktor
$K_{d,A}$	technologischer Größenfaktor für die Bruchdehnung
$K_{d,m}$	technologischer Größenfaktor für die Zugfestigkeit
$K_{d,p}$	technologischer Größenfaktor für die Streckgrenze
$K_p$	Plastische Formzahl
$K_{T,m}$	Temperaturfaktor für die Warmfestigkeit
$K_{T,p}$	Temperaturfaktor für die Warmdehngrenze
$K_{Tt,m}$	Temperaturfaktor für die Zeitstandfestigkeit
$K_{Tt,p}$	Temperaturfaktor für die Zeitdehngrenze
$n_{pl}$	plastische Stützzahl
$q$	Konstante für $a_{SK,Sv}$
$R_{m,N}$	Werkstoff Normwert von $R_m$
$R_{p,N}$	Werkstoff Normwert von $R_p$ in den Werkstofftabellen zum Teil mit $R_{e,N}$
$s$	Summe aller Auslastungsgrade der Normalspannungen für $a_{GH,NH}$
$s_{B1}$	Blechstärke des Bauteil 1
$S_{AS}$	Statisches Flächenmoment im Spannungsquerschnitt
$S_{zd}$	Zug - / Druckspannung
$S_b$	Biegespannung (gegebenenfalls zusätzlicher Index der Raumrichtung)

$S_{SK,x}$	statische Bauteilfestigkeit Normalspannungen (zumeist mit zusätzlichem Index für die Spannungsart)
$t$	Summe aller Auslastungsgrade der Torsionsspannungen für $a_{GH,NH}$
$T_s$	Schubspannung (gegebenenfalls zusätzlicher Index der Raumrichtung)
$T_t$	Torsionsspannung
$T_{SK,x}$	statische Bauteilfestigkeit Schubspannungen (zumeist mit zusätzlichem Index für die Spannungsart)
$\epsilon_{ertr}$	Ertragbare Dehnung
$\epsilon_{ref}$	Referenzdehnung
$\sigma_H$	Hydrostatische Spannung
$\sigma_{SK}$	statische Bauteilfestigkeit
$\sigma_v$	Vergleichsspannung
$\sigma_{1,2,3}$	Hauptspannungen in den jeweiligen kartesischen Raumrichtungen x, y und z

#### Formelzeichen aus [7], [8] und [9]:

$A_{gv}$	Schubbeanspruchte Bruttoquerschnittsfläche
$A_{nt}$	Zugbeanspruchte Nettoquerschnittsfläche
$A_{net}$	Nettoquerschnittsfläche
$A_{nv}$	Schubbeanspruchte Nettoquerschnittsfläche
$d$	Nenndurchmesser der Schraube
$d_0$	Lochdurchmesser
$e_x$	mit Index „1“ Randabstand von Lochmitte zum Bauteilrand in Kraftrichtung; mit Index „2“ Randabstand von Lochmitte zum Bauteilrand quer zur Kraftrichtung
$F_{b,Rd}$	Bemessungswert der Lochleibungstragfähigkeit einer Schraube bzw. $\sum F_{Rd}$ als Bemessungswert der Tragfähigkeit der Verbindungsmittelgruppe
$F_{t,Ed}$	Bemessungswert der einwirkenden Zugkraft auf eine Schraube
$F_{t,Rd}$	Bemessungswert der Zugtragfähigkeit einer Schraube
$f_u$	Nennwert der Zugfestigkeit
$f_{ub}$	Nennwert der Schraubenzugfestigkeit
$F_{v,Ed}$	Bemessungswert der einwirkenden Abscherkraft einer Schraube

$F_{v,Rd}$	Bemessungswert der Abschertragfähigkeit bzw. $\sum F_{Rd}$ als Bemessungswert der Tragfähigkeit der Verbindungsmittelgruppe
$f_y$	Streckgrenze allgemein
$k_1$	abmessungsbezogener Beiwert für Bemessungswert der Lochleibungstragfähigkeit einer Schraube
$k_m$	werkstoffbezogener Abminderungsbeiwert für die Lochleibungstragfähigkeit einer Schraube
$N_{Ed}$	Bemessungswert der einwirkenden Zugkraft
$N_{t,Rd}$	Bemessungswert der Zugbeanspruchbarkeit eines Querschnitts
$N_{u,Rd}$	Bemessungswert der Zugbeanspruchbarkeit eines Querschnitts unter Berücksichtigung der Löcher
$p_x$	mit Index „1“ Lochabstand von Lochmitte zu Lochmitte in Krafrichtung; mit Index „2“ Lochabstand von Lochmitte zu Lochmitte quer zur Krafrichtung
$t_x$	Blechdicke, mit Index „pp“ Dicke von Futterblechen
$V_{eff,1,Rd}$	Widerstand gegen Blockversagen
$\alpha_x$	Beiwert mit Index „v“ für den Bemessungswert der Abschertragfähigkeit einer Schraube; mit Index „b“ für den Bemessungswert der Lochleibungstragfähigkeit mit Index „d“ zur Unterscheidung Randschrauben bzw. innenliegende Schrauben
$\beta_p$	Abminderungsbeiwert der Abschertragfähigkeit
$\gamma_{M0}$	Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchbarkeit von Querschnitten
$\gamma_{M2}$	Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchbarkeit von Querschnitten auf Zug gegenüber Bruchspannung

# 1 Einleitung

## 1.1 Allgemeines

Scher-Lochleibungsverbindungen sind für den Maschinenbau atypisch, da in dieser Ingenieursdisziplin überwiegend mit dynamischen Belastungen, an den nachzuweisenden Schraubenverbindungen, zu rechnen ist [10]. Daher werden in der Regel die Querkraftbeanspruchungen durch Reibung in der Trennfuge der verbundenen Bauteile aufgenommen, oder durch andere geeignete Maßnahmen übertragen, sodass die Schraube nicht auf Abscherung beansprucht wird. Die Scherbeanspruchung wird durch eine maximal zugelassene Kraft begrenzt damit der Formschluss gewährleistet bleibt und so auch die Schraube, wie in [5] beschrieben, gleichzeitig auf Abscherung nachgewiesen ist.

Der Stahlbau sieht hingegen eine klare genormte Nachweisführung, explizit für die Scher-Lochleibungsverbindung vor.

Daher wird in der vorliegenden Arbeit der rechnerische Nachweis für eine Scher-Lochleibungsverbindung nach der Eurocode 3 Norm EN 1993-1-8 erbracht.

Im Vergleich dazu wird die Verbindung mit der FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis“ bewertet.

Da Elemente vom (statischen) Stahlbau auch im Maschinenbau vorhanden sind, ist eine Untersuchung ausgewählter Kapitel aus dem Eurocode 3 und den Richtlinien welche dem Maschinenbau zur Verfügung stehen allgemein durchaus berechtigt. Als Beispiel einer direkten Überschneidung sei hier die vierteilige Normenreihe EN ISO 14122 „Sicherheit von Maschinen - Ortsfeste Zugänge zu maschinellen Anlagen“ insbes. EN ISO 14122-2. Hier können auch am ehesten Scher – Lochleibungsverbindungen vorkommen.

## 1.2 Zielsetzung

Als Ziel der vorliegenden Arbeit sei der Vergleich der beiden Nachweisführungen anhand einer Scher-Lochleibungsverbindung genannt sowie die Diskussion der jeweiligen Ergebnisse. Da im Anwendungsbereich der FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis“ eine Gültigkeit zur Bewertung Schraubenverbindungen nicht vorgesehen ist, wie in [6, S.9] beschrieben ist, soll hier durch den Vergleich mit der Stahlbaunorm ein mögliches Potential für eine gemeinsame anerkannte Richtlinie gezeigt werden bzw. ein mögliches Potential zum Ausweiten des Gültigkeitsbereich der FKM-Richtlinie.

### 1.3 Abgrenzung

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind nur auf die in Kapitel 3.1 aufgeführten Randbedingungen und rein statische Beanspruchung zu beziehen. Eine bereits allgemeingültige Aussage kann und darf ohne weitere Untersuchungen nicht getroffen werden.

An dieser Stelle wird angemerkt, dass die vorliegende eine parallele im Aufbau und Themengebiet zu der Forschungsarbeit [11] aufweist. Allerdings behandelt die soeben angeführte Abhandlung ausschließlich den Ermüdungsfestigkeitsnachweis nach der FKM-Richtlinie und der Eurocode 3 Norm. Wohingegen die vorliegende Diplomarbeit ausschließlich den statischen Nachweis und sowohl die Bauteile als auch die Schraube als solches mit Hilfe der beiden Richtlinien beurteilt.

Das Hauptaugenmerk liegt im Vergleich zwischen der FKM-Richtlinie und dem Eurocode 3. Nicht aber zwischen der Entwurfsversion und der aktuellen Version von der EN 1993-1-8. Es wird zwar zeitweise auf den Unterschied eingegangen und zu offensichtlichen Abweichungen Stellung bezogen, jedoch werden diese nicht im Detail und mögliche Auswirkungen auf Stahlkonstruktionen diskutiert.

Weiters kann diese Arbeit von der Masterarbeit [12] abgrenzt werden. Bei [12] liegt das Hauptaugenmerk auf der reinen Bewertung mittels FEA von Scher-Lochleibungsverbindungen ohne weitere Beurteilung durch Vergleiche mit unterschiedlichen Richtlinien.

Der Luft- und Raumfahrtbereich sowie der Fahrzeugbau einschließlich Schienen- und Wasserfahrzeuge ist ebenfalls von dieser Arbeit abzugrenzen.



## 2 Theoretische Grundlagen

In den theoretischen Grundlagen werden zunächst die verwendeten Richtlinien bzw. Methode für die Nachweisführung näher betrachtet und die Scher-Lochleibungsverbindung genauer erläutert.

### 2.1 Die Finite Elemente Methode

Die Finite Elemente Methode ist vor allem unter ihrem Kürzel „FEM“ bekannt. Die FEM ist eine numerische Lösungsmethode die es ermöglicht komplexe Aufgabenstellungen der Mechanik zu lösen. Es ist unmöglich die gesamte Theorie und Mathematik der FEM in der vorliegenden Arbeit darzustellen. Daher wird nur Augenmerk auf die grundlegende Idee und Funktion gelegt. Gleiches gilt für die spezielle Problematik der nicht linearen FEM die bei dem vorliegenden Beispiel auftritt.

#### 2.1.1 Grundgedanke der FEM

Die Idee hinter der Methode ist, komplexe Bauteilgeometrien in eine endliche Anzahl von Elementen einfacher Körper zu unterteilen. Wie in [13, S.70] beschrieben, werden für Probleme der ersten Dimension Balkenelemente verwendet. Für die zweite Dimension, also für flächige Objekte, sind finite Elemente aus Vierecken bzw. Dreiecken die gängige Wahl. Für Volumenkörper im dreidimensionalen Raum werden Tetraeder- bzw. Hexaederelemente verwendet.

Nach [13] hat sich für die FEM die Matrizenrechnung etabliert und baut grundsätzlich auf allgemeinen Lösungsmethoden wie zum Beispiel dem Prinzip der virtuellen Verschiebungen und der Tensoralgebra auf. Diese Methoden werden an jedem einzelnen finiten Element angewandt. Um das gesamte Bauteil betrachten zu können, muss wie in [13, S.77] beschrieben, die Gesamtanzahl der einzelnen finiten Elemente vereinigt werden und unter Miteinbeziehen von entsprechenden Randbedingungen entsteht ein herkömmliches, algebraisches Gleichungssystem mit  $n$ -Gleichungen welches eine eindeutige Lösung besitzt. Aus den dann bekannten Knotenverschiebungen können die Größen der Spannung, Verzerrung und Verschiebung je Element ermittelt werden, wie in [13] beschrieben.

## 2.1.2 Nichtlineare FEM

Im Gegensatz zu den in 2.1.1 kurz beschriebenen Hintergrund der linearen FEM-Berechnung, stellen Kontaktbedingungen und große Verformungen sogenannte nichtlineare Probleme dar.

Im allgemeinen wird von einem nichtlinearen Problem gesprochen, sobald eine der folgenden drei Bedingungen nach [14, S.15] nicht mehr erfüllt ist:

- kleine Dehnungen
- kleine Rotationen
- Gleichgewicht am unverformten System

Sobald dies der Fall ist muss bei der FEA die nichtlineare Berechnungsmethode angewandt werden.

Die großen Verformungen treten in der vorliegenden Arbeit bei der Ermittlung der vollplastischen Traglast auf. Da hier über den linearen Bereich hinausgegangen werden muss.

Ein weiteres nichtlineares Problem sind die Berührstellen zwischen den Bauteilen und Verbindungsmittel. Diese sogenannten Kontakte treten sowohl in den Fugen zwischen den Bauteilen auf, als auch bei dem Lochleibungskontakt zwischen Bauteil und Verbindungsmittel. In beiden Fällen wollen sich die Körper durch den Kräfteinfluss von Vorspannkraft und einwirkende Last im Modell durchdringen. In der Realität ist das nicht möglich, da bei Berührung und Lasteinwirkung sich die Körper verformen.

Dies muss dem FEM-Programm allerdings erst beigebracht werden. Das geschieht über die Definition der Kontaktbedingungen. ANSYS findet die Kontakte automatisch, jedoch müssen diese gegebenenfalls angepasst werden.

Die folgenden Bedingungen, welche in [14, S.255] beschrieben sind, gelten allgemein als Kontaktsituation nach:

- Ein Körper trifft auf einen anderen Körper und beide werden deformiert.
- Ein Körper trifft auf eine starre Fläche wobei nur der Körper deformiert wird.
- Unterschiedliche Bereiche von ein und demselben Körper berühren sich.

Dies sind die drei grundsätzlichen Kontaktsituationen die unterschieden werden können.

Es gibt nach [14, S.260-278] mehrere Algorithmen für das Programm um die Kontaktbedingungen zu formulieren. Die zur Verfügung stehenden Algorithmen haben gemeinsam, dass sie den Ansatz für das statische Gleichgewicht über die potentielle Energie verfolgen. Wie aus [14] hervorgeht ist das statische Gleichgewicht erreicht, sobald die potentielle Energie minimal ist. Das heißt die Kontaktkräfte werden über die Erweiterung der Energieerhaltung ermittelt.

Die Methoden die in dieser Arbeit kurz vorgestellt werden sind die Penalty-Methode, Langrange-Multiplikator-Verfahren und das Augmented-Lagrange-Verfahren.

Die Penalty-Methode, sowie in [14, S260-262] ausgeführt, basiert auf der Idee, wenn die Bedingung der minimalen Energie nicht erfüllt ist, diese zu erhöhen. Dies geschieht durch Addition einer Federenergie als derer Federkonstante, der sogenannte Penalty-Parameter. Daher leitet sich auch der Name ab, da dieser Term als Strafe für die Nichterfüllung der minimalen potentiellen Energie hinzugefügt wird. Allerdings würde die Kontaktbedingung nur dann wieder vollständig erfüllt sein, wenn der Penalty-Parameter gegen unendlich strebt (also ideal starr und keine Verformung bzw. Durchdringung möglich). Das ist aber numerisch betrachtet nicht möglich. Dieses Defizit heißt, dass eine gewisse gegenseitige Durchdringung der Körper in Kauf genommen wird [14]. Jedoch hat sich in der Praxis gezeigt, dass für den Penalty-Parameter ein endlicher Wert ohnehin ausreichend ist [14]. Über einsetzen in das Gleichungssystem der Penalty-Methode kann dann die Kontaktkraft ermittelt werden [14].

Beim Langrange-Multiplikator-Verfahren, welche in [14, S.263] beschrieben wird, wird in die Energiegleichung wie bei der Penalty-Methode ein weiterer Term eingeführt. Der Lagrange-Multiplikator entspricht dabei der neuen Unbekanntem, über die Ableitung nach dieser Unbekanntem ist dann eine zusätzliche Gleichung definiert [14]. Danach kann das Gleichungssystem aufgelöst werden. Beim Auflösen dieses Gleichungssystems ergibt sich der Lagrange-Multiplikator als die Kontaktkraft [14].

Das Augmented-Lagrange-Verfahren stellt, wie der Name sagt, eine Erweiterung zum Langrange-Multiplikator-Verfahren dar. In [14, S.276-278] wird das Augmented-Lagrange-Verfahren als eine Zusammenführung der beiden soeben vorgestellten Methoden dargestellt. Wie in [14] weiter ausgeführt wird, liegt der Vorteil gegenüber dem Langrange-Multiplikator-Verfahren bei einem besseren Konvergenzverhalten. Gegenüber der Penalty-Methode, dass die Kontaktsteifigkeit klein gehalten und die Durchdringung ausreichend beschränkt werden kann [14]. Jedoch stellt das Augmented-Lagrange-Verfahren einen höheren Rechenaufwand dar [14].

Für die Zuordnung des Kontaktbereich wird zwischen Master- und Slavekörper oder auch Ziel- und Kontaktkörper unterschieden [14]. Die Bezeichnungen können von Programm zu Programm unterschiedlich gewählt sein. ANSYS verwendet Ziel- bzw. Kontaktkörper. Für die Definition welcher Körper der Kontakt- bzw. als Zielkörper formuliert werden soll, gibt es ein paar Grundregeln welche nach [14, S.291–293] angewandt werden können:

- Die feiner vernetzte Fläche wird als Slave definiert
- die weniger gekrümmte, konkave oder ebene Fläche wird als Slave definiert
- Der Körper mit dem steiferen Material wird als Slave definiert
- Bei übereinander liegenden Körpern wird der Körper der über den zweiten Körper hinaus ragt als Master definiert

Da die Grundregeln je nach Situation gegebenenfalls im Widerspruch zueinander stehen können, gibt es die Möglichkeit der symmetrischen Betrachtung, das heißt beide Kontaktpartner werden vom Analyseprogramm einmal als Master und einmal als Slave betrachtet.

Da jetzt die wesentlichen Lösungsansätze und die Wahl des Ziel- und Kontaktkörpers beschrieben wurden, werden folgend noch ein paar Ansätze vorgestellt für um Konvergenz erzielen zu können.

Dies kann nach [14, S.296-301] zum einen über die Kontaktsteifigkeit versucht werden. Das heißt es kann probiert werden, die Elemente welche im Kontakt zueinander stehen steifer zu gestalten als die umgebenden Elemente. Allerdings ist es nicht möglich die geeignete Kontaktsteifigkeit für alle zu untersuchenden Bedingungen von Beginn der Analyse zu finden. Der Grund ist, dass sich durch Kontakt bzw. auch durch große Verformung das Steifigkeitsverhalten ändert. ANSYS bietet die Möglichkeit dies über einen Faktor zu steuern.

Zum anderen kann eine Eindringtoleranz gewählt werden um eine bessere Konvergenz zu erhalten.

Wie bei jeder FEA sind auch eine geeignete Vernetzung und Randbedingungen umgänglich um ein hinreichend genaues Ergebnis zu erreichen, insbes. bei den Kontaktbereichen sollte nach [14, S.301] eine feinere Vernetzung erfolgen, da damit die Kontaktkraft kleiner quantifiziert ist und so die Konvergenz, über somit erreichte langsamere Ausbreitung der Kontaktkraft in der Kontaktzone, verbessert werden kann.

Neben der Konvergenz muss auch eine effektive Kontaktsuche durch das Programm erfolgen. Dies kann unter anderem über den in [14, S.306-307] beschriebenen Pinball Algorithmus erreicht werden. Die Idee dahinter ist eine Kugel (Pinball) welche um die Kontaktpunkte gebildet wird, alle Punkte außerhalb dieser Kugel werden als weit entfernt betrachtet und können somit nicht auf der Oberfläche liegen [14]. Diese Punkte werden auch nicht berechnet. Es muss sichergestellt sein, dass der Radius so gewählt wird, dass Punkte hinter der Kontaktfläche (also im Bauteil) nicht hineinfallen, da diese ansonsten als falscher Kontakt festgestellt werden, wie in [14] beschrieben.

## 2.2 Die FKM-Richtlinie

Die FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“ existiert seit dem Jahr 1994. Wie in [6, S.3] beschrieben ist die Richtlinie gemeinsam mit der Arbeitergemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ und dem Forschungskuratorium Maschinenbau e.V., von dem sich die Abkürzung FKM herleitet, aus den TGL-Standards, der Richtlinie VDI 2226 und diversen weiteren technischen Dokumenten entwickelt worden.

Die aktuelle 7. Auflage der FKM-Richtlinie ist im Jahr 2020 neu bearbeitet und aufgelegt worden. Die Richtlinie bietet die Möglichkeit geschweißte als auch nicht geschweißte, sowie überwiegend statische und dynamische belastete Bauteile zu bewerten.

Zusätzlich wird zwischen den Nachweisen mit Nennspannungen und örtlichen Spannungen unterschieden. Bei ersteren können die Spannungen im Nachweispunkt mit herkömmlichen analytischen Methoden berechnet werden, wohingegen beim Konzept mit den örtlichen Spannungen eine FEA erforderlich ist. Beim Konzept mit den Nennspannungen sieht [6] im statischen Festigkeitsnachweis Einschränkungen in der Anwendung bei den Materialeigenschaften vor. So muss der Werkstoff eine Bruchdehnung von  $\geq 6$  Prozent aufweisen und die Formzahl für geometrische Kerben darf nicht größer als 5 sein. Sofern der Nachweispunkt nicht sinnvoll als geometrisch definierbarer Querschnitt dargestellt werden kann, sollte ebenfalls mit dem örtlichen Spannungskonzept gearbeitet werden. Ansonsten ist das Konzept frei wählbar.

## 2.2.1 Der Gültigkeitsbereich der FKM – Richtlinie

Wie aus [6] entnommen werden kann, ist die Richtlinie im Maschinenbau und verwandten Industriezweigen gültig. Sie gilt für Erzeugnisse aus Eisen- bzw. Aluminiumwerkstoffen. Die in [6, S.9] für die Gültigkeit einzuhaltenden Anforderungen an die Bauteile, werden in der folgenden Tabelle dargestellt.

**Tabelle 1: Erforderliche Parameter um die Gültigkeit der FKM-Richtlinie zu gewährleisten, eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

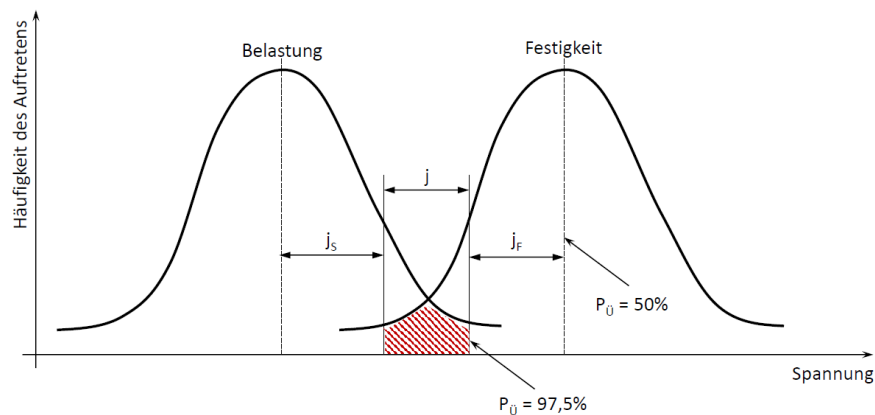
Bauteilparameter	Herstellparameter	Materialparameter
geometrische Kerben	Walzen	max. $R_m = 1400$ MPa für Stahl und Eisenguss
-40°C bis 500°C Stahl	Schmieden	max. $R_m = 640$ MPa für Aluminium
-25°C bis 500°C Eisen-gusswerkstoff	Gießen	Walz - und Schmiedestahl, auch nichtrostend, für Eisenguss -, Aluknet- und gusswerkstoff
-25°C bis 200°C Aluminiumwerkstoff	spanende Bearbeitung	Umgebungsmedium nicht korrosiv
statisch beansprucht	Lichtbogengeschweißt	
dynamisch beansprucht $\geq 10^4$ Zyklen einstu- fen- oder kollektivbeansprucht	Laser-/Elektronenstrahlge- schweißt	
	Laserstrahl-MSG-Hybridge- schweißt	
	Widerstandspunkt-/rollnaht- geschweißt	

## 2.2.2 Sicherheitskonzept der FKM-Richtlinie

Wie in [6] ersichtlich, arbeitet die FKM-Richtlinie mit dem Konzept einer Überlebenswahrscheinlichkeit ( $P_U$ ) von 97,5 Prozent bei den Festigkeitskennwerten des Materials. Dabei ist es eine Voraussetzung, dass die Lastannahmen als ausreichend sicher angenommen werden. Die Richtlinie widmet den Grundlagen der sicheren Lastannahme auch ein eigenes Kapitel.

Wie in [6, S.76] erwähnt wird der Gesamtsicherheitsfaktor ( $j$ ) als Produkt des Teilsicherheitsfaktors für die ertragbare Spannung als sogenannter Materialfaktor ( $j_F$ ) und des Teilsicherheitsfaktors für die vorhandene Spannung als sogenannter Lastfaktor ( $j_S$ ) errechnet.

Die folgende Skizze zeigt das Sicherheitskonzept der FKM-Richtlinie:



**Abbildung 3: Skizze des Sicherheitskonzeptes der FKM-Richtlinie, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 in Anlehnung nach [4, S.117]**

Die skizzierte Grafik kann folgendermaßen interpretiert werden. Es werden die beiden Kurven getrennt voneinander betrachtet und als normalverteilt um einen Mittelwert der Spannung bezgl. Festigkeit und Belastung angenommen. Da die maximale auftretende Belastung stets unterhalb der maximalen Festigkeit des Bauteils liegen muss, liegen 50 Prozent der Spannungswerte unterhalb des Erwartungswertes, um auch die gefährlicheren 50 Prozent die über den erwarteten Maximalwert liegen abzufangen wird der Faktor  $j_S$  an den Erwartungswert hinzugerechnet. In [6] ist bei ausreichend sichere Lastannahme der Faktor  $j_S$  mit 1 anzusetzen. Das würde die 50 Prozent unter dem Erwartungswert und im Fall einer Normalverteilung einmal der Standardabweichung über dem Erwartungswert entsprechen.

Bei der Festigkeitskurve verhält es sich ähnlich nur ist es durch  $j_F$  festgelegt, dass statisch 97,5 Prozent der Bauteile die aufgebrauchte Prüflast aus einer Materialprüfung nicht versagen.

Der Faktor  $j$  deckt die Überschneidung der beiden Kurven ab, hier **rot** schraffiert, liegen trotz aller Sorgfalt, die noch möglichen Ausfälle durch Versagen der Bauteile.

## 2.3 Die EN 1993-1-8 aus dem Eurocode 3

### 2.3.1 Der Eurocode in Österreich

Die erste Generation der heutigen Eurocodes fand den Anfang in den 1990er-Jahren. Vorerst wurde die Anwendung in Österreich der damals insgesamt 62 Teilen der sogenannten europäischen Vornormen nur empfohlen [15].

Ende der 1990er-Jahre wurden die ENV überarbeitet und erlangten nach und nach den Status einer europäischen Norm. Die ersten der insgesamt 58 Teile erschienen 2003 und das gesamte Paket war mit 2008 verfügbar [15].

Ende Juni 2009 war die Übergangsfrist zur Einführung der Eurocodes in Österreich verstrichen und nationale Regelungen mussten überarbeitet bzw. außer Kraft gesetzt werden [15].

**Tabelle 2: Tabellarische Übersicht der Eurocodes, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 nach [15]**

<b>EN 1990</b>	Eurocode 0	Grundlagen der Tragwerksplanung
<b>EN 1991</b>	Eurocode 1	Einwirkungen auf Tragwerke
<b>EN 1992</b>	Eurocode 2	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Stahlbetonbauten
<b>EN 1993</b>	Eurocode 3	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Stahlbauten
<b>EN 1994</b>	Eurocode 4	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Stahl-Beton-Verbundbauten
<b>EN 1995</b>	Eurocode 5	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauten
<b>EN 1996</b>	Eurocode 6	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Mauerwerksbauten
<b>EN 1997</b>	Eurocode 7	Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik
<b>EN 1998</b>	Eurocode 8	Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben
<b>EN 1999</b>	Eurocode 9	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Aluminiumkonstruktionen

### 2.3.2 Die EN 1993-1-8

Die EN 1993-1-8 aus dem Eurocode 3 für Stahlbau ist aus dieser Normenreihe eine von 20 Normen wie aus [16] entnommen werden kann. Diese Norm behandelt Gestaltungs- und Bemessungsregeln von Anschlusskonstruktionen im Stahlbau. Die Bemessungsregeln umfassen neben der Schraubenverbindung auch Niet- und Schweißverbindungen sowie allgemeine Regelungen.



Die aktuell, noch gültige Fassung, der Norm ist vom Dezember 2010. Es ist allerdings bereits der überarbeitete Normenentwurf vom März 2021 beispielsweise bei der Beuth Verlag GmbH bestellbar.

### 2.3.3 Der Gültigkeitsbereich der EN 1993-1-8

Die Norm beinhaltet die Regeln für den Entwurf, die Berechnung und die Bemessung für Anschlüsse aus Stahl der Stahlsorten S235 bis inklusive S700 unter vorwiegend ruhender Beanspruchung wie aus [9, S.11] entnommen werden kann. In [7] der aktuellen Fassung sind nur folgende Stahlsorten enthalten:

**Tabelle 3: Übersicht der vertretenen Stahlsorten in der aktuellen Fassung [7], eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

<b>S235</b>	Stahlsorten mit einer Streckgrenze von 235 MPa
<b>S275</b>	Stahlsorten mit einer Streckgrenze von 275 MPa
<b>S355</b>	Stahlsorten mit einer Streckgrenze von 355 MPa
<b>S420</b>	Stahlsorten mit einer Streckgrenze von 420 MPa
<b>S450</b>	Stahlsorten mit einer Streckgrenze von 450 MPa
<b>S460</b>	Stahlsorten mit einer Streckgrenze von 460 MPa

Sowohl in [9] als auch in [7] werden auf andere Normen Bezug genommen. Diese müssen im gegebenen Fall für die Gültigkeit der Anwendung zusätzlich berücksichtigt werden. Dies betrifft zum Beispiel Normen für die Anforderungen an die Lieferbedingungen für Stahlerzeugnisse oder in der neueren Fassung [9] wird bereits auf die Normenreihe EN 1090 verwiesen.

## 2.4 Die Scher- Lochleibungsverbindung

Generell werden Schraubenverbindungen im EC3, je nach erforderlichem Tragverhalten in unterschiedliche Kategorien eingeteilt, welche im späteren Verlauf der Arbeit noch kurz erläutert werden. Die untersuchte Scher – Lochleibungsverbindung fällt unter Kategorie A und wird folgend mit SLV abgekürzt. Dabei können die Verbindungen mit Schrauben als auch mit Bolzen oder Vollnieten ausgeführt werden. Wie [17] zeigt wird daran geforscht, Verbindungen dieser Art auch mit Blindnieten auszuführen.

Im Allgemeinen werden SLV wie in [17] erwähnt in einschnittige oder zweisechnittige (bzw. mehrschnittige) Verbindungen eingeteilt.

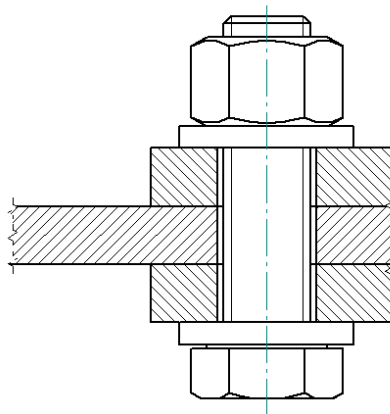
Wie in [10] beschrieben sind SLV nicht mit einem definierten Drehmoment vorgespannt, sondern lediglich „handfest“ angezogen. Die SLV findet sich im Stahl- und Luftfahrzeugbau häufig wieder. Wie bereits erwähnt stellt diese Verbindung für den Maschinenbau

eine atypische Variante dar. Normalerweise werden im Maschinenbau Querbeanspruchungen über Reibschluss übertragen oder beispielsweise über Passstifte aufgenommen insbes. bei wechselnder Beanspruchung. Andernfalls ist ein Nachweis gegen Abscherung erforderlich, dazu bietet beispielsweise die VDI 2230 einen passenden Ansatz.

Für die vorliegende Arbeit wird eine zweiseitige SLV näher betrachtet.

Daher wird folgend nur die Theorie einer solchen SLV näher erläutert.

Die nachfolgende Grafik zeigt die unbelastete Scher- Lochleibungsverbindung.



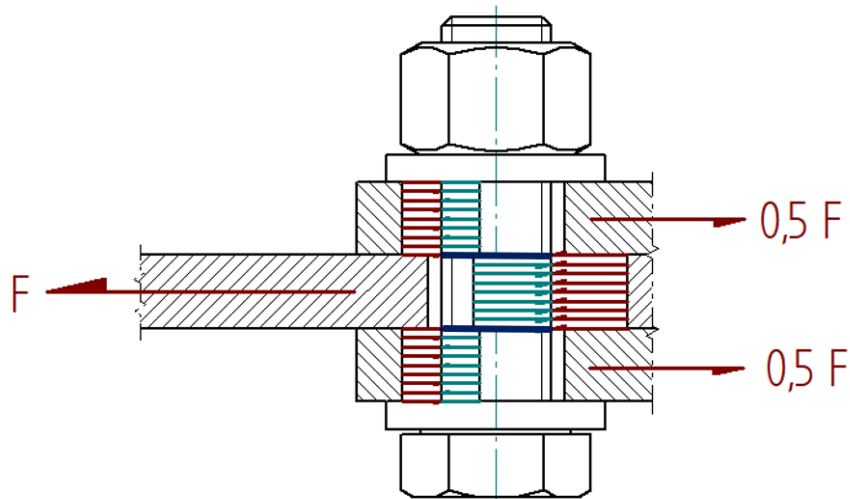
**Abbildung 4: Unbelastete Scher- Lochleibungsverbindung, eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

Wie vorher erwähnt sind SLV handfest angezogen, das bedeutet die Schraube erfährt nur eine minimale Zugbelastung und die Klemmkraft der einzelnen Bauteile ist überschaubar.

Das folgende Zitat aus [18, S.66] unter Anmerkung 2 definiert „handfest“ wie folgt: *„Unter dem Begriff „handfest“ kann im Allgemeinen der Zustand verstanden werden, der von einer Person mit einem Schraubenschlüssel normaler Größe ohne Verlängerung erreicht werden kann. Er kann auch als der Arbeitspunkt angesetzt werden, an dem ein Schlag-schrauber zu hämmern beginnt.“*

Wird nun eine Kraft  $F$ , welche Größer ist als der Reibschluss der oben gezeigten Verbindung, so beginnen sich die Bauteile gegeneinander zu verschieben. (Da nur tragende Bauteile betrachtet werden, bleibt die Unterlegscheibe im folgenden Verlauf unberücksichtigt).

An den Lochwänden der Bauteile entsteht der Lochleibungsdruck. Da nach dem dritten Newton'schen Axiom eine jede Reaktion auch eine Gegenreaktion erfordert, erfährt die Schraube den entgegengesetzten Druck. Die Interaktion wird in der folgenden Grafik gezeigt.



**Abbildung 5: Belastete Scher- Lochleibungsverbinding; eigene Darstellung G. Reisinger 2023 in Anlehnung an [10]**

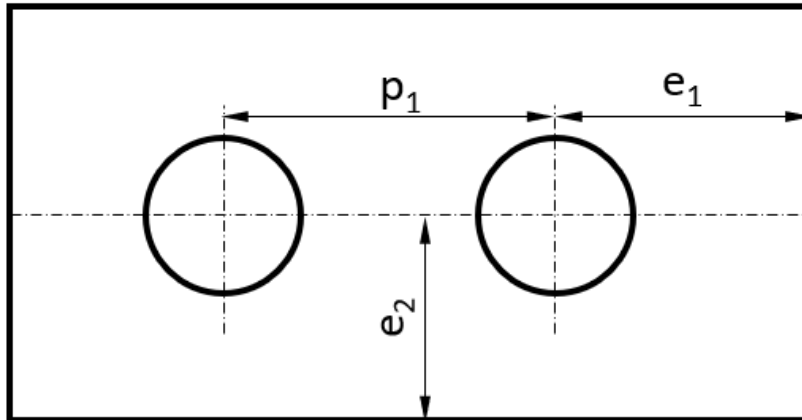
Es ist für eine ausreichende Stützung der Bauteile bzw. der Schraube zu sorgen um eine Schrägstellung zu vermeiden. Ansonsten kann es zur mehrachsigen Beanspruchung der Bauteile bzw. Schraube kommen. Eine Schrägstellung hätte auf die Tragfähigkeit nach [10, S.386] sogar einen positiven Einfluss, da sich der Scherquerschnitt erhöht. Allerdings für die Bewertung und Ausführung sollen dennoch die charakteristischen Querschnittswerte maßgebend und die Konstruktion möglichst darauf gerichtet sein die Randbedingungen einer mit den charakteristischen Werten zu Grunde gelegten Berechnung umzusetzen.

Die in der Grafik sichtbaren dunkelblauen Linien stellen die Scherflächen dar. Diese verlaufen entlang der Trennfugen. Gemäß dem Kräftegleichgewicht teilt sich die Kraft  $F$  gleichmäßig auf die beiden verbleibenden Bauteile auf und entsprechen betragsmäßig die Hälfte der aufgebrachten Kraft. Dies wird auch in [10] in ähnlicher Weise beschrieben.

Wie die Abbildung ebenfalls zeigt, ist bei gleicher Bauteildicke in der Zugstange, welche mit  $F$  belastet ist, die zu erwartende Lochleibung doppelt so groß wie in denen mit der halben Kraft. Dies bedeutet im Umkehrschluss, die beiden Bauteile könnten bei Bedarf dünner ausgeführt werden um alle Bauteile gleichmäßig zu belasten.

In der vorliegenden Arbeit wird darauf geachtet, dass möglichst wenig Versagensmodi auftreten. Genauer gesagt, werden die Bauteile so ausgeführt, dass eine mehrachsige Beanspruchung unter Belastung weitestgehend vermieden wird. Das heißt es wird davon ausgegangen, dass die Bauteildicke im Folgenden als ausreichend dimensioniert angesehen wird und es zu keinen Beul-Effekten wie bei zu dünnen Blech kommt. Daher gibt es drei wesentliche Versagensmodi für die SLV diese sind auch in [17] wieder zu finden. Diese werden Anhand von Zugversuchsbedingungen erklärt. Damit ist gemeint sobald die Rissbildung beginnt, ist das Versagen unausweichlich. Im Gegensatz zu einem zu einem Dauerbruchvorgang.

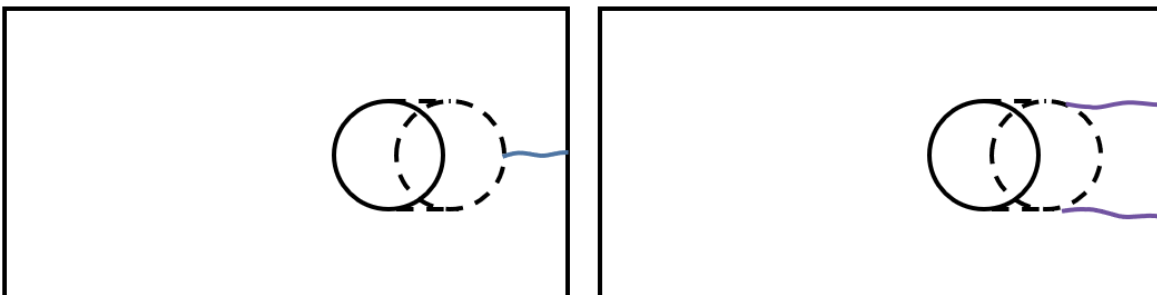
Um die einzelnen gefährdeten Querschnittsbereiche unter zu Hilfenahme von Richtungsbezeichnungen besser beschreiben zu können, werden die Bezeichnungen aus der EN 1993-1-8 verwendet, wie das folgende Bild zeigt.



**Abbildung 6: Bezeichnung der Rand- und Lochabstände, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 nach [7] bzw. [9]**

Wie in [17] erklärt ist es zum Einen das Versagen durch Lochleibung. Das bedeutet, dass sich zuerst die kreisrunde Bohrung zu einem „Langloch“ in Richtung  $e_1$  bzw.  $p_1$  ausweitet (strichlierte Linie in Abbildung 7 und 8). Dabei wird das Material plastisch, also dauerhaft, verformt.

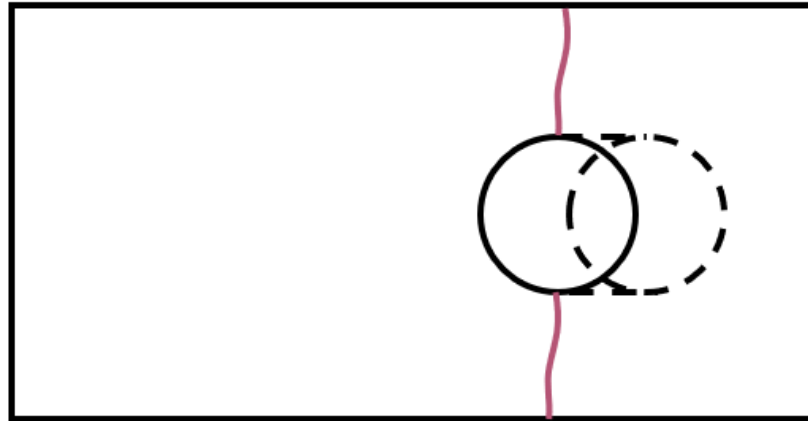
Hierbei kann in Abhängigkeit des Verhältnisses  $e_1$  zum Lochdurchmesser noch zwischen Scherbruch und Biegebruch unterschieden werden, je kleiner das Verhältnis umso eher versagt das Bauteil durch Scherbruch, wie in [12] richtigerweise erwähnt wird.



**Abbildung 7: Schematische Darstellung der Versagensmodi bei zu geringem Randabstand  $e_1$ , eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

Die linke Abbildung zeigt schematisch das erwartete Bruchmuster bei Biegebruch, das rechte Bild die Rissbildung bei Scherversagen.

Zum anderen ist es das Versagen, des Nettoquerschnittes in Richtung  $e_2$ . Das heißt der Randabstand  $e_1$  ist groß genug gewählt, so dass der Querschnitt um  $e_2$  für das Versagen verantwortlich wird. Wie zuvor bildet sich aus dem kreisrunden Bohrloch ebenfalls ein Langloch unter plastischer Verformung, allerdings bleibt der Restquerschnitt im Bereich  $e_1$  ausreichend. Beim Annähern an die Zugfestigkeit reißt das Bauteil an den Einschnürungsstellen (beim kritischen Querschnitt um  $e_2$ ) ein, bis schließlich der Restquerschnitt durch Gewaltbruch nachgibt und die Verbindung somit dauerhaft versagt.



**Abbildung 8: Schematische Darstellung des Versagensmodus bei zu geringem Randabstand  $e_2$ , eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

Neben den Bauteilen, kann auch die Schraube durch Abscherung, entlang der Trennflächen versagen. Die obere Grenze der Verbindung stellt jedenfalls die maximal zulässige Abscherkraft der Schraube dar, auch wenn die Bauteile aus einem schwächeren Material als die Schraube hergestellt sind, muss nicht immer zwangsläufig das Bauteil versagen. Sofern  $e_1$ ,  $e_2$ ,  $p_1$  und die Bauteildicke die Schwäche des Materials in Form von Querschnittvergrößerung kompensieren.

## 3 Nachweisführung

In diesem Kapitel wird die Nachweisführung nach der FKM-Richtlinie und der EN 1993-1-8 durchgeführt. Es wird festgehalten, dass vor allem der Nachweis der EN 1993-1-8 als sogenannter Master für die theoretischen Ergebnisse der Bemessungen angesehen wird. Dies ist zum einen der Tatsache geschuldet, dass die FKM-Richtlinie grundsätzlich keine Bewertung von Schraubenverbindungen zulässt und diese Möglichkeit erst untersucht werden soll, zum anderen der EC3 ein bewährtes Mittel aus dem Stahlbau ist. Wie sich in diesem Kapitel zeigen wird, stellt die FEA auf Grund der zur Verfügung stehenden Ressourcen eine besondere Herausforderung dar. Um die Bemessungen nachvollziehbarer darzustellen wird die nachfolgende Analyse im Anhang nochmals als Fallbeispiel formuliert.

### 3.1 Randbedingungen und Modellierung

Damit auch eine Verbindung mit einer möglichen Verwendung in der Praxis aufgezeigt wird, wird für die Bemessung eine zweischnittige SLV nach dem folgenden Vorbild untersucht.



**Abbildung 9: Zugverband eines Gebäudes im Industriegebiet Keileweg, Rotterdam, Niederlande, eigene Aufnahme G. Reisinger Juli 2022**

Hier handelt es sich um eine offensichtliche Holzkonstruktion und daher werden die Zugstäbe aus Holz durch ein Flachstahlprofil ersetzt.

Die folgende Tabelle listet eine Übersicht der einzelnen Komponenten und grundlegende Beschaffenheiten die sich auch in der späteren Berechnung zum Teil wiederfinden werden.

**Tabelle 4: Übersicht Komponenten und erste Randbedingungen für die Berechnung, eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

	Bauteil 1	Bauteil 2	Schraube	Unterlegscheibe	Mutter
<b>Schraubengröße</b>			M12	für M12	M12
<b>Festigkeitsklasse</b>			8.8U		8
<b>Vorspannung</b>			handfest		handfest
<b>Norm*</b>	EN 10025	EN 10025	DIN EN ISO 4017	DIN EN ISO 7089	DIN EN ISO 4032
<b>Werkstoff</b>	S235JR	S235JR	Spez. lt. Norm	Spez. lt. Norm	Spez. lt. Norm
<b>Oberfläche</b>	feuerverzinkt/trocken	feuerverzinkt/trocken	feuerverzinkt/Grafit	feuerverzinkt/Grafit	feuerverzinkt/Grafit
<b>Reibzahl**</b>	0,2	0,2	0,12	0,12	0,12
<b>Temperatur</b>	22 °C	22 °C	22 °C	22 °C	22 °C
<b>Beanspruchung</b>	ruhend	ruhend	ruhend	ruhend	ruhend
<b>Anzahl</b>	2	2	4	8	4
<b>Länge</b>	130 mm	250 mm	45 mm		
<b>Breite</b>	32 mm	32 mm			
<b>Höhe</b>	8 mm	8 mm			
<b>Randabstand <math>e_1^{***}</math></b>	16 mm	16 mm			
<b>Randabstand <math>e_2^{***}</math></b>	16 mm	16 mm			
<b>Lochabstand <math>p_1^{***}</math></b>	30 mm	30 mm			
<b>Lochdurchmesser <math>d_0^{\\$}</math></b>	13,5 mm	13,5 mm		Spez. lt. Norm	

\* für die Unterlegscheibe kann [3, S.896] für Schraube und Mutter kann [3, S.900-902] eingesehen werden; für die Bauteile gelten die vorgeschriebenen Normen nach [18, S.12]

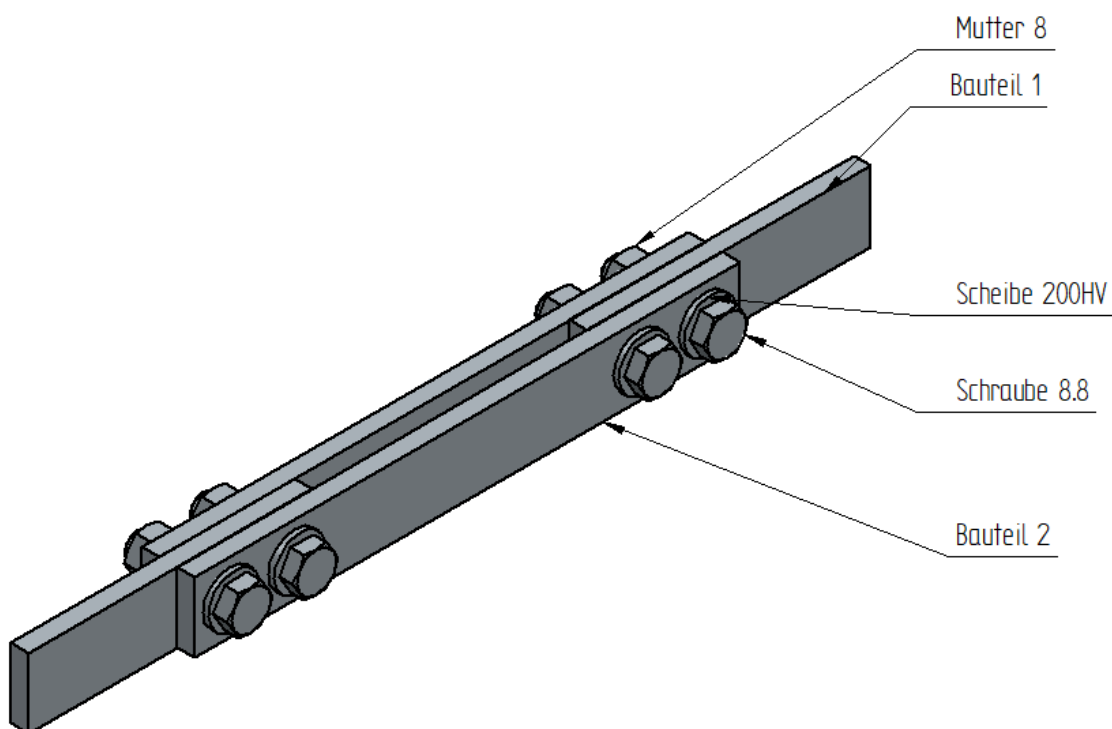
\*\* für die Trennfugen zwischen Kopf-bzw. Mutterauflage, gilt der Mittelwert der Gruppe B und Gruppe D nach [5, S.113] für die restlichen Trennfugen da diese nicht geschmiert sind. Um die FEM Rechnung nicht zu verkomplizieren wird für das Vorliegende Beispiel der bessere Reibwert angenommen.

\*\*\* es wurde der gerundete Minimalwert nach [9, S.44] der empfohlenen Abstände genommen.

§ Mittelwert aus den zulässigen Vorgaben für M12 nach [18, S.45]

Zu den Reibwerten sei noch angemerkt, dass diese für gleitfeste Verbindungen definiert sind. Allerdings ist die Anwendung für die SLV dennoch nicht ganz abwegig, da eine handfeste Vorspannung unmittelbar nach der Montage vorherrscht. Die dann wirkenden Kräfte müssen die durch die handfeste Montage hervorgerufene Reibkraft überwinden und zu diesem Zeitpunkt spielt die Reibzahl in jedem Fall eine Rolle.

Die folgende Grafik zeigt die in dieser Arbeit zu untersuchende Verbindung

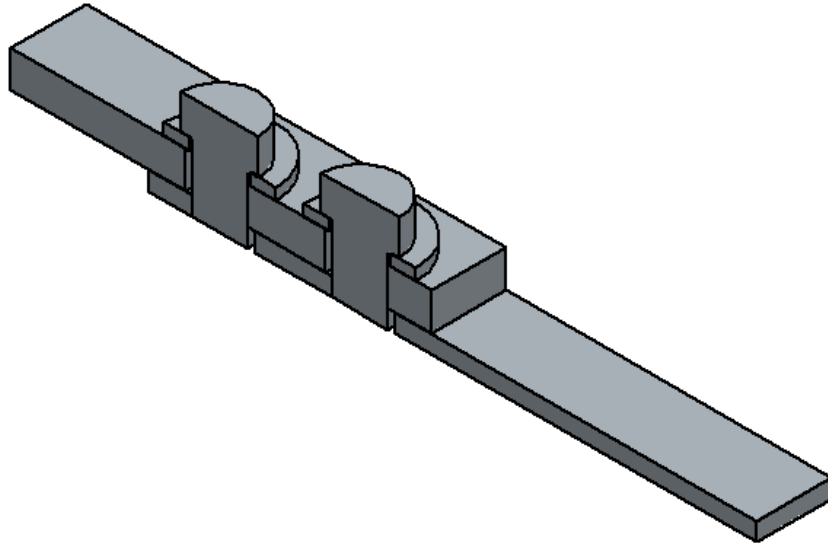


**Abbildung 10: Darstellung der zu untersuchenden Verbindung, eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

Für die nachfolgende FEM-Analyse muss das Modell allerdings noch vereinfacht werden um die Rechenzeit zu verkürzen. Da das Modell in allen drei Raumebenen symmetrisch ist, kann im Berechnungsprogramm die Symmetrieeigenschaft genutzt werden. Die Schrauben werden unter zu Hilfenahme von [19] als sogenannter Ersatzvolumenkörper der Modellklasse III modelliert.



Das für die FEA aufbereitete vereinfachte Modell sieht wie folgt aus.



**Abbildung 11: Vereinfachtes Modell für die FEA, eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

Als letzte Randbedingungen müssen noch die äußere Belastung und die handfeste Vorspannung sowie die Nachgiebigkeit der Schraube definiert werden.

Die Belastung wird wie folgt ermittelt. Aus [17] geht hervor, dass das Lochleibungsversagen mit steigendem Randabstand  $e_1$  eine untergeordnete Rolle spielt. Unter der Prämisse bei der gewählten Bauteildicke ist  $e_1$  mit dem Mindestabstand ausreichend dimensioniert, so soll das Nettoquerschnittsversagen für den Betrag der äußeren Last als Grenze betrachtet werden.

Der Nettoquerschnitt berechnet sich wie folgt:

$$A_{net} = (b - d_0) \cdot t$$

$$A_{net} = (32 \text{ mm} - 13,5 \text{ mm}) \cdot 8 \text{ mm}$$

$$A_{net} = 148 \text{ mm}^2$$

#### **Gleichung 1: Berechnung der Nettoquerschnittsfläche**

Um daraus eine Kraft erhalten zu können, wird vorher noch eine maximale Spannung von 200 MPa in den Bauteilen zugelassen. Das entspricht einem Faktor von 1,175 auf die Streckgrenze von 235 MPa bei der gewählten Stahlsorte S235JR.

Über folgende Gleichung lässt sich nun die Kraft berechnen:

$$\sigma_{zul} = \frac{F}{A_{net}}$$

$$A_{net} \cdot \sigma_{zul} = F$$

$$148 \text{ mm}^2 \cdot 200 \text{ MPa} = F$$

$$F = 29600 \text{ N}$$

**Gleichung 2: Gleichung für die zulässige Zugspannung auf die Kraft F umgeformt**

Nach [18] ist gerade bei Schrauben der Klasse M12 8.8 darauf zu achten, dass diese nicht schon bereits bei handfester Montage überlastet werden.

Um daher einen validen Wert zu erhalten wird auf [20] als Quelle der Grenzkkräfte die für den Menschen möglich sind zurückgegriffen. Diese Norm unterliegt allerdings der Einschränkung, dass es keine tatsächliche eindeutige Zuordnung des Bewegungsvorgangs der Montagebewegung mit dem Schraubenschlüssel gibt. Daher wird auf den Medianwert der Tabelle 9 aus [20] Zitat „*Körperstellung Stehen, Körperhaltung frei, beidhändige Kraftausübung an senkrechten Griffen, Griffabstand 440mm, Abstand Griffe zur Ferse der Arbeitsperson 500mm, Fußstellung nebeneinander, [...]*“ gewählt.

Wie dieses Zitat eindeutig belegt, hat dies nicht einmal Ansatzweise etwas mit der handfesten Schraubenmontage zu tun.

Allerdings definiert die besagte Tabelle 9 horizontales Ziehen. Das bedeutet ist der Schraubenschlüssel im Moment des handfesten Vorspannens, das heißt die Garnitur aus Schraube, Scheiben und Mutter hat kein Bewegungsspiel mehr in den Bauteilen, in senkrechter Stellung kann für diesen infinitesimalen Zeitpunkt eine Gültigkeit der gelisteten Werte zugeordnet werden. Da wie im Zitat ersichtlich von beidhändiger Kraftausübung ausgegangen wird, wird der Wert halbiert. Der Medianwert aus besagter Tabelle 9 ist 381 N bei einer gewählten Montagehöhe von 1200 mm. Die Annahme für die Handkraft beträgt daher 190,5 N.

Die Schraubenschlüssellänge für die in [3, S.906] genannte Schlüsselweite von 18 mm beträgt die Schraubenschlüssellänge nach [21] 195 mm. Da die Länge die Gesamtlänge des Schraubenschlüssels darstellt und nicht etwa den Abstand von Drehpunkt bis zum Kraftangriffspunkt durch die Hand, kann der Wert des Anzugsmomentes als theoretisch oberer Grenzwert betrachtet werden.

Das Anzugsmoment ergibt sich aus der Gleichung:

$$M_A = F \cdot l$$

$$M_A = 190,5 \text{ N} \cdot 195 \text{ mm}$$

$$M_A = 37147,5 \text{ Nmm}$$

### Gleichung 3: allgemeine Drehmomentgleichung

Die folgende Tabelle zeigt noch die Schraubenabmessungen welche in den folgenden Berechnungsschritten gebraucht werden.

**Tabelle 5: Schraubendaten für M12 laut [5, Tab. A11], eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

<b>P</b>		1,75	mm
<b>d<sub>2</sub></b>		10,863	mm
<b>A<sub>s</sub></b>		84,3	mm <sup>2</sup>
<b>A<sub>d3</sub></b>		76,25	mm <sup>2</sup>
<b>d<sub>s</sub></b>		10,36	mm
<b>d<sub>3</sub></b>		9,85	mm

Die nun aus dem handfesten Anziehen der Verbindung resultierende Vorspannkraft errechnet sich durch Umstellen der Gleichung 127 aus [5, S.77]:

$$M_A = F_M \cdot \left( 0,16 \cdot P + 0,58 \cdot d_2 \cdot \mu_G + \frac{D_{Km}}{2} \cdot \mu_K \right)$$

$$\frac{M_A}{\left( 0,16 \cdot P + 0,58 \cdot d_2 \cdot \mu_G + \frac{D_{Km}}{2} \cdot \mu_K \right)} = F_M$$

$$\frac{37147,5 \text{ Nmm}}{\left( 0,16 \cdot 1,75 \text{ mm} + 0,58 \cdot 10,863 \text{ mm} \cdot 0,12 + \frac{D_{Km}}{2} \cdot 0,12 \right)} = F_M$$

**Gleichung 4: Zur Ermittlung von der handfesten Montagevorspannung**

Für  $D_{Km}$  wird noch Gleichung 128 mit ergänzender Anmerkung 129 aus [5, S.77] angewandt.

$$D_{Km} = \frac{d_w + D_{Ki}}{2}$$

**Gleichung 5: Berechnung für  $D_{Km}$**

Für  $D_{Ki}$  gilt das Maximum aus  $D_a$ ,  $d_{ha}$ ,  $d_h$  bzw.  $d_a$  zu wählen. In der folgenden Tabelle sind die spezifischen Werte für die M12 Mutter bzw. Schraube aufgelistet:

**Tabelle 6: Schrauben – bzw. Mutterabmessungen der benötigten Durchmesser, eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

$d_a^*$	13,7	mm
$d_w^*$	16,63	mm
$d_{ha}^{**}$	13,5	mm
$D_{ha}^{**}$	13,5	mm
$D_a^{***}$	12,96	mm

\* Wert aus [2, S.9]; Formelzeichen aus der VDI-Richtlinie stimmt mit dem der Norm überein

\*\* Wert entspricht dem gewählten Bohrungsdurchmesser

\*\*\* Wert aus [22, S.8]; Formelzeichen der Norm für  $D_a$  aus der VDI-Richtlinie entspricht  $d_a$  aus der Norm

Wie aus Tabelle 6 hervorgeht ist  $d_a$  als Wert für  $D_{Ki}$  in Gleichung 5 einzusetzen.

$$D_{Km} = \frac{16,63 \text{ mm} + 13,7 \text{ mm}}{2}$$

$$D_{Km} = 15,165 \text{ mm}$$

Mit diesem Wert kann nun Gleichung 4 ergänzt werden:

$$\frac{37147,5 \text{ Nmm}}{\left(0,16 \cdot 1,75 \text{ mm} + 0,58 \cdot 10,863 \text{ mm} \cdot 0,12 + \frac{15,165 \text{ mm}}{2} \cdot 0,12\right)} = F_M$$

$$F_M = 19089,5 \text{ N}$$

Damit ist auch die Montagevorspannkraft definiert. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass der in [5] erwähnte Streufaktor bzw. Anziehungsfaktor  $\alpha$  nicht mit eingerechnet werden muss. Da hier kein Anziehdrehmoment für die Montage vorgegeben wird, sondern eine zu erwartende Montagevorspannkraft aus einer normativ ermittelten Handkraft. In der Realität sind hier Streuungen zu erwarten, da aber die Berechnung für eine nicht gleitfeste Verbindung ausgelegt ist, welche eine definierte Restklemmkraft erfordert, wird auf diese Streuung für einen Referenzwert verzichtet. Zumal die normativen Werte der Handkraft bereits auf statischen Auswertungen beruhen.

Um die Vorspannkraft später als dritte Spannungskomponente mit einbeziehen zu können, muss noch der Kegelwinkel ermittelt werden. Die Vorspannkraft breitet sich dabei kegelförmig von der Auflagefläche in den Bauteilen aus, wie die folgende Grafik zeigt.

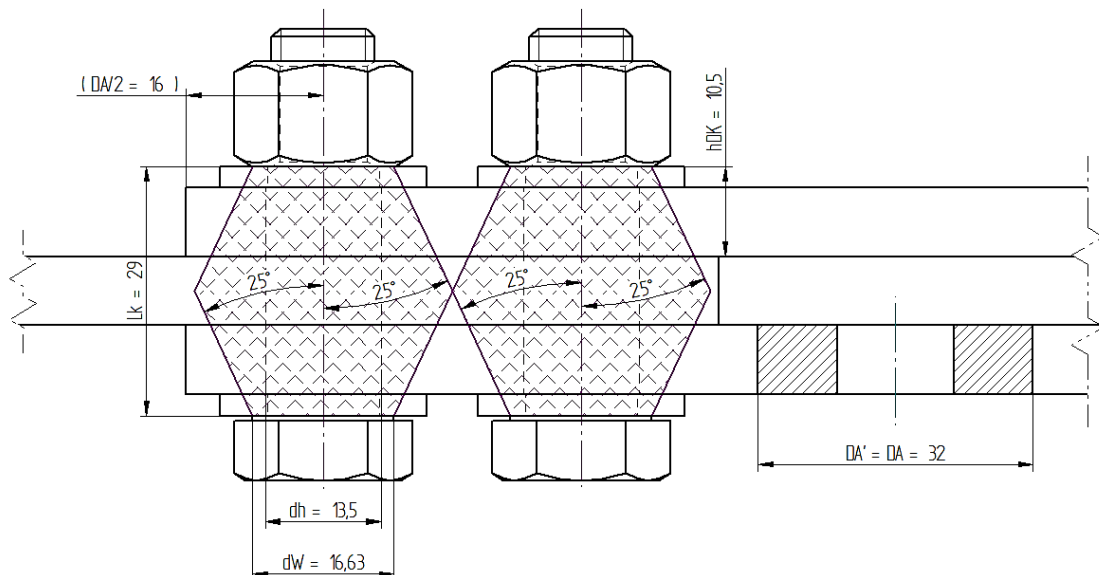


Abbildung 12: Idealisierte Verspannungskörper in der Verbindung, eigene Darstellung G. Reisinger 2023

Auf die tatsächliche Form des Verspannungskörpers wird in dieser Arbeit nicht eingegangen. Im späteren Verlauf zeigt sich, dass der Winkel des Verspannungskörpers etwa bei  $25^\circ$  liegt. Wie ersichtlich ist, beeinflussen sich die Verspannungskörper gerade noch nicht gegenseitig. Für diesen Fall würde aber [5] ebenfalls einen Lösungsweg vorgesehen.

In einem ersten Berechnungsschritt wird der Tangens des Kegelwinkel bestimmt. Dazu muss zuerst das Verhältnis zwischen Bauteilersatzaußendurchmesser und dem Auflageaußendurchmesser des Verbindungsmittel ermittelt werden. Die Gleichungen 6 bis 8 entsprechen den Gleichungen 43 bis 45 aus [5, S.46].

$$y = \frac{D_A'}{d_W}$$

$$y = \frac{32 \text{ mm}}{16,63 \text{ mm}}$$

$$y = 1,924$$

**Gleichung 6: Verhältnis zwischen Bauteilaußendurchmesser und Auflageaußendurchmesser**

Sowie das Verhältnis zwischen der Klemmlänge der Bauteile und dem Auflageaußendurchmesser, welches wie folgt berechnet werden kann:

$$\beta_L = \frac{l_K}{d_W}$$

$$\beta_L = \frac{29 \text{ mm}}{16,63 \text{ mm}}$$

$$\beta_L = 1,744$$

**Gleichung 7: Verhältnis zwischen der Klemmlänge der Bauteile und dem Auflageaußendurchmesser**

Somit berechnet sich der Tangens des Kegelwinkels zu:

$$\tan \varphi = 0,362 + 0,032 \cdot \ln\left(\frac{\beta_L}{2}\right) + 0,153 \cdot \ln y$$

$$\tan \varphi = 0,362 + 0,032 \cdot \ln\left(\frac{1,744}{2}\right) + 0,153 \cdot \ln(1,924)$$

$$\tan \varphi = 0,458 \rightarrow \arctan(0,458) \approx 25^\circ$$

**Gleichung 8: Bestimmung des Tangens des Kegelwinkels**

Der Vollständigkeit wegen wird noch der Grenzaußendurchmesser bestimmt. Dieser ist wichtig ob sich der Verspannungskörper aus Kegeln und Zylinder oder nur aus zwei Kegeln besteht.

Für die nachfolgenden Gleichungen 9 und 10 gelten Analog Gleichung 39 und 40 nach [5, S.45].

Der Grenzaußendurchmesser formuliert sich für Durchsteckverbindungen mit  $w = 1$  zu:

$$D_{A,Gr} = d_W + w \cdot l_K \cdot \tan \varphi$$

$$D_{A,Gr} = 16,63 \text{ mm} + 1 \cdot 29 \text{ mm} \cdot 0,458$$

$$D_{A,Gr} = 29,912 \text{ mm}$$

#### Gleichung 9: Ermittlung des Grenzaußendurchmessers

Damit ist das folgende Kriterium  $D_A \geq D_{A,Gr}$  erfüllt und der Verspannungskörper besteht aus zwei Kegeln. Damit ist sichergestellt, dass sich der Kegel auch zumindest bis zur Trennfuge ausbreitet.

Die Fläche welche der Kegel an der Trennfuge ausmacht, errechnet sich durch folgende Formel:

$$A_{DK} = \left[ \left( h_{DK} \cdot \tan \varphi + \frac{d_W}{2} \right)^2 - \frac{d_0^2}{4} \right] \cdot \pi$$

$$A_{DK} = \left[ \left( 10,5 \text{ mm} \cdot 0,458 + \frac{16,63 \text{ mm}}{2} \right)^2 - \frac{13,5^2}{4} \right] \cdot \pi$$

$$A_{DK} = 397,97 \text{ mm}^2$$

#### Gleichung 10: Formel zur Berechnung der Aufliegenden Verspannungskörperfläche auf Bauteil 1

Über Gleichung 2 lässt sich sinngemäß die Flächenpressung in der Trennfuge mit  $F_M$  und  $A_{DK}$  berechnen. Da es sich auf der Bauteiloberfläche um eine Druckspannung handelt, ist das Ergebnis mit negativen Vorzeichen behaftet.

$$\sigma_3 = -47,97 \text{ MPa}$$

In der folgenden Tabelle werden die in diesem Abschnitt ermittelten Randbedingungen zur Übersicht aufgelistet. Die im FEM-Programm vorgenommenen Einstellungen werden im Abschnitt 3.2 und in den Anlagen dargestellt.

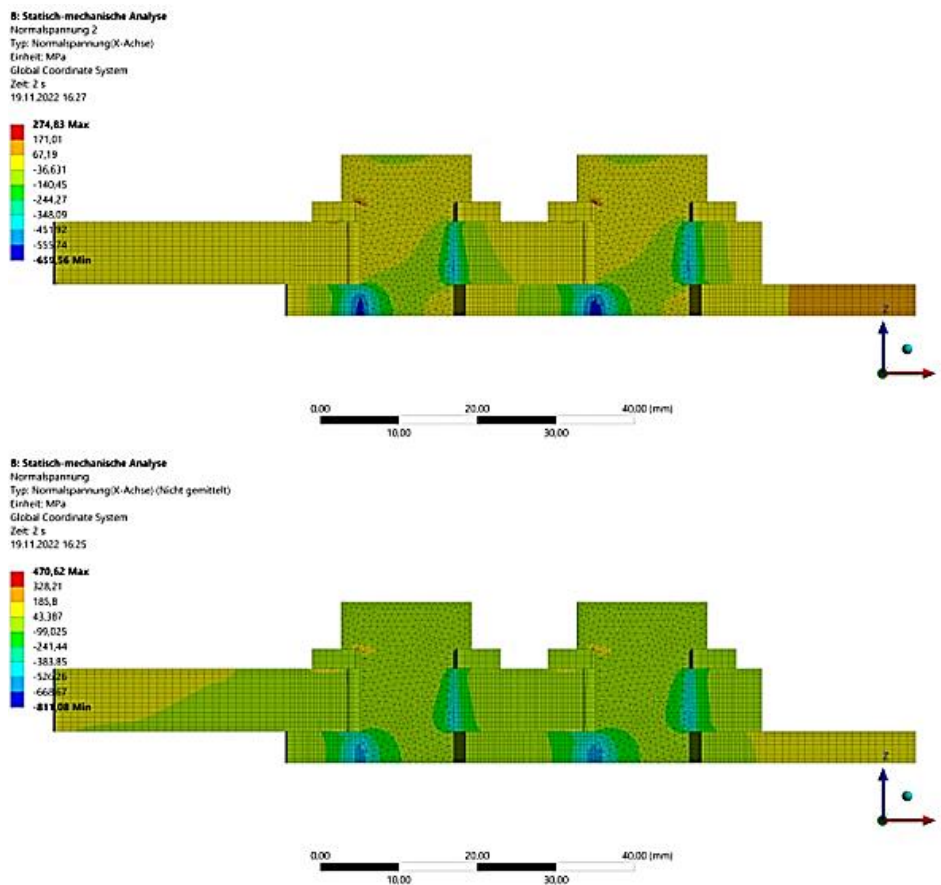
**Tabelle 7: Übersicht Lastrandbedingungen, eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

<b>Belastung</b>	29600 N
<b>Montagevorspannung</b>	19089,5 N
<b>3. Hauptspannung</b>	-47,97 MPa

## 3.2 Die Finite Elemente Analyse

Wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben ist mit einer nichtlinearen FEA zu arbeiten. Das hat auch Auswirkungen auf die Berechnungszeit.

Schon für die relativ kleine betrachtete Baugruppe (vgl. Abbildung 11) betrug die Berechnungszeit mehrere Stunden mit noch relativ grober Vernetzung der Bauteile. Bei dem Vergleich zwischen gemittelter und nicht gemittelter numerischer Ergebnisse, ein einfaches Vorgehen zur Überprüfung der Brauchbarkeit der Ergebnisse stellte sich heraus, dass die nicht gemittelten Ergebnisse um 71,2 Prozent abweichen. Das bedeutet im Umkehrschluss diese Ergebnisse sind für eine Auswertung nicht verwendbar.



**Abbildung 13: Gemittelte (oben) und nicht gemittelte (unten) Spannungsauswertung**

Durch Verbesserung der Netzqualität erhöht sich neben der Genauigkeit auch nochmal die Rechenzeit und die Gefahr eines unlösbaren nicht linearen Gleichungssystem wird ebenfalls höher und der Lösungsvorgang wird vom Programm abgebrochen.



Daher wurden Bauteil und Schraube getrennt betrachtet und der ebene Spannungszustand angewandt. Es sei hier angemerkt, dass die Verwendung des ebenen Spannungszustand für den vorliegenden Fall nicht ganz korrekt ist. Es wird aber dennoch versucht eine einfache und relativ schnelle Methode zu zeigen, welche im besten Fall durch ein Experiment validiert wird. Für den ebenen Spannungszustand gilt als Voraussetzung nach [6, S.62], dass keine Schubkräfte über die Oberfläche übertragen werden. In einem statischen Zustand kann davon ausgegangen werden. Weiters kann die Anwendung des ebenen Spannungszustands damit gerechtfertigt werden, dass die kritischen Spannungen als ebener Spannungszustand nach [6, S.62], auf der Oberfläche vorliegen und die dritte Spannungsrichtung hinzugerechnet werden darf.

Allerdings ist diese Möglichkeit auch Bauteilgeometrie gebunden. Geometrien welche in der unabhängigen Raumrichtung nicht linearsymmetrisch sind, also jede infinitesimal kleine Bauteilscheibe über der Länge nicht der vorherigen Bauteilscheibe gleicht, wäre die Anwendung von vornherein ausgeschlossen.

Weiter steht die FEA nicht so im Vordergrund wie die Richtlinien. Sie ist eine sehr nützliche Anwendung, gerade wenn mehrere Nachweispunkte bewertet werden sollen.

### 3.2.1 Allgemeine technische Daten

Die folgende Tabelle listet die programmierten Materialdaten der Schraube und des Bauteils 1.

**Tabelle 8: Materialdaten für das Bauteil und die Schraube, eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

	Bauteil 1	Schraube
<b>isotrope Elastizität</b>		
<b>E-Modul [MPa]</b>	210000	
<b>Querkontraktionszahl [1]</b>	0,27	
<b>Kompressionsmodul [MPa]</b>	152000	
<b>Schubmodul [MPa]</b>	82677	
<b>Bilineare isotrope Verfestigung</b>		
<b>Streckgrenze [MPa]</b>	235	640
<b>Tangentenmodul [MPa]</b>	210	
<b>Temperatur [°C]</b>	22	

Die Daten der Tangentenmoduli, Streckgrenzen, E-Moduli und Querkontraktionszahlen müssen händisch in das ANSYS eingetragen werden, die restlichen Werte berechnet das Programm autonom.

Für die Berechnung des Tangentenmoduls wurde der jeweilige E-Modul durch 1000 dividiert. Dies wird für das bilineare Werkstoffverhalten in Kombination mit einer FEA nach [23, Abschn. 3.2] in der Praxis auch häufig angewandt.

### 3.2.2 Analyse des Bauteils

Da nicht die komplette Verbindung simuliert wurde, wird hier der tatsächlich verwendete Körper für die Simulation gezeigt. Da es sich um den ebenen Spannungszustand handelt, wurden die Körper als Fläche modelliert.

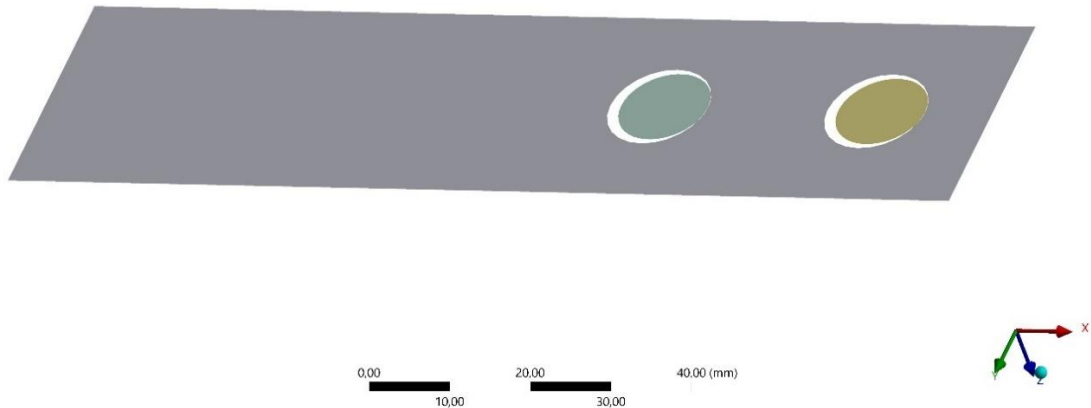


Abbildung 14: Körper für den ebenen Spannungszustand

In der nachfolgenden Tabelle werden die Ergebnisse des Bauteils gezeigt, welche für die Nachweisführung der FKM-Richtlinie benötigt werden.

Tabelle 9: Ergebnisse der Hauptspannungen, eigene Darstellung G. Reisinger 2023

<b>Zugspannung</b>	$\sigma_1 = 268,54 \text{ MPa}$	<b>Druckspannung</b>	$\sigma_1 = -294,2 \text{ MPa}$
	$\sigma_2 = 100,22 \text{ MPa}$		$\sigma_2 = -149,2 \text{ MPa}$

Es wurden sowohl die Zug- als auch Druckspannungen ermittelt. Ob tatsächlich alle benötigt werden zeigt im weiteren Verlauf der Mehrachsigsigegrad. Die folgende Abbildung zeigt den Hauptspannungsverlauf.

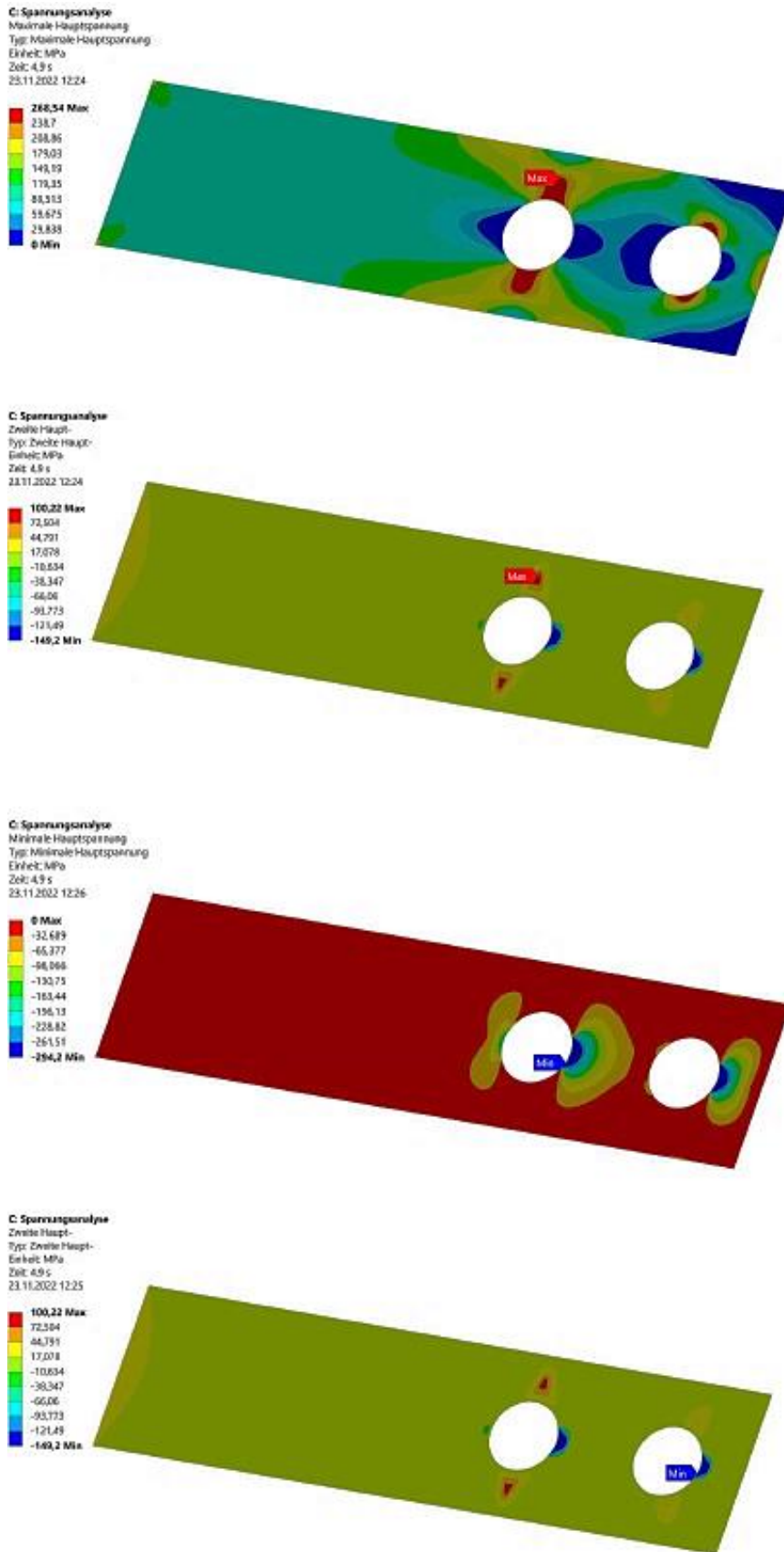


Abbildung 15: Farblicher Spannungsverlauf, die ersten beiden Bilder zeigen die 1. und 2. Hauptspannung Zug und die beiden Bilder darunter für Druck

Wie ersichtlich liegen die maximale 1. und 2. Hauptspannung im selben Bereich, ideal wäre derselbe Knoten, da dies das örtliche Spannungskonzept ausmacht. Die Druckspannungsmaxima liegen sogar an unterschiedlichen Bereichen. Beides ist numerischen Ungenauigkeiten geschuldet. Der dunkelblaue Bereich geht von -121,49 MPa bis -149,2 MPa. Das bedeutet der Knoten in der ersten Hauptspannung liegt etwas unter dem Maximum. Für die Genauigkeit der Ergebnisse wurde das Konvergenztool von ANSYS verwendet mit einer erlaubten Abweichung von 5 Prozent. Der Vorteil dieses Tools liegt darin, dass nur der Bereich um den Maximalwert im Netz verfeinert wird. Der Rest vom Bauteil bleibt unberührt, dies hat wesentlichen Einfluss auf die Berechnungsdauer.

Eine wichtige Randbedingung die explizit erwähnt wird ist die Belastung. Diese wurde über eine Verschiebung der Schraube realisiert. Um die definierte Kraft zu erreichen wurde in zwei Schritten simuliert. Im ersten Schritt wurde eine Verschiebung angenommen, die wahrscheinlich Größer ist als die zu erwartende Verschiebung. Sobald dieser Schritt erfolgreich war, wurde das Ergebnis der Verschiebung bei dem Lastschritt abgerufen, wo die Kraft in etwa bei der gewünschten Prüfkraft liegt. Theoretisch könnten nun alle Ergebnisse bei eben diesem Lastschritt abgerufen werden, die praktikablere Variante ist allerdings, die ausgelesene Verschiebung neu in die Verschiebungsbedingung einzusetzen. Somit entsprechen sicher alle Ergebnisse der jeweilig aufgebrauchten Verschiebung.

Typ	Kraftreaktion
Positionsmethode	Randbedingung
Randbedingung	Fixierte Lagerung
Ausrichtung	Globales Koordinatensystem
Unterdrückt	Nein
<b>Optionen</b>	
Ergebnisauswahl	Alle
<input type="checkbox"/> Zeit anzeigen	3,865 s
<b>Ergebnisse</b>	
<input type="checkbox"/> X-Achse	-29612 N
<b>Zuweisung</b>	
Zuweisungsmethode	Geometrieauswahl
Geometrie	Alle Körper
<b>Definition</b>	
Typ	Gesamtverformung
Durch	Zeit
<input type="checkbox"/> Zeit anzeigen	3,865 s
Zeitlichen Verlauf berechnen	Ja
Kennung	
Unterdrückt	Nein
<b>Ergebnisse</b>	
<input type="checkbox"/> Minimum	0, mm
<input type="checkbox"/> Maximum	0,17595 mm

Abbildung 16: Lastschritt bei der gewünschten Prüfkraft und dazugehörige Verschiebung.

Wie ersichtlich liegt die Belastung ein wenig über den gewünschten 29600 N. Das Ergebnis hätte auch mit der einer geraden Gleichung ermittelt werden können, somit wäre der exakte Weg bestimmbar, da die Lastschritte linear zusammenhängen. In dem Fall wurde aber bewusst darauf verzichtet und der Wert empirisch ermittelt. Mit den 3,865 Sekunden kann im Ergebnistool für die Verschiebungskomponente der X-Achse zu diesem Zeitpunkt abgerufen werden. Die dabei erfolgte Verschiebung beträgt 0,176 mm.

Somit kann im zweiten Berechnungsschritt nun die tatsächliche Spannungsauswertung erfolgen. Allerdings musste auch hier wegen numerischen Ungenauigkeiten nachkorrigiert werden. Die Last an diesem Zeitpunkt der zweiten Berechnung beträgt 29617 N bei 4,9 Sekunden. Somit liegt das Ergebnis auf der sicheren Seite.

### 3.2.3 Ermittlung der plastischen Formzahl für das Bauteil

Das grundsätzliche Vorgehen ist in [6] beschrieben. Eine tatsächlich bessere Erklärung zum Vorgehen liefert allerdings [23]. Im FEM-Programm wird eine Belastung eingestellt bis das Bauteil eine bleibende plastische Verformung erhalten hat bzw. der betrachtete Querschnitt Großteils im plastischen Bereich liegt. Danach kann die vollplastische Traglast und die elastische Grenzlast bestimmt werden. Daraus kann dann die plastische Formzahl ermittelt werden. Alternativ kann auch die jeweilige plastische Formzahl aus den Tabellen der FKM-Richtlinie für den auftretenden Fall verwendet werden.

Nachfolgend wurde die einfachere der beiden in [23] beschriebenen Methoden zur Bestimmung der vollplastischen Traglast gewählt.

Dazu wurden die Ergebnisse aus ANSYS in eine Microsoft Excel Datei übertragen und die Ergebnisse der Kraft über die Ergebnisse des Weges (Verformung) aufgetragen. Daraus ergibt sich das folgende Diagramm:

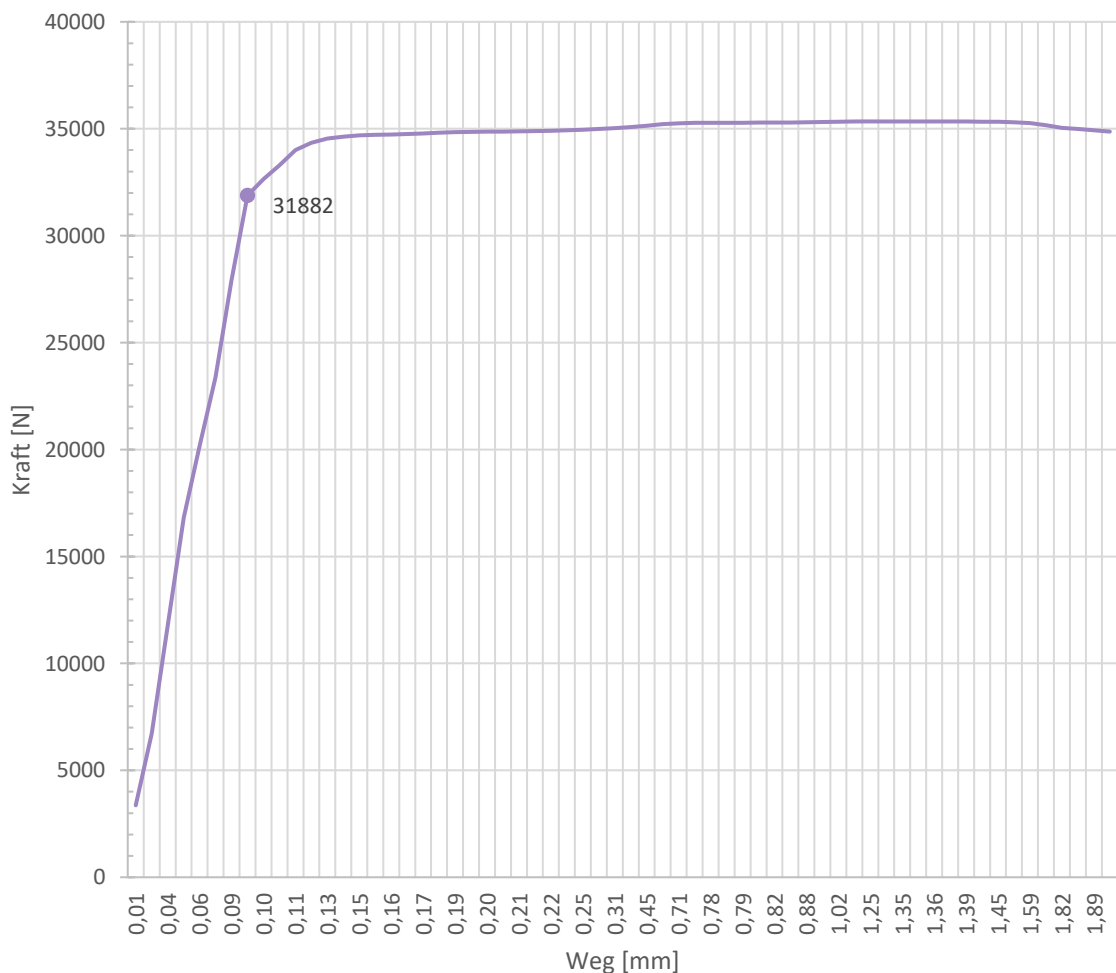


Abbildung 17: Kraft-Weg Diagramm, eigene Darstellung G. Reisinger 2023

Es ist erkennbar, dass der lineare Zusammenhang ab etwa 31882 N in den nicht linearen Bereich übergeht. Dieser Wert kennzeichnet die vollplastische Traglast da ab dann das Bauteil sich plastisch verformt.

Die elastische Grenzlast lässt sich wie folgt bestimmen. Dazu werden aus den FEA Daten Werte ausgewählt, welche garantiert nur eine elastische Verformung nach sich zieht. In dem Fall wurden die Werte für Kraft und Spannung aus dem ersten Lastschritt gewählt.

**Tabelle 10: Werte aus dem ersten Lastschritt für die plastische Formzahl, eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

Kraft [N]	Spannung [MPa]
3363,8	48,55

Jedenfalls gilt es muss im linearen Bereich sein und die Werte für Kraft und Spannung müssen demselben Lastschritt entstammen.

Nach [23] gilt dann der folgende Zusammenhang:

$$f_{el} = \frac{F}{\sigma} \cdot R_e$$

$$f_{el} = \frac{3363,8 \text{ N}}{48,55 \text{ MPa}} \cdot 235 \text{ MPa}$$

$$f_{el} = 16282 \text{ N}$$

**Gleichung 11: Ermittlung der elastischen Grenzlast**



### 3.3 Bemessung nach der FKM-Richtlinie

Es wird für den Nachweis das Konzept der örtlichen Spannungen angewandt. Dazu werden die Ergebnisse der FEM-Analyse verwendet. Die in diesem Kapitel der vorliegenden Arbeit verwendeten Formeln und Zusammenhänge entstammen dem gesamten 3. Kapitel aus [6, S.61-80] für nicht geschweißte Bauteile.

Die Aufarbeitung der Rechenschritte erfolgt zunächst nur für das Bauteil 1 (siehe Abbildung 10) für die Schraube separat nach dem Konzept der Nennspannungen

Der Berechnungsalgorithmus ist nachfolgend als Ablaufdiagramm dargestellt.

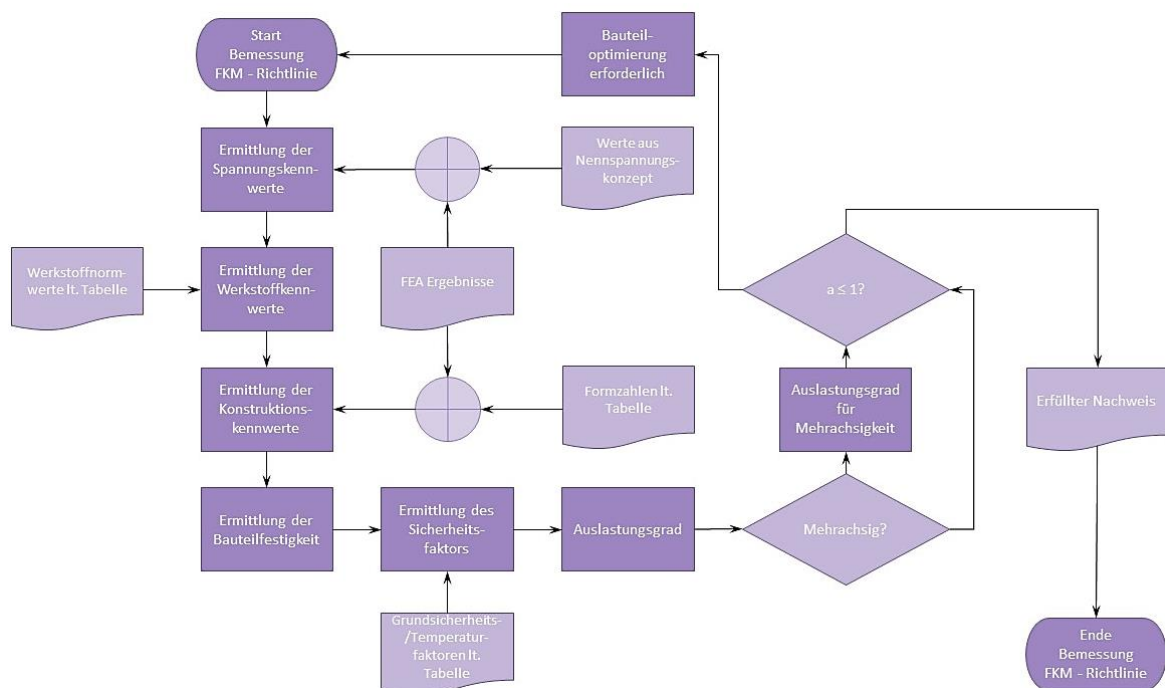


Abbildung 18: Ablaufdiagramm des FKM-Richtlinien Nachweises, eigene Darstellung G. Reisinger 2023

#### 3.3.1 Spannungskennwerte

Im ersten Berechnungsschritt müssen die Spannungskennwerte ermittelt werden. Dazu wird die Vergleichsspannung benötigt. [6] sieht dazu zwei Möglichkeiten vor. Zum einen kann die Vergleichsspannung direkt über das FEM-Programm bestimmt werden. Zum anderen über die Formel der Gestaltänderungshypothese nach von Mises<sup>2</sup>. Die Gestaltänderungshypothese erlaubt eine Beurteilung der Bauteile auf Versagen durch Fließen. Die Ergebnisse der Vergleichsspannung nach von Mises sind auch experimentell stichhaltig

<sup>2</sup> Nach Richard von Mises (1883 – 1953) österreichischer Ingenieur und Mathematiker nach Infobox 7 aus [24, S.216].

und daher nach [24, S.214-215] gut für die Spannungsbeurteilung von Bauteilen duktiler Werkstoffe geeignet.

Für den vorliegenden Fall findet folgende Gleichung Anwendung:

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{2}[(268,54 - 100,22)^2 + (100,22 + 47,97)^2 + (-47,97 - 268,54)^2]}$$

$$\sigma_V = 274,29 \text{ MPa}$$

#### **Gleichung 12: Berechnung der Vergleichsspannung**

Die Einheiten wurden auf Grund der sonst entstehenden Länge der Gleichung weggelassen. In die Gleichung ist vorzeichenrichtig einzusetzen.

Die Vergleichsspannung bei der Druckspannungen kann analog berechnet werden und liegt bei 214,36 MPa.

Um den Grad der Mehrachsigkeit der Beanspruchung festzustellen, muss die hydrostatische Spannung ermittelt werden.

Diese lässt sich über die drei Normalspannungen in der jeweiligen Raumrichtung ermitteln. Die Zahlenwerte können ebenfalls aus der FEA entnommen werden.

$$\sigma_H = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

$$\sigma_H = \frac{1}{3}(268,54 \text{ MPa} + 100,22 \text{ MPa} - 47,97 \text{ MPa})$$

$$\sigma_H = 106,93 \text{ MPa}$$

### Gleichung 13: Berechnung der hydrostatischen Spannung

Für die Druckspannungen ergibt sich der Wert von  $-163,79 \text{ MPa}$ .

Da nun für den Mehrachsigkeitsgrad die beiden erforderlichen Spannungskennwerte vorhanden sind, kann das Verhältnis bestimmt werden.

$$h = \frac{\sigma_H}{\sigma_V}$$

$$h = \frac{106,93 \text{ MPa}}{274,29 \text{ MPa}}$$

$$h = 0,39$$

### Gleichung 14: Berechnung des Mehrachsigkeitsgrads

Bei den Druckspannungen beträgt der Mehrachsigkeitsgrad  $-0,76$ . Somit liegen beide eindeutig unter dem Grenzwert von  $\pm 1,333$  und es liegt keine Mehrachsigkeit vor.

Bis zu diesem Zeitpunkt ist es sinnvoll beide Bereiche zu betrachten um eine Mehrachsigkeit in den kritischen Punkten auszuschließen. Die nachfolgenden Berechnungsschritte beziehen sich daher nun mehr auf den Maximalwert der Vergleichsspannung.

### 3.3.2 Werkstoffkennwerte

Die FKM-Richtlinie sieht eine Reihe von Faktoren vor, welche Einflussgrößen wie beispielsweise den Einfluss der Bauteilgeometrie oder den Einfluss der Temperatur berücksichtigen welche Auswirkung auf die Zugfestigkeit, die Dehngrenze sowie die Bruchdehnung haben. Viele dieser Kennwerte können direkt aus den Tabellen der FKM-Richtlinie entnommen werden, ein Verweis ist an entsprechender Stelle angeführt.

**Tabelle 11: Werkstoffnormwerte; eigene Darstellung nach [6, Tab. 5.1.1] für S235JR, eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

$R_{m,N}$	360 MPa	$d_{eff,N,A}$	40 mm
$R_{p,N}$	235 MPa	$a_{d,m}$	0,05
$A_N$	24 %	$a_{d,p}$	0,26
$d_{eff,N,m}$	3 mm	$a_{d,A}$	0,18
$d_{eff,N,p}$	16 mm		

Für das vorliegenden Beispiel ist die Festlegung des effektiven Durchmessers wenig problematisch. Aus [25] kann entnommen werden, dass es bei komplexeren Geometrien das Ergebnis für den effektiven Durchmesser anwenderabhängig ist und daher variieren kann.

Im Zweifel kann daher die nachfolgende Gleichungen für den effektiven Durchmesser nach [6] am Nachweispunkt angewandt werden.

$$d_{eff} = \frac{4 \cdot V}{O}$$

**Gleichung 15: Allgemein gültige Formel zur Bestimmung von  $d_{eff}$**

Die Gleichung leitet sich aus der Gusstechnik ab. Auf die Festigkeit von Gussbauteilen hat die Abkühlgeschwindigkeit und die Zeit die gebraucht wird, bis das Bauteil vollständig erstarrt, Einfluss. Über das Erstarrungsmodul ( $\frac{\text{Volumen}}{\text{Oberfläche}}$ ) lässt sich dieser Einfluss quantifizieren. Da in der FKM-Richtlinie der effektive Durchmesser auf Rundstäbe bezogen wird muss gelten  $d_{eff} = d$ . Daher wird in Gleichung 15 nach [25] der Erstarrungsmodul mit der Zahl 4 multipliziert.

Für ein besseres Verständnis sei an der Stelle noch die Herleitung zweier Tabellenwerte aus Tabelle 3.2.1. in [6] gezeigt unter Verwendung der Gleichung 15. Dabei zeigt der Zylinder den Bezug auf den Rundstab.

**Tabelle 12: Herleitung der Tabellenwerte 3.2.1 in [6] analog zu [25], eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

Körper*	Volumen	Oberfläche**	in Gl.15	$d_{\text{eff}}$
Zylinder	$\frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot h$	$\approx d \cdot \pi \cdot h$	$\frac{4 \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot h}{d \cdot \pi \cdot h}$	$d$
Quader	$b \cdot s \cdot h$	$\approx 2 \cdot h \cdot (b + s)$	$\frac{2 \cdot 4 \cdot b \cdot s \cdot h}{2 \cdot h \cdot (b + s)}$	$\frac{2 \cdot b \cdot s}{(b + s)}$

\* Für b, s bzw. d gilt  $h \gg d, b$  bzw. s

\*\* Es gilt die Prämisse: Bei langen Körpern ist die Grundfläche vernachlässigbar daher wird nur die Mantelfläche einbezogen.

Für kleine Bauteile die aus einem Blecherzeugnis oder einem Profil gefertigt wurden kann argumentiert werden, dass das Bauteil aus einem ursprünglichen sehr langen Strang oder Coil herausgearbeitet wurde, der effektive Durchmesser bezieht sich also auf das Ursprungserzeugnis für den die Festigkeitskennwerte gelten. [6] sieht vor bei komplexen Geometrien über einen repräsentativen Schnitt am Nachweispunkt zu erstellen und diese Geometrie auf ein repräsentatives Rechteck zu reduzieren.

Die Wahl ob die genannte Gleichung angewandt werden darf legt die Werkstoffgruppe fest.

Der in Tabelle 12 gezeigte Fall liegt auf der sicheren Seite da er zu einem niedrigeren technologischen Größeneinflussfaktor führt. Dieser Fall gilt aber vorwiegend für vergütete Stähle und Gussbauteile.

Über den technologischen Größeneinflussfaktor lässt sich die Festigkeitsabnahme des Werkstoffes bei größer werdenden Abmessungen des betrachteten Bauteils mit einbeziehen.

Für herkömmlichen unlegierten Baustahl und einigen weiteren Stahlsorten sowie Aluminiumwerkstoff legt [6] eine weitere Fallunterscheidung fest. Dabei entspricht der effektive Durchmesser der (Wand-) Stärke oder des Nenndurchmessers des Erzeugnisses. Da es sich um S235JR mit rechteckigem Querschnitt handelt gilt für den vorliegenden Fall  $s = d_{eff} = 8 \text{ mm}$ . Da normative effektive Durchmesser für die Zugfestigkeit kleiner ist als 8 mm, muss nach [6] die folgende Formel für den technologischen Größenfaktor angewandt werden:

$$K_{d,m} = \frac{1 - 0,7686 \cdot a_{d,m} \cdot \lg\left(\frac{d_{eff}}{7,5 \text{ mm}}\right)}{1 - 0,7686 \cdot a_{d,m} \cdot \lg\left(\frac{d_{eff,N,m}}{7,5 \text{ mm}}\right)}$$

$$K_{d,m} = \frac{1 - 0,7686 \cdot 0,05 \cdot \lg\left(\frac{8 \text{ mm}}{7,5 \text{ mm}}\right)}{1 - 0,7686 \cdot 0,05 \cdot \lg\left(\frac{3 \text{ mm}}{7,5 \text{ mm}}\right)}$$

$$K_{d,m} = 0,984$$

**Gleichung 16: Berechnung des technologischen Größenfaktors**

In diesem Kriterium entfällt die Berechnung für  $K_{d,p}$  und  $K_{d,A}$  und beide werden somit zu 1.

Der nächste Werkstoffkennwert ist der Anisotropiefaktor. Es wird zwar grundsätzlich von isotropen Werkstoffverhalten ausgegangen, also in jede Raumrichtung gelten die gleichen Eigenschaften. In der Realität gibt aber die Bearbeitungsrichtung, zum Beispiel durch das Walzen in der Herstellung eines Bleches, eine Vorzugsrichtung der Materialfasern vor. Dies ist auch die bevorzugte Spannungsrichtung, quer dazu bietet die FKM-Richtlinie je nach Zugfestigkeit des Werkstoffes einen Tabellenwert vor. Dieser Tabellenwert ist der Quotient aus den Festigkeitswerten quer und längs belastet zur bevorzugten Bearbeitungsrichtung wie aus [6, Abschn. 3.2.1.6] entnommen werden kann. Für das vorliegende Beispiel ist die Vorzugsrichtung angenommen worden. Daher ergibt sich  $K_A = 1$

Daraus können nun die Bauteilnormwerte bestimmt werden.

Für die Bauteilzugfestigkeit gilt:

$$R_m = K_{d,m} \cdot K_A \cdot R_{m,N}$$

$$R_m = 0,984 \cdot 1 \cdot 360 \text{ MPa}$$

$$R_m = 354,24 \text{ MPa}$$

**Gleichung 17: Bauteilnormwert für die Zugfestigkeit**

Für die Bauteilfließ- bzw. Streckgrenze gilt:

$$R_p = K_{d,p} \cdot K_A \cdot R_{p,N}$$

$$R_p = 1 \cdot 1 \cdot 235 \text{ MPa}$$

$$R_p = 235 \text{ MPa}$$

**Gleichung 18: Bauteilnormwert für die Streckgrenze**

Für die Bauteilbruchdehnung gilt:

$$A = K_{d,A} \cdot A_N$$

$$A = 1 \cdot 0,24$$

$$A = 0,24 \rightarrow 24\%$$

**Gleichung 19: Bauteilnormwert für die Bruchdehnung**

Die hier vorliegenden Bauteilnormwerte wurden auf die Werkstoffnormwerte aus der DIN EN 10025-2 bzw. aus [6, Tab. 5.1.1] bezogen. Für den Fall, dass von der Werkstoffnorm abweichende Werkstoffkennwerte erforderlich sind, sieht [6] auch die sogenannten Bauteil-Zeichnungswerte vor, oder im Fall von experimentell bestimmten Kennwerte die sogenannten Bauteil-Istwerte.

### 3.3.3 Konstruktionskennwerte

Die Konstruktionskennwerte behandeln Faktoren die dem Bauteil unter Umständen höhere Spannungen ertragen lassen wie beispielsweise die plastische Stützzahl. Die plastische Stützzahl beschreibt den Effekt, dass niedrig belastete Materialbereiche die höheren belasteten Bereiche stützen und deren Tragreserve ausnutzen. Wie in [6, S.71] Die plastische Stützzahl ist allerdings durch die ertragbare örtliche Dehnung bzw. der vollplastischen Ersatztraglast begrenzt.

Die vollplastische Ersatztraglast wird als plastische Formzahl in der Nachweisführung berücksichtigt. Sie ist das Verhältnis aus der vollplastischen Traglast zur elastischen Grenzlast. Für das Vorgehen zur Ermittlung der quantitativen Werte ist Abschnitt 3.2 der vorliegenden Arbeit einzusehen. Für das betrachtete Bauteil beträgt die plastische Formzahl:

$$K_p = \frac{f_{pl}}{f_{el}}$$

$$K_p = \frac{31882 \text{ N}}{16282 \text{ N}}$$

$$K_p = 1,958$$

**Gleichung 20: Berechnung der plastischen Formzahl**

Die örtlich ertragbare Dehnung ist von der Bruchdehnung als auch vom Mehrachsigen Grad im betrachteten Nachweispunkt abhängig.



Für die ertragbare Dehnung muss vorher noch die Referenzdehnung ermittelt werden, welche sich wie folgt berechnen lässt:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{ref} &= A + \frac{R_p}{E} \\ \varepsilon_{ref} &= 0,24 + \frac{235 \text{ MPa}}{210000 \text{ MPa}} \\ \varepsilon_{ref} &= 0,2411\end{aligned}$$

#### Gleichung 21: Berechnung der Referenzdehnung

Nun kann das folgende Kriterium in Bezug auf die Mehrachsigkeit abgeglichen werden.

$$\varepsilon_{ertr} = \begin{cases} \varepsilon_{ref}, & h \leq \frac{1}{3} \\ \varepsilon_0 + 0,3 \cdot \left( \frac{\varepsilon_{ref} - \varepsilon_0}{0,3} \right)^{3 \cdot h}, & h > \frac{1}{3} \end{cases}$$

#### Gleichung 22: Kriterium zum Ermitteln der ertragbaren Dehnung

Das Minimum der ertragbaren Dehnung bei hohem Mehrachsigkeitsgrad ist aus [6, Tab.3.3.1] für die jeweilige Werkstoffgruppe zu entnehmen und liegt in dem Fall für Stahl bei 0,05.

Für den vorliegenden Fall gilt das zweite Kriterium, daher errechnet sich die ertragbare Dehnung über Gleichung 22 zu:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{ertr} &= 0,05 + 0,3 \cdot \left( \frac{0,2411 - 0,05}{0,3} \right)^{3 \cdot 0,39} \\ \varepsilon_{ertr} &= 0,227 \rightarrow 22,7\%\end{aligned}$$

Um die plastische Stützzahl final ermitteln zu können muss noch der Verfestigungsfaktor berechnet werden. Der Verfestigungsfaktor berücksichtigt nach [1] die Eigenschaft der metallischen Werkstoffe mit hoher Schmelztemperatur, bei zunehmender Umformung sich zu verfestigen. Je mehr der Verformungsgrad ansteigt desto höher muss die Kraft sein, welche aufgebracht werden muss um das Metall weiter verformen zu können [1]. Grund ist die zunehmende Härte durch die gegenseitige Behinderung bei der Bildung neuer Versetzungen im Kristallgitter beim Gleiten der vorhandenen Versetzungen unter plastischer Verformung [1]. Sobald alle Gleitmöglichkeiten im Kristallgitter ausgeschöpft sind, führt eine erneute Erhöhung der Kraft letztendlich zum Bruch des Metalls [1].

Der Verfestigungsfaktor errechnet sich zu:

$$f_R = 0,5 \cdot \left(1 + \frac{R_m}{R_p}\right)$$

$$f_R = 0,5 \cdot \left(1 + \frac{354,24 \text{ MPa}}{235 \text{ MPa}}\right)$$

$$f_R = 1,254$$

**Gleichung 23: Berechnung des Verfestigungsfaktors**

Daraus kann nun die plastische Stützzahl ermittelt werden. Für die gilt:

$$n_{pl} = \text{MIN} \left( \sqrt{E \cdot \frac{\varepsilon_{ertr}}{R_p}}; f_R \cdot K_p \right)$$

$$n_{pl} = \text{MIN} \left( \sqrt{210000 \text{ MPa} \cdot \frac{0,227}{235 \text{ MPa}}}; 1,254 \cdot 1,958 \right)$$

$$n_{pl} = \text{MIN}(14,24; 2,46)$$

$$n_{pl} = 2,46$$

**Gleichung 24: Abgleich zur Ermittlung der plastischen Stützzahl**

Damit sind die Konstruktionswerte für das vorliegende Beispiel vollständig bestimmt. Für andere Werkstoffe und geschweißte Bauteile gelten die in [6] festgelegten abweichenden Bestimmungen.

### 3.3.4 Bauteilfestigkeit

Aus den eben berechneten Parametern kann nun die Bauteilfestigkeit, auf welcher dann die Bemessung beruht, ermittelt werden. Diese berechnet sich aus der in Gleichung 18 ermittelten Streckgrenze die um den Faktor der plastischen Stützzahl aus Gleichung 24 vergrößert werden darf. Die Bauteilfestigkeit ergibt sich zu:

$$\sigma_{SK} = R_p \cdot n_{pl}$$

$$\sigma_{SK} = 235 \text{ MPa} \cdot 2,46$$

$$\sigma_{SK} = 578,1 \text{ MPa}$$

**Gleichung 25: Bauteilfestigkeit**

### 3.3.5 Sicherheitsfaktoren

Die folgende Tabelle zeigt die ausgewählten Sicherheitsfaktoren aus den in [6] zur Verfügung gestellten Tabellen. Daraus wird der Gesamtsicherheitsfaktor für den Nachweis ermittelt.

**Tabelle 13: Sicherheitsfaktoren, eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

Teilsicherheitsfaktoren und Temperaturfaktoren	Wert
$j_s$	1
$j_p$	1,35
$K_{T,p}$	1

Der Lastfaktor darf nach [6, Abschn. 3.5.0] generell immer mit „1“ angesetzt werden sofern die auf das Bauteil einwirkende Last auf der sicheren Seite liegt. Die sichere Lastannahme und die Ermittlung eines repräsentativen Lastfaktors kann auch nach Kapitel 5.7 in der FKM-Richtlinie erfolgen.

Die richtige Wahl der verbleibenden Teilsicherheitsbeiwerte obliegen den Betriebsbedingungen, also wie hoch ist die Auftretenswahrscheinlichkeit der Last. Als auch der Schadensfolge, welche in hoch, mittel und niedrig gestaffelt ist.

Die Definition welche Schadensfolge und wie die Auftretenswahrscheinlichkeit ist, ist eine Entscheidung vom anwendenden Individuum der FKM-Richtlinie. Hier muss sorgfältig abgewogen werden. Es kann davon ausgegangen werden, wenn das Bauteil täglich im Gebrauch von Menschen ist und das Versagen schwere bis tödliche Körperverletzung zur Folge hat, ist mit Sicherheit angemessen die hohe Schadensfolge anzuwenden. Stellt dabei die maximale Lastannahme ein relativ unwahrscheinliches Ereignis dar, beispielsweise wurden in der Berechnung für die auftretende Last mittragende Teile ausgelassen, so ist nicht nur die Lastannahme auf der sicheren Seite sondern auch die

Auftretenswahrscheinlichkeit gering. Der Temperaturfaktor ist im definierten Normaltemperaturbereich mit „1“ anzusetzen.

Für den betrachteten Fall wurde eine hohe Schadensfolge aber mit geringer Auftretenswahrscheinlichkeit gewählt. Der Gesamtsicherheitsfaktor errechnet sich somit zu:

$$j_{ges} = j_s \cdot \frac{j_p}{K_{T,p}}$$

$$j_{ges} = 1 \cdot \frac{1,35}{1}$$

$$j_{ges} = 1,35$$

#### **Gleichung 26: Berechnung des Gesamtsicherheitsfaktors**

An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass sich der Gesamtsicherheitsfaktor weitere Faktoren beinhalten kann. Diese können aber weggelassen werden, da diese aufgrund der Randbedingungen hier nicht maßgebend sind. Da auch das Verhältnis Streckgrenze zu Zugfestigkeit unter 0,75 liegt entfallen laut Festlegung in [6] die Anteile auf Absicherung gegen Bruch. Da der Maximalwert zählt kann durch beispielsweise korrespondierendem Einsetzen der Teilsicherheitswerte festgestellt werden, dass bei Verhältnissen  $\leq 0,75$  der Sicherheitsfaktor für Bruch kleiner bzw. maximal gleich denen auf Absicherung gegen Fließen.

Der Vollständigkeit wegen, wird an dieser Stelle noch die vollständige Gleichung aus der FKM-Richtlinie gezeigt.

$$j_{ges} = j_s \cdot \left[ j_G \cdot \text{MAX} \left( \frac{j_m}{K_{T,m}} \cdot \frac{R_p}{R_m}; \frac{j_p}{K_{T,p}}; \frac{j_{mt}}{K_{Tt,m}} \cdot \frac{R_p}{R_m}; \frac{j_{pt}}{K_{Tt,p}} \right) + \Delta j \right]$$

#### **Gleichung 27: Vollständige Gleichung für die Berechnung des Gesamtsicherheitsfaktors**

Für die Formelzeichen wird an dieser Stelle an das Abkürzungsverzeichnis verwiesen. Der Teilsicherheitssummand  $\Delta j$  ist für nicht duktile Gussbauteile zu berücksichtigen. Dieser ist wie in [6, S.77] beschrieben maßgeblich von der Bruchdehnung des Gussbauteils abhängig.

### 3.3.6 Einzelnachweis des Bauteils

Der Nachweis wird über den Auslastungsgrad definiert. Der Auslastungsgrad ist das Verhältnis aus der Vergleichsspannung erhöht um den Gesamtsicherheitsfaktor zu der in 3.3.4 berechneten Bauteilfestigkeit. Der Auslastungsgrad für das Beispiel ergibt sich somit zu:

$$a_{SK} = \frac{\sigma_V \cdot j_{ges}}{\sigma_{SK}}$$

$$a_{SK} = \frac{274,29 \text{ MPa} \cdot 1,35}{578,1 \text{ MPa}}$$

$$a_{SK} = 0,641$$

#### Gleichung 28: Berechnung des Auslastungsgrades als Festigkeitsnachweis

Ein Auslastungsgrad unter und gleich „1“ gilt in erster Linie als erbrachter bestandener Nachweis. Für Auslastungsgrade über „1“ empfiehlt [26] die Anwendung der FKM-Richtlinie „nichtlinear“ für die statischen Festigkeitsnachweise. Der Grund nach [26] sind die Unterschiede der Vorgaben zum Materialverhalten in den einzelnen Richtlinien in Bezug auf die plastischen Reserven. Während die in der vorliegenden Arbeit verwendete FKM – Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis“ ein elastisch – idealplastisches Materialverhalten voraussetzt, wird in der Richtlinie „nichtlinear“ das experimentell bestimmte elastisch-(„real“)plastisches Materialverhalten, wie in [26] beschrieben, angewandt.

Hätte der Mehrachsigen Grad den Maximalwert von  $\pm 1,333$  überschritten, so wäre ein getrennter Nachweis für den Zug- oder Druckspannungsbereich mit der hydrostatischen Spannung Vorzeichenrichtig („Minus“ für Druckspannung) zu führen. Das Vorgehen ist identisch, es müssen lediglich die Bauteilfestigkeit, die plastische Stützzahl und der Wert der ertragbaren hydrostatischen Spannungen nach [6] erneut evaluiert werden. Auf die genaue Beschreibung des Vorgehens wird in dieser Arbeit verzichtet.

### 3.3.7 Einzelnachweis der Schraube

Für die Schraube wurde der statische Festigkeitsnachweis mit Nennspannungen gewählt. Der grundsätzliche Ablauf ist der wie bei dem örtlichen Spannungsnachweis und ist im Ablaufdiagramm ersichtlich. Die Darstellung erfolgt daher in Tabellenform. Erklärungen sind, sofern notwendig unter der Tabelle gelistet. Da es sich um einen Kreisquerschnitt handelt wird auf Unterscheidung zwischen den Achsen verzichtet. Daher können Formelzeichen von denen in [6] abweichen. Es sei als Nachweispunkt die Scherfläche genannt. Das bedeutet diese darf zum Teil doppelt angewandt werden. Da zwei Schrauben vorhanden sind, darf die Scherlast ebenfalls halbiert werden.

Der Werkstoff stellt eine besondere Herausforderung dar, da im allgemeinen Festigkeitsklassen verwendet werden und keine direkte Werkstoffangabe. Hier besteht die Gefahr,

dass der Nachweis entweder zu konservativ angesetzt wird, oder überschätzt wird. Daher wird für die Werkstoffwerte folgender Kompromiss getroffen. Die Schrauben insbes. jene mit CE-Kennzeichnung müssen unbedingt den Auflagen der entsprechenden Normen für die Herstellung und die Prüfung von Verbindungsmittel erfüllen. Weiters ist es vorstellbar, dass zu den eingesetzten Werkstoffen auch entsprechende Normen existieren welche eventuell bereits auf einen effektiven Durchmesser bezogen worden sind. Somit würden ohnehin der technologische Größeneinflussfaktor entfallen. Daher wird für die Berechnung der nominelle Wert der Zugfestigkeit und der Streckgrenze als gegebener Bauteilnormwert hingenommen. Die Formeln in der folgenden Tabelle wurden Großteiles aus Kapitel 1 von [6, S.16-33] entnommen.

**Tabelle 14: Statischer Festigkeitsnachweis mit Nennspannungen für die Schraube, eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

<b>Spannungskennwerte*</b>	
$a_{\ddot{a}q} = \sqrt{A_S} = \sqrt{84,3 \text{ mm}^2}$	9,182 mm
$S_{AS} = \frac{a_{\ddot{a}q}^3}{8} = \frac{(9,182 \text{ mm})^3}{8}$	96,77 mm <sup>3</sup>
$I_{AS} = \frac{d_S^4 \cdot \pi}{64} = \frac{(10,36 \text{ mm})^4 \cdot \pi}{64}$	565,5 mm <sup>4</sup>
$w_b = \frac{d_S^3 \cdot \pi}{32} = \frac{(10,36 \text{ mm})^3 \cdot \pi}{32}$	109,16 mm <sup>3</sup>
$w_t = \frac{d_S^3 \cdot \pi}{16} = \frac{(10,36 \text{ mm})^3 \cdot \pi}{16}$	218,32 mm <sup>3</sup>
$M_b^{\$} = \frac{F \cdot s}{24} = \frac{29600 \text{ N} \cdot 8 \text{ mm}}{24}$	9866,7 Nmm
$S_{zd} = \frac{F_M}{A_S} = \frac{19089,5 \text{ N}}{84,3 \text{ mm}^2}$	226,45 MPa
$S_b = \frac{M_b}{w_b} = \frac{9866,7 \text{ Nmm}}{109,16 \text{ mm}^3}$	90,4 MPa

$T_S = \frac{F \cdot S_{AS}}{4 \cdot I_{AS} \cdot a_{\ddot{a}q}} = \frac{29600 \text{ N} \cdot 96,77 \text{ mm}^3}{4 \cdot 565,5 \text{ mm}^4 \cdot 9,182 \text{ mm}}$	137,9 MPa
$T_t = \frac{M_A}{w_t} = \frac{37147,5 \text{ Nmm}}{218,32 \text{ mm}^3}$	170,2 MPa
<b>Werkstoffkennwerte**</b>	
$R_m$	800 MPa
$R_p$	640 MPa
$A$	12%
<b>Konstruktionskennwerte***</b>	
$f_R = 0,5 \cdot \left(1 + \frac{R_m}{R_p}\right) = 0,5 \cdot \left(1 + \frac{800 \text{ MPa}}{640 \text{ MPa}}\right)$	1,125
$n_{pl}$	1,125
<b>Bauteilfestigkeit</b>	
$f_\sigma$	1
$f_\tau$	0,577
$S_{SK,zd,b} = f_\sigma \cdot R_p \cdot n_{pl} = 1 \cdot 640 \text{ MPa} \cdot 1,125$	720 MPa
$T_{SK,s,t} = f_\tau \cdot R_p \cdot n_{pl} = 0,577 \cdot 640 \text{ MPa} \cdot 1,125$	415,44 MPa
<b>Gesamtsicherheitsfaktor</b>	
$j_s$	1

$j_m$	1,8
$K_{T,m}$	1
$j_{ges} = j_s \cdot j_G \cdot \text{MAX} \left( \frac{j_m}{K_{T,m}} \cdot \frac{R_p}{R_m}; \frac{j_p}{K_{T,p}}; \frac{j_{mt}}{K_{Tt,m}} \cdot \frac{R_p}{R_m}; \frac{j_{pt}}{K_{Tt,p}} \right)$ $= 1 \cdot \frac{1,8}{1} \cdot \frac{640 \text{ MPa}}{800 \text{ MPa}}$	1,44
<b>Auslastungsgrad<sup>\$\$</sup></b>	
$a_{SK,zd} = \frac{ S_{zd}  \cdot j_{ges}}{S_{SK,zd,b}} = \frac{226,45 \text{ MPa} \cdot 1,44}{720 \text{ MPa}}$	0,45
$a_{SK,b} = \frac{ S_b  \cdot j_{ges}}{S_{SK,zd,b}} = \frac{90,4 \text{ MPa} \cdot 1,44}{720 \text{ MPa}}$	0,18
$a_{SK,s} = \frac{ T_s  \cdot j_{ges}}{T_{SK,s,t}} = \frac{137,9 \text{ MPa} \cdot 1,44}{415,44 \text{ MPa}}$	0,48
$a_{SK,t} = \frac{ T_t  \cdot j_{ges}}{T_{SK,s,t}} = \frac{170,2 \text{ MPa} \cdot 1,44}{415,44 \text{ MPa}}$	0,59
$s = a_{SK,zd} + a_{SK,b} = 0,45 + 0,18$	0,63
$t = a_{SK,s} + a_{SK,t} = 0,48 + 0,59$	1,07
$a_{GH} = \sqrt{s^2 + t^2} = \sqrt{0,63^2 + 1,07^2}$	1,24
$a_{NH} = \frac{1}{2} \cdot \left(  s  + \sqrt{s^2 + 4 \cdot t^2} \right) = \frac{1}{2} \cdot \left( 0,63 + \sqrt{0,63^2 + 4 \cdot 1,07^2} \right)$	1,43
$q = \text{MAX} \left( \frac{\sqrt{3} - \left( \frac{1}{f_t} \right)}{\sqrt{3} - 1}; 0 \right) = \text{MAX} \left( \frac{\sqrt{3} - \left( \frac{1}{0,577} \right)}{\sqrt{3} - 1}; 0 \right)$	$\text{MAX}(-0,0014; 0)$ $\rightarrow 0$



$a_{SK,sv} = q \cdot a_{NH} + (1 - q) \cdot a_{GH} = 0 \cdot 1,43 + (1 - 0) \cdot 1,24$	1,24
---	------

Die in **dieser Schriftfarbe** geschriebenen Terme sind hinfällig, da keine hohen Temperaturen vorherrschen, das Verhältnis der Streckgrenze zur Zugfestigkeit größer als 0,75 ist und kein Gussbauteil untersucht wird.

- \* für  $S_{AS}$  wurde die Formel von [4, S.88] im Maximum angewandt.  $a_{\ddot{a}q}$  wurde für einen quadratischen Ersatzquerschnitt mit dem Betrag der Fläche von  $A_S$  eingeführt. Lt. [4] ist der Wert bei der Berechnung Schubspannung mit der nach [6] vorgeschlagenen Formel um den Faktor 1,5 höher als mit der konventionellen Annahme der konstanten Schubspannung über den gesamten Querschnitt. Mit der Methode des Ersatzquerschnitts liegt der Faktor in dem Fall etwas über 1,5. Das Ergebnis ist somit auf der sicheren Seite.
- \*\* aus [27, S.13] für die FKL 8.8
- \*\*\* Auf Grund der charakteristischen Geometrie von Schrauben, konnte dem Schaft mit Gewinde im kritischen Querschnitt keine eindeutige Formzahl zugewiesen werden. Daher konnte die in [6] auf S. 25 Gleichung (1.3.4) erwähnte Konstante nicht sinnvoll bestimmt werden um das eigentlich geforderte Doppelkriterium ähnlich zu Gleichung 24 zu prüfen.  
Da mit  $f_R$  die Eigenschaft des Materials der Verfestigung durch Verformung zum Teil berücksichtigt wird, dieses Verhalten ist für Stahl charakteristisch und wird dem Material daher als  $n_{pl}$  zu gesprochen. Allerdings wird auf weitere Faktoren zur Erhöhung der Streckgrenze aus Sicherheitsgründen verzichtet.
- § Die Gleichung leitet sich aus der Biegelinie 8 aus [28, C23] ab. Für die Länge wird die Bauteildicke eingesetzt sowie die Kraft auf zwei Schrauben und die Bauteilstärke aufgeteilt:
 
$$M_b = \frac{q \cdot l^2}{12} \quad \left| \quad q = \frac{F}{2 \cdot s} ; l = s \right.$$

$$M_b = \frac{F \cdot s^2}{2 \cdot s \cdot 12} \rightarrow M_b = \frac{F \cdot s}{24}$$
- §§ Der höhere der einzelnen Auslastungsgrade muss berücksichtigt werden, sowie der Vergleichsauslastungsgrad. Letzterer ist eine Mischung aus der Hypothese der Gestaltänderung und der Normalspannungshypothese. Der Faktor q berücksichtigt nach [6, S.31] den Fall, dass sich unter reiner Schubbeanspruchung, die Schubfestigkeit ergibt.

### 3.3.8 Nachweis

In der nachfolgenden Tabelle sind die Nachweise nach der FKM-Richtlinie gelistet

**Tabelle 15: Übersicht Nachweis der Komponenten (FKM), eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

Komponente	Kriterium	Auslastungsgrad	Prozentual $a_X \cdot 100 \%$
<b>Bauteil</b>	$a_{SK} = \frac{\sigma_V \cdot j_{ges}}{\sigma_{SK}} \leq 1$	0,641	64,1 %
<b>Schraube</b>	$a_{SK,t} = \frac{ T_t  \cdot j_{ges}}{T_{SK,t}} \leq 1$ und $a_{SK,sv} = q \cdot a_{NH} + (1 - q) \cdot a_{GH} \leq 1$	0,59 bzw. 1,24	59 % bzw. 124 %

Wie ersichtlich erfüllt das Bauteil das Kriterium und liegt mit einem prozentualen Auslastungsgrad bei 64,1 Prozent und somit auf der sicheren Seite.

Obwohl die Schraube die Einzelnachweise alle erfüllt, so ist die kombinatorische Auslastung größer als „1“ und der Nachweis daher nicht erfüllt. Somit muss eine Maßnahme zur Optimierung getroffen werden.

Zum Beispiel die Erhöhung der Festigkeitsklasse:

**Tabelle 16: Nachweisführung FKL 12.9, eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

Werkstoffkennwerte*	
$R_m$	1200 MPa
$R_p$	1080 MPa
$A$	8%

<b>Konstruktionskennwerte</b>	
$f_R = 0,5 \cdot \left(1 + \frac{R_m}{R_p}\right) = 0,5 \cdot \left(1 + \frac{1200 \text{ MPa}}{1080 \text{ MPa}}\right)$	1,056
$n_{pl}$	1,056
<b>Bauteilfestigkeit</b>	
$f_\sigma$	1
$f_\tau$	0,577
$S_{SK,zd,b} = f_\sigma \cdot R_p \cdot n_{pl} = 1 \cdot 1080 \text{ MPa} \cdot 1,056$	1140,48 MPa
$T_{SK,s,t} = f_\tau \cdot R_p \cdot n_{pl} = 0,577 \cdot 1080 \text{ MPa} \cdot 1,056$	658,06 MPa
<b>Gesamtsicherheitsfaktor**</b>	
$j_s$	1
$j_m$	1,8
$K_{T,m}$	1
$j_{ges} = j_s \cdot j_G \cdot \text{MAX} \left( \frac{j_m}{K_{T,m}} \cdot \frac{R_p}{R_m}; \frac{j_p}{K_{T,p}}; \frac{j_{mt}}{K_{Tt,m}} \cdot \frac{R_p}{R_m}; \frac{j_{pt}}{K_{Tt,p}} \right)$ $= 1 \cdot \frac{1,8}{1} \cdot \frac{1080 \text{ MPa}}{1200 \text{ MPa}}$	1,62
<b>Auslastungsgrad\$\$</b>	
$a_{SK,zd} = \frac{ S_{zd}  \cdot j_{ges}}{S_{SK,zd,b}} = \frac{226,45 \text{ MPa} \cdot 1,62}{1140,48 \text{ MPa}}$	0,32

$a_{SK,b} = \frac{ S_b  \cdot j_{ges}}{S_{SK,zd,b}} = \frac{90,4 \text{ MPa} \cdot 1,62}{1140,48 \text{ MPa}}$	0,13
$a_{SK,s} = \frac{ T_s  \cdot j_{ges}}{T_{SK,s,t}} = \frac{137,9 \text{ MPa} \cdot 1,62}{658,06 \text{ MPa}}$	0,34
$a_{SK,t} = \frac{ T_t  \cdot j_{ges}}{T_{SK,s,t}} = \frac{170,2 \text{ MPa} \cdot 1,62}{658,06 \text{ MPa}}$	0,42
$s = a_{SK,zd} + a_{SK,b} = 0,32 + 0,13$	0,45
$t = a_{SK,s} + a_{SK,t} = 0,34 + 0,42$	0,76
$a_{GH} = \sqrt{s^2 + t^2} = \sqrt{0,45^2 + 0,76^2}$	0,88
$a_{NH} = \frac{1}{2} \cdot ( s  + \sqrt{s^2 + 4 \cdot t^2}) = \frac{1}{2} \cdot (0,45 + \sqrt{0,45^2 + 4 \cdot 0,76^2})$	1,02
$q = \text{MAX} \left( \frac{\sqrt{3} - \left(\frac{1}{f_r}\right)}{\sqrt{3} - 1}; 0 \right) = \text{MAX} \left( \frac{\sqrt{3} - \left(\frac{1}{0,577}\right)}{\sqrt{3} - 1}; 0 \right)$	$\text{MAX}(-0,0014; 0)$ $\rightarrow 0$
$a_{SK,sv} = q \cdot a_{NH} + (1 - q) \cdot a_{GH} = 0 \cdot 1,02 + (1 - 0) \cdot 0,88$	0,88

\* aus [27, S.13] für die FKL 12.9

\*\* Der Gesamtsicherheitsfaktor muss dem neuen Verhältnis zwischen Streckgrenze und Zugfestigkeit entsprechend neu angepasst werden.

Durch Erhöhung der Festigkeitsklasse von 8.8 auf 12.9 ist die Verbindung im Sinne der FKM- Richtlinie auf der sicheren Seite. (Anmerkung: Eine Erhöhung auf die FKL 10.9 hätte nicht gereicht um den Nachweis vollständig zu erfüllen.)

### 3.4 Bemessung nach EN 1993-1-8

In der vorliegenden Norm entspricht eine Scher-Lochleibungsverbindung einer Verschraubung der Kategorie A. Weitere Verbindungen wären die Kategorie B der gleitfesten Verbindungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, Kategorie C der gleitfesten Verbindungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit sowie Kategorie D der nicht vorgespannten und Kategorie E der vorgespannten Verbindungen.

Für die in dieser Arbeit anzuwendenden Kategorie A müssen nach [9] die folgenden Nachweise erbracht werden. Die einwirkende Kraft muss nach [9] kleiner oder gleich der Abschertragfähigkeit der Schraube sein und die einwirkende Kraft muss kleiner oder gleich Lochleibungstragfähigkeit der Bauteile sein. Für die Tragfähigkeit des Bauteilquerschnitts wird in beiden Versionen auf die EN 1993-1-1 verwiesen.

Sind diese Kriterien erfüllt, ist die Schraubenverbindung konform mit der EN 1993-1-8 dimensioniert. Da zum Zeitpunkt des Verfassen der vorliegenden Diplomarbeit bereits eine neuere noch in der Entwurfsphase befindliche Version der EN 1993-1-8 existiert, werden je Berechnungsschritt auf die Abweichungen, falls welche vorhanden sind, eingegangen.

Die Formeln und Formelzeichen entsprechen den Vorgaben aus [9, Abschn. 5.5; 5.7] bzw. aus [7, Abschn. 3.4; 3.6] bei entsprechendem Unterschied.

Der Algorithmus für die Berechnung ist wie zuvor als Ablaufdiagramm nachfolgend dargestellt.

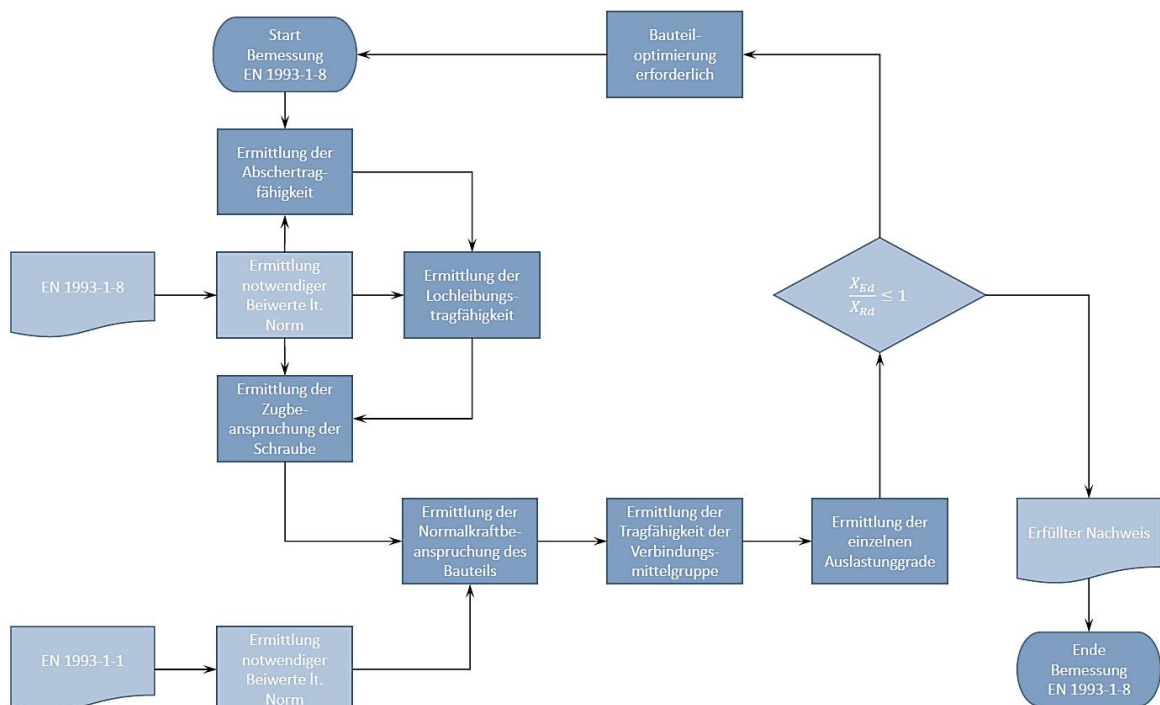


Abbildung 19: Ablaufdiagramm des EC3-Nachweises, eigene Darstellung G. Reisinger 2023

### 3.4.1 Abscheren je Scherfuge

In der Norm wird unterschieden, ob sich das Gewinde in der Scherfuge befindet oder der Schaft. Das in dieser Arbeit betrachtete Beispiel untersucht den Fall mit Gewinde in der Scherfuge.

Es gilt daher die folgende Beziehung für den Bemessungswert:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_S}{\gamma_{M2}} \cdot (\beta_p)$$

#### Gleichung 29: Berechnung des Bemessungswert für die Abschertragfähigkeit der Schraube

Die ursprüngliche Gleichung der Berechnung ist grundsätzlich ohne den Abminderungsbeiwert  $\beta_p$ . Dieser Beiwert sollte lt. [9, S.29] erst dann verwendet werden, wenn ein Futterblech (Korrekturblech zum Ausgleich wenn zum Beispiel zwei unterschiedliche hohe Profile an deren Gurte geschraubt werden sollen) in der Stärke den Grenzwert von einem Drittel des Nenndurchmessers des Verbindungsmittels überschreitet.

Es wurde entschieden diesen Abminderungsbeiwert trotzdem mit einzubeziehen, da es hier von den beiden Versionen der EN 1993-1-8 bei der Berechnung für den Bemessungswert keinen Unterschied gibt. Jedoch es in [10] Anhaltspunkte gibt, dass das Scherfestigkeitsverhältnis  $\alpha_v$  zum Teil zu hoch angesetzt ist und die Schrauben trotzdem versagt. In der neuen Version wurde diese Erkenntnis noch nicht berücksichtigt. Der Wert für  $\alpha_v$  den [10] für den vorliegenden Fall vorsehen würde, liegt bei 0,55 anstatt bei 0,6.

Daher wird dieses Defizit durch den Abminderungsbeiwert etwas ausgleichen. Die folgende Grafik zeigt eine Verbindung mit Futterblech zum besseren Verständnis:

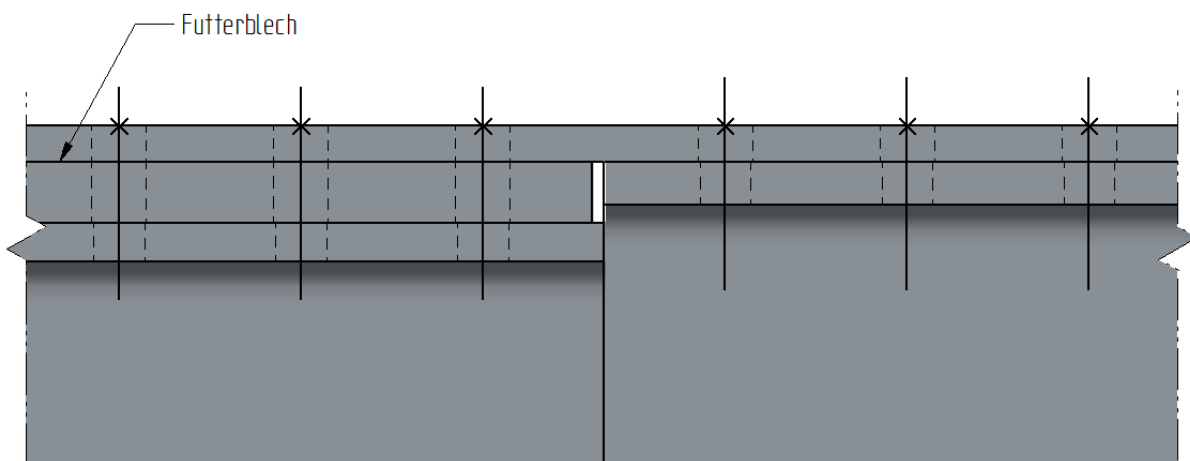


Abbildung 20: Verbindung mit Futterblech, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 in Anlehnung an Bild 5.5 nach [9]

Der Beiwert errechnet sich zu:

$$\beta_p = \frac{9 \cdot d}{8 \cdot d + 3 \cdot t_{pp}} \leq 1$$

$$\beta_p = \frac{9 \cdot 12 \text{ mm}}{8 \cdot 12 \text{ mm} + 3 \cdot 8 \text{ mm}} \leq 1$$

$$\beta_p = 0,9$$

**Gleichung 30: Abminderungsbeiwert für die Abschertragfähigkeit**

Damit kann nun in Gleichung 29 eingesetzt werden und  $F_{v,Rd}$  ergibt sich zu.

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \cdot 800 \text{ MPa} \cdot 84,3 \text{ mm}^2}{1,25} \cdot 0,9$$

$$F_{v,Rd} = 29134,1 \text{ N}$$

### 3.4.2 Lochleibung

Die Berechnung des Bemessungswertes für die Lochleibung weist in der Entwurfsfassung einen Unterschied auf. Die folgende Tabelle zeigt die links die Berechnung nach der Entwurfsversion und rechts jene der aktuell gültigen Version der EN 1993-1-8.

**Tabelle 17: Vergleich der Lochleibungstragfähigkeit zwischen aktueller Norm und der Entwurfsversion, eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

	Version März 2021	Version Dezember 2010
<b>Beiwert für die Lochleibungstragfähigkeit</b>	Für Randschrauben:	Für Randschrauben in Krafrichtung:
	$\alpha_b = \text{MIN} \left( \frac{e_1}{d_0}; 3 \cdot \frac{f_{ub}}{f_u}; 3 \right)$	$\alpha_b = \text{MIN } \alpha_d \left( \frac{e_1}{3 \cdot d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1 \right)$
	$\alpha_b = \text{MIN} \left\{ \begin{array}{l} \frac{16 \text{ mm}}{13,5 \text{ mm}}; \\ \frac{800 \text{ MPa}}{3 \cdot \frac{360 \text{ MPa}}{3}}; 3 \end{array} \right\}$	$\alpha_b = \text{MIN } \alpha_d \left\{ \begin{array}{l} \frac{16 \text{ mm}}{3 \cdot 13,5 \text{ mm}}; \\ \frac{800 \text{ MPa}}{360 \text{ MPa}}; 1 \end{array} \right\}$
	$\alpha_b = \text{MIN}(1,185; 6,667; 3)$ <p>→ <math>\alpha_b = 1,185</math></p>	$\alpha_b = \text{MIN } \alpha_d (0,395; 2,222; 1)$ <p>→ <math>\alpha_b = 0,395</math></p>
Für innenliegende Schrauben:	Für innenliegende Schrauben in Krafrichtung:	
$\alpha_b = \text{MIN} \left( \frac{p_1}{d_0} - \frac{1}{2}; 3 \cdot \frac{f_{ub}}{f_u}; 3 \right)$	$\alpha_b = \text{MIN } \alpha_d \left( \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1 \right)$	
$\alpha_b = \text{MIN} \left\{ \begin{array}{l} \frac{30 \text{ mm}}{13,5 \text{ mm}} - \frac{1}{2}; \\ \frac{800 \text{ MPa}}{3 \cdot \frac{360 \text{ MPa}}{3}}; 3 \end{array} \right\}$	$\alpha_b = \text{MIN } \alpha_d \left\{ \begin{array}{l} \frac{30 \text{ mm}}{3 \cdot 13,5 \text{ mm}} - \frac{1}{4}; \\ \frac{800 \text{ MPa}}{360 \text{ MPa}}; 1 \end{array} \right\}$	
$\alpha_b = \text{MIN}(1,722; 6,667; 3)$ <p>→ <math>\alpha_b = 1,722</math></p>	$\alpha_b = \text{MIN } \alpha_d (0,491; 2,222; 1)$ <p>→ <math>\alpha_b = 0,491</math></p>	



	Version März 2021	Version Dezember 2010
<b>Beiwert für die Lochleibungstragfähigkeit (Fortsetzung)</b>		<p>Für Randschrauben quer zur Krafrichtung:</p> $k_1 = \text{MIN} \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7; \\ 1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \end{array} \right\}$ $k_1 = \text{MIN} \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \cdot \frac{16 \text{ mm}}{13,5 \text{ mm}} \\ -1,7; 2,5 \end{array} \right\}$ $k_1 = \text{MIN}(1,619; 2,5)$ <p>→ <math>k_1 = 1,619</math></p> <p>Für innenliegende Schrauben quer zur Krafrichtung:</p> $k_1 = \text{MIN} \left( 1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right)$ <p>→ <math>k_1 = 2,5</math></p>

Die in **dieser Schriftfarbe** geschriebenen Formeln sind hinfällig da der Lochabstand  $p_2$  in dem Fall nicht existent ist.

	Version März 2021	Version Dezember 2010
<b>Bemessungswert Lochleibungs- tragfähigkeit (Fortsetzung)</b>	$F_{b,Rd} = \frac{k_m^* \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$	$F_{b,Rd} = \frac{k_1^{**} \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$
	Für Randschrauben:	Für Randschrauben:
	$F_{b,Rd} = \frac{1 \cdot 1,185 \cdot 360 \cdot 12 \cdot 8}{1,25}$	$F_{b,Rd} = \frac{1,619 \cdot 0,395 \cdot 360 \cdot 12 \cdot 8}{1,25}$
	$F_{b,Rd} = 32762,9 \text{ N}$	$F_{b,Rd} = 17681 \text{ N}$
	Für innenliegende Schrauben:	Für innenliegende Schrauben:
	$F_{b,Rd} = \frac{1 \cdot 1,722 \cdot 360 \cdot 12 \cdot 8}{1,25}$	$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot 0,491 \cdot 360 \cdot 12 \cdot 8}{1,25}$
$F_{b,Rd} = 47609,9 \text{ N}$	$F_{b,Rd} = 33937,9 \text{ N}$	

\* für Stahlsorten höher oder gleichwertig mit S460  $k_m = 0,9$  ansonsten gilt  $k_m = 1$

\*\* Dieser Wert berücksichtigt nach [17] die Randabstände und beeinflusst die Lochleibungstragfähigkeit im Hinblick auf Schubversagen, Versagen des Nettoquerschnittes oder der Lochaufweitung.

In der Entwurfsversion wird in [9, Gl. 5.16]  $F_{b,Rd}$  für Randschrauben durch den Wert der Tragfähigkeit des Nettoquerschnitts begrenzt.

Die aktuell gültige Version sieht diese Begrenzung nicht vor da dies über den  $k_1$  – Faktor geschieht.

Die Begrenzung der Lochleibungstragfähigkeit für mehrere Schrauben ergibt sich nach [9] über das Doppelkriterium zu:

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

**Gleichung 31: Begrenzung der Lochleibungstragfähigkeit bei mehreren Schrauben.**

Der Widerstand gegen Blockversagen kann wie folgt berechnet werden:

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

$$V_{eff,1,Rd} = \frac{\left[ 74 \text{ mm}^2 \cdot 360 \text{ MPa} + \min\left(\frac{368 \text{ mm}^2 \cdot 235 \text{ MPa}}{\sqrt{3}}; \frac{206 \text{ mm}^2 \cdot 360 \text{ MPa}}{\sqrt{3}}\right) \right]}{1,25}$$

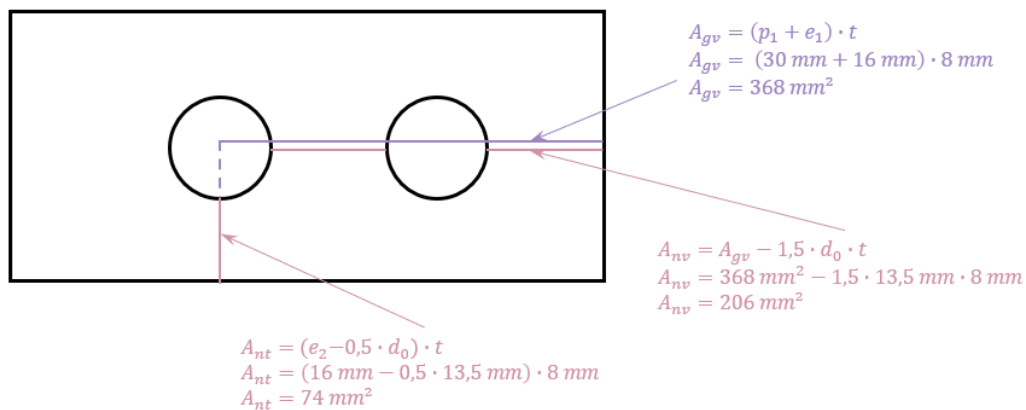
$$V_{eff,1,Rd} = \frac{[26640 \text{ N} + \min(49929,3 \text{ N}; 42816,3 \text{ N})]}{1,25}$$

$$V_{eff,1,Rd} = \frac{26640 \text{ N} + 42816,3 \text{ N}}{1,25} = \frac{69456,3 \text{ N}}{1,25}$$

$$V_{eff,1,Rd} = 55565 \text{ N}$$

### Gleichung 32: Ermittlung des Widerstands gegen Blockversagen

In der folgenden Abbildung sind die verantwortlichen Flächen für Blockversagen schematisch nach [9] dargestellt.



**Abbildung 21: Schematische Darstellung der verantwortlichen Flächen für Blockversagen, eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

Für den vorliegenden Fall wäre das Blockversagen auch ein eher unwahrscheinlicher Versagensmodus. Da dieses Phänomen eher Querschnitte betrifft bei denen  $e_2$  unterschiedlich groß ist und eine Seite daher eine größeren Nettoquerschnitt aufweist. So kann Blockversagen des Bauteils auftreten.

Durch die Kontrolle des Doppelkriteriums ist auch ersichtlich, dass die gesamte Nettoquerschnittsfläche um die Bohrung weniger belastbar ist als der Block.

Somit kann in Gleichung 31 eingesetzt werden:

$$N_{u,Rd} = \min \left( \frac{0,75 \cdot 148 \text{ mm}^2 \cdot 360 \text{ MPa}}{1,25}; 55565 \text{ N} \right)$$

$$N_{u,Rd} = \min (31968 \text{ N}; 55565 \text{ N})$$

$$N_{u,Rd} = 31968 \text{ N}$$

Da der Wert der Lochleibungstragfähigkeit der Schrauben über dem Begrenzungswert liegen, ergibt sich die Lochleibungstragfähigkeit der Randschraube zu  $F_{b,Rd}$  zu 31968 N.

### 3.4.3 Zugbeanspruchung der Schraube

Die im Beispiel auftretenden Zugkraft ist durch die handfeste Montage und die dadurch entstehende Vorspannung der Schraube verursacht. Diese wird durch das Setzen zwar betragsmäßig kleiner, da aber die EN 1993-1-8 auch einen Nachweis für kombinierte Beanspruchung von Zug - Scher - / Lochleibungsbeanspruchung vorsieht, darf auch diese nicht vernachlässigt werden.

Der Bemessungswert für die Zugbeanspruchung ergibt sich zu:

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_{ub} \cdot A_S}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \cdot 800 \text{ MPa} \cdot 84,3 \text{ mm}^2}{1,25}$$

$$F_{t,Rd} = 48556,8 \text{ N}$$

**Gleichung 33: Bemessungswert für die Zugbeanspruchung einer Schraube**

### 3.4.4 Normalkraftbeanspruchung des Bauteils

Für die Bemessung der Tragfähigkeit des Nettoquerschnitts wird wie in beiden Versionen für die Abschwächung des Querschnittes durch Löcher auf die EN 1993-1-1 verwiesen.

Da auch eine neuere Entwurfsversion der EN 1993-1-1 vorliegt wurden die entsprechende Bemessungsgleichung miteinander verglichen. Der einzige Unterschied ist, dass ein Abminderungsbeiwert für die Herstellungsart der Löcher bzw. ob Ermüdung auftreten kann, wie in [8, S.60] bzw. [29, S.54] ersichtlich ist.

Es wurde entschieden mit den Abminderungsbeiwert für Ermüdung bzw. Herstellung der Bohrungen durch Brennschneiden zu arbeiten. Beide Annahmen sind gerechtfertigt, da zum Einen die Herstellung von Bauteilen durch Brennschnitt aus der modernen Industrie nicht mehr weg zu denken ist, auch für einfache Bauteile, zum anderen aber auch durch

permanent wirkende statische Lasten das Material durch Retardation einen Ermüdungsprozess unterliegt.

Somit ergibt sich der Bemessungswert für die Normalkraftbeanspruchung zu und unterscheidet sich nicht mehr von der aktuell gültigen Version der EN 1993-1-1:

$$N_{t,Rd} = \text{MIN} \left( \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}; \frac{0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \right)$$

$$N_{t,Rd} = \text{MIN} \left( \frac{256 \text{ mm}^2 \cdot 235 \text{ MPa}}{1,0}; \frac{0,9 \cdot 148 \text{ mm}^2 \cdot 360 \text{ MPa}}{1,25} \right)$$

$$N_{t,Rd} = \text{MIN}(60160 \text{ N}; 38361,6 \text{ N})$$

$$N_{t,Rd} = 38361,6 \text{ N}$$

**Gleichung 34: Bemessungswert für die Nettoquerschnittstragfähigkeit**

### 3.4.5 Tragfähigkeit der Verbindungsmittelgruppe

Da es sich um Verbindungsmittelgruppe bestehend aus zwei Schrauben handelt, ist die Gesamtbeanspruchbarkeit zu ermitteln.

In beiden Versionen entscheidet folgendes Grundkriterium wie die Gesamttragfähigkeit ermittelt werden darf:

$$F_{v,Rd} \geq F_{b,Rd}$$

Ist dieses Kriterium erfüllt dürfen in beiden Versionen die einzelnen Lochleibungstragfähigkeiten der Schrauben addiert werden.

Nachfolgend wurde das Kriterium geprüft.

**Tabelle 18: Grundkriterium für die Gesamttragfähigkeit der Verbindungsmittelgruppe**

Position	Version März 2021	Version Dezember 2010	Trifft zu
<b>Randschraube</b>	$29134,1 \text{ N} \geq 31968 \text{ N}$	$29134,1 \text{ N} \geq 17681 \text{ N}$	<i>nein   ja</i>
<b>Innenliegende Schraube</b>	$29134,1 \text{ N} \geq 47609,9 \text{ N}$	$29134,1 \text{ N} \geq 33937,9 \text{ N}$	<i>nein   nein</i>

Da das Grundkriterium nur in einem Fall erfüllt wird, wird auch hier das Kriterium mit den kleinsten gesamten Bemessungswert gewählt, welches sich aus der Anzahl der Schrauben multipliziert mit dem kleinsten Bemessungswert ergibt. In der Version Dezember 2010

der EN 1993-1-8 wird hier noch zwischen Abschertragfähigkeit der Schraube und Lochleibungstragfähigkeit unterschieden. In der Version vom März 2021 der EN 1993-1-8 ist nur noch die Abschertragfähigkeit maßgebend.

Die folgende Tabelle zeigt die im Nachweis anzusetzenden Bemessungswerte wobei jeweils der kleinste Wert zählt.

**Tabelle 19: Bemessungswerte der Tragfähigkeit der Verbindungsmittelgruppe, eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

Version März 2021	Version Dezember 2010
$\sum F_{Rd} = n \cdot F_{v,Rd,min}$	$F_{v,Rd} = n \cdot F_{v,Rd,min}$
$\sum F_{Rd} = 2 \cdot 29134,1 N$	$F_{v,Rd} = 2 \cdot 29134,1 N$
$\sum F_{Rd} = 58268,2 N$	$F_{v,Rd} = 58268,2 N$
	$F_{b,Rd} = n \cdot F_{b,Rd,min}$
	$F_{b,Rd} = 2 \cdot 17681 N$
	$F_{b,Rd} = 35362 N$

### 3.4.6 Nachweis

In der nachfolgenden Tabelle sind die Nachweise nach dem EC3 gelistet.

**Tabelle 20: Nachweisergebnisse nach EN 1993-1-8, eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

Kriterium	Entwurfsversion	Aktuelle Version	Auslastungsgrad $\frac{X_{Ed}}{X_{Rd}} \cdot 100 \%$
$\frac{F_{v,Ed}}{2} \leq F_{v,Rd}^*$	14800 N ≤ 58268,2 N		25,4 %
$F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}^*$	29600 N ≤ 58268,2 N	29600 N ≤ 35362 N	50,8 % bzw. 83,7 %
$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$	19089,5 N ≤ 48556,8 N		39,3%
$\frac{F_{v,Ed}}{2 \cdot F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1$	0,535 ≤ 1**		53,5 %
$N_{Ed} \leq N_{t,Rd}$	29600 N ≤ 38361,6 N		77,2 %

\* Für die Werte  $F_{v,Rd}$  und  $F_{b,Rd}$  wurden die jeweiligen Gesamtwerte eingesetzt, da ja die gesamte Verbindungsmittelgruppe die Last aufnimmt. Die angreifende Last  $F_{v,Ed}$  darf ebenfalls auf Grund der zweiseitigen Verbindung für die Abschertragfähigkeit halbiert werden. Nicht aber für die Lochleibung, da die zweite Schraube bereits über die Tragfähigkeit der Verbindungsmittelgruppe berücksichtigt wurde.

\*\* Der erste Term beschreibt wieder die Auslastung der gesamten Verbindungsmittelgruppe, oder umgekehrt formuliert die Auslastung einer einzelnen Schraube. Der zweite Term darf allerdings nicht aufgeteilt werden, da die Vorspannkraft für jede Schraube einzeln aufgebracht wird.

Wie aus der Tabelle 20 hervorgeht, ist der Nachweis im Sinne der Bemessung nach EN 1993-1-8 in allen Fällen für die Schraube und das Bauteil erbracht. Da alle Auslastungsgrade unter 100 Prozent liegen und mindestens 16,3 Prozent Traglastreserve aufweisen.

## 4 Zusammenfassung

Das Konzept der Nennspannungen in der FKM-Richtlinie liefert für die Schraube eine interessante Alternative zur VDI 2230. Auch wenn in der vorliegenden Arbeit Elemente der VDI 2230 übernommen wurde, sind diese nicht zwingend notwendig. Auch für die mit einbezogene können alternative Näherungen versucht werden. Die Werte einer Vorspannkraft und eines Schraubenanzugsmoment könnten auch direkt aus vorhandenen Tabellen entnommen werden, hier waren die Berechnungen nur notwendig um den Einfluss der handfesten Vorspannung einfließen zu lassen.

Letzteres stellt allerdings ein auch ein Versäumnis dar. Der Wert der Vorspannung mit Handkraft unterliegt von Natur aus, auch ohne den Streufaktor der VDI 2230 berücksichtigt zu haben, einer großen Streuung. Das hat sich auch bei der Durchsicht von den normativen Werten der menschlichen Körperkräfte gezeigt, dass durch den sorgfältig ausgewählten normativen Wert der Betrag der resultierenden handfesten Vorspannkraft nicht zu unterschätzen ist. Das hat sich sowohl im Auslastungsgrad der FKM-Richtlinie als auch in jenem des EC3 deutlich niedergeschlagen.

Im EC3 werden für den Querschnitt und die Lochleibung getrennte Nachweise gefordert. Für die FKM Richtlinie ist grundsätzlich die höchste Vergleichsspannung maßgebend. Sollte mit dem Nennspannungskonzept gearbeitet werden ist ein Vergleichsauslastungsgrad zusätzlich zu bilden und darf wie jeder Einzelauslastungsgrad 100 Prozent nicht übersteigen. Jedoch ist für den Lochleibungsdruck das örtliche Spannungskonzept am besten geeignet, da der Nachweispunkt am einfachsten auffindbar ist.

Da auch bereits eine Entwurfsversion der EN 1993-1-8 verfügbar ist, darf an dieser Stelle Angemerkt werden, dass das Vorgehen zur Bemessung der Scher-Lochleibungsverbindung im Grunde nur bei der Lochleibungstragfähigkeit einen signifikanten Unterschied zur Vorgängerversion aufweist. Da diese in der neuen Version über den Nettoquerschnitt begrenzt wird. Durch dieses Vorgehen wird die Lochleibungstragfähigkeit in der Entwurfsversion auch eindeutiger für einreihige Schraubenverbindungen definiert.

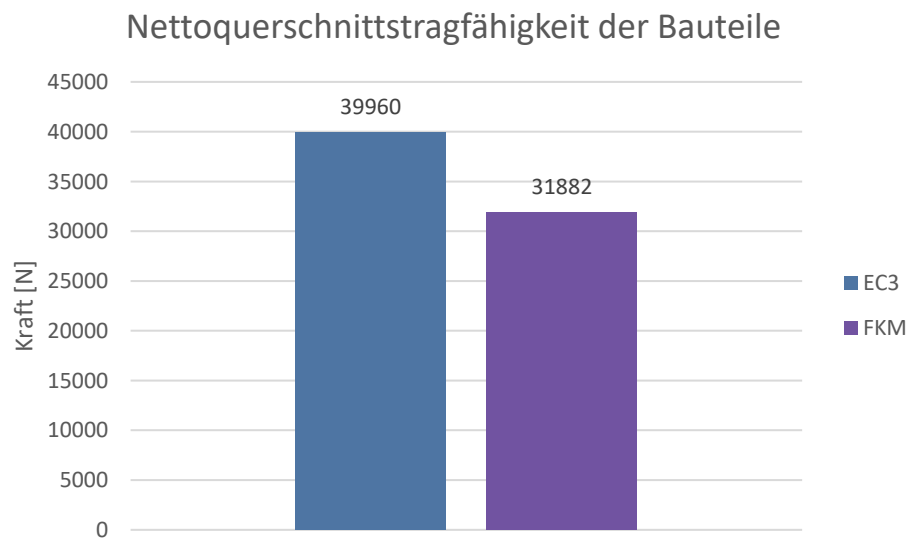


## 4.1 Diskussion der Ergebnisse

Die Auslastungsgrade alleine sind für einen Vergleich der Richtlinien nicht aussagekräftig genug. Da insbes. bei der FKM-Richtlinie diese durch äußere Einflüsse und von Auftretenswahrscheinlichkeiten, welche individuellen Entscheidungen in der Anwendung unterliegen, abhängig sind. Der Auslastungsgrad unterliegt daher einer größeren Streuweite. Das gilt zwar zum Teil auch für die Material- Geometrie- und Herstellungsbeiwerte, jedoch sind diese etwas genauer festgelegt und unterliegen dem Materialgesetz.

Um somit die Ergebnisse besser vergleichen zu können, werden die zugestandenen Traglasten daher ohne Sicherheitsbeiwerte ermittelt und auf den Querschnitt von 148 mm<sup>2</sup> bezogen. So kann diskutiert werden welche Grenzlast die jeweilige Richtlinie den einzelnen Komponenten zugesteht.

Zu Beginn werden die Ergebnisse der Bauteile verglichen.



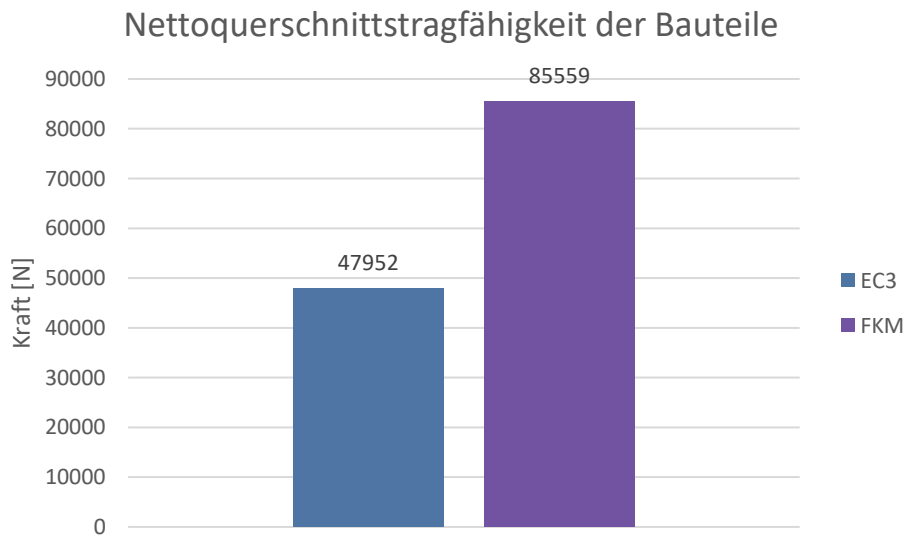
**Abbildung 22: Vergleich zwischen  $N_{u,Rd}$  und der vollplastischen Traglast, eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

Da die Lochleibungstragfähigkeit durch die Nettoquerschnittstragfähigkeit begrenzt wurde, wird das Ergebnis direkt mit der vollplastischen Traglast verglichen, welcher sich auf denselben Querschnitt bezieht. Die vollplastische Traglast stellt den Grenzwert für den Beginn der plastischen Verformung dar.

Wie erkenntlich liegen die Ergebnisse hier noch relativ nahe beisammen.

Der EC3 gesteht dem Bauteil tatsächlich eine höhere Tragfähigkeit zu, da an dieser Stelle in der EN 1993-1-8 für die Ermittlung der Tragfähigkeit des Querschnittes auf die EN 1993-1-1 verwiesen wird. In der FKM-Richtlinie wird dem Bauteil ebenfalls eine höhere Tragfähigkeit zugestanden.

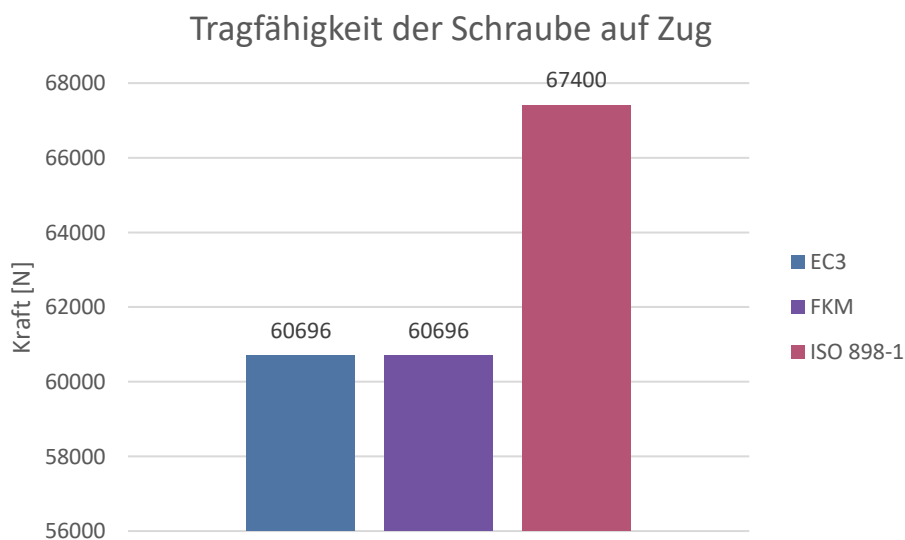
Somit wäre die Tragfähigkeit des Bauteils im Vergleich:



**Abbildung 23: Zugestandene Tragfähigkeit des Bauteils der einzelnen Richtlinien, eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

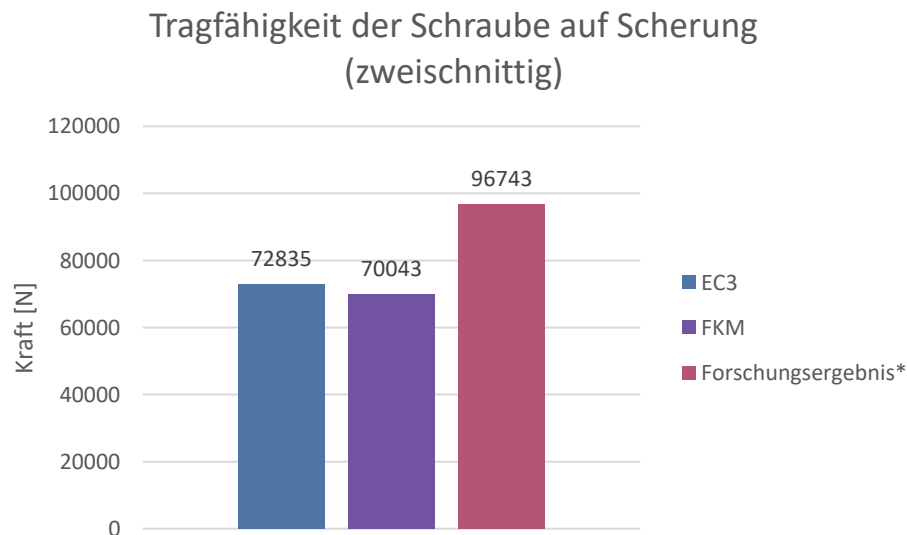
Dies sind die Tragfähigkeiten die dem Bauteil je Richtlinie zugesprochen werden und auf  $A_{\text{net}}$  bezogen worden sind. Der EC3 liegt damit in der Bauteilfestigkeit mit dem Faktor von rund 1,78 unter der FKM-Richtlinie und spricht dem Bauteil weniger Tragfähigkeit zu als die FKM-Richtlinie.

Als nächstes werden die Ergebnisse der Schraube verglichen. Da für die FKM-Richtlinie zwei verschiedene Nachweise unterschiedlicher FKL geführt werden musste, werden hier nur die Ergebnisse für die FKL 8.8 verglichen. Wie zuvor werden die Ergebnisse ohne Sicherheitsfaktor betrachtet und auf den Spannungsquerschnitt bezogen.



**Abbildung 24: Zugestandene Tragfähigkeit auf Zug der Schraube, eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

Für die bessere Einordnung der Ergebnisse wurde die Mindestbruchkraft aus der ISO 898-1 hinzugezogen. Wie ersichtlich hat sich die Prämisse nur den Verfestigungsfaktor als Zugeständnis in der Erhöhung der Tragfähigkeit der Schraube als durchaus gerechtfertigt erwiesen. Der Wert der FKM-Richtlinie und EC3 sind ident.



**Abbildung 25: Zugestandene Tragfähigkeit auf Scherung (zweischnittig) der Schraube, eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

\* Wert umgerechnet auf  $A_S$  für ISO 4070 M12 FKL 8.8 zweischnittig aus [10]

Als Vergleichswert für die Tragfähigkeit wurden die Forschungsergebnisse aus [10] herangezogen, da keine normativen Werte zur Verfügung gestanden haben. Wie ersichtlich spricht der EC3 eine um den Faktor von rund 1,04 höhere Tragfähigkeit für die Scherung als Bemessungswert auf als die FKM-Richtlinie, somit sind diese Ergebnisse ebenfalls nahezu Deckungsgleich.

Wie hier hervorgegangen ist, sprechen beide Richtlinien der Schraube ähnliche Tragfähigkeiten im Hinblick auf die Zug- und Schubbelastung zu.

## 4.2 Schlussfolgerung

Der Unterschied in den Richtlinien bei der Tragfähigkeit ist bei den Bauteilen am größten. Die FKM-Richtlinie erhöht vor allem durch die plastische Stützzahl, den technologischen Größtenfaktor und den Verfestigungsfaktor die Bauteilfestigkeit signifikant. In Anbetracht dessen, kann schlussgefolgert werden, dass im Hinblick auf die Tragfähigkeit der Bauteile der EC3 dennoch auf der sicheren Seite in den Annahmen liegt da dieser gegen die Zugfestigkeit durch entsprechende Abminderung absichert. Obwohl wie in Abbildung 22 die vollplastische Traglast und die Tragfähigkeit des EC3 eine ähnliche Größenordnung aufgewiesen haben.

Bauteile dieser Art dürfen aber grundsätzlich immer mit der FKM-Richtlinie bewertet werden. Somit stellt sich nicht die Frage der Tauglichkeit in der Verwendung. Das Bauteil ist in beiden Richtlinien als brauchbar nachgewiesen worden.

Viel interessanter ist die Betrachtung der Schraube. Wie sich herausgestellt hat, ist die Bemessungslast aus der FKM-Richtlinie als auch die aus dem EC3 in derselben Größenordnung, für die Bemessungslast der Zugbeanspruchung sogar gleich. Für Schubbeanspruchung ist das ähnlich zu sehen. Im Vergleich zu den tatsächlichen Bruchkräften, liefert das Vorgehen beider Richtlinien brauchbare Bemessungswerte. Das Problem weswegen die FKL 8.8 den Nachweis der FKM-Richtlinie nicht erfüllt, liegt am Sicherheitskonzept der FKM-Richtlinie. Die Einzelnachweise wurden alle erfüllt nur der Vergleichsauslastungsgrad lässt die Schraube nicht verwendbar erscheinen. Damit liegt die Vermutung nahe, dass die FKM-Richtlinie auf der konservativen Seite liegt.

In Anbetracht der zugestandenen Tragfähigkeiten im Vergleich mit Forschungsergebnissen und normativen Bestimmungen ist es aber möglich eine Bewertung einer statisch Beanspruchten Schraube mit dem Nennspannungskonzept der FKM-Richtlinie zu führen.

## 5 Ergänzung und Ausblick

Wie sich gezeigt hat ergibt sich tatsächlich Potential für FKM-Richtlinie zur Bewertung von statisch beanspruchten Schraubenverbindungen.

Für die Bauteile sollte noch die alternative Betrachtung mit den Nennspannungen zusätzlich geprüft werden, sowie auch die Beanspruchung unter kurzzeitig höheren Temperaturen, welche zur Absicherung in einem Brandfall durchaus von Bedeutung sein können. Des Weiteren kann die Richtlinie im Hinblick auf gleitfeste und dynamische beanspruchte Schraubenverbindung überprüft werden, ob da ebenfalls das Potential einer Weiterentwicklung der FKM-Richtlinie gegeben ist.

Der Vorteil der Eingliederung von Schraubenverbindungen in die FKM-Richtlinie wäre, dass es nur einer einzigen Richtlinie bedarf um die Bewertung einer Konstruktion im Maschinenbau anfertigen zu können.

Den konstruktiven Ingenieurbau letztendlich davon zu überzeugen den Eurocode 3 aufzugeben und stattdessen auf die FKM-Richtlinie zurückzugreifen ist ein klares Ding der Unmöglichkeit.

Jedoch ist es vorstellbar in eine brauchbare anerkannte Alternative zu schaffen, speziell wenn bereits eine FEA vorliegt kann auf das örtliche Spannungskonzept zurückgegriffen werden und die Verbindung bewertet werden.

Für diesen Fall sollten allerdings dann ein einheitliches Formelzeichensystem für die Schraubenverbindungen entwickelt werden.

Damit die Weiterentwicklung stattfinden kann, müssen die hier präsentierten Ergebnisse noch experimentell validiert werden. Insbes. auch die hier ermittelten FEA-Ergebnisse welche mit dem ebenen Spannungszustand errechnet worden sind. Zwar hat der Vergleich mit der vollplastischen Traglast und der Begrenzungskraft für die Lochleibung zwar ein Indiz geliefert, dass zumindest ein konservatives Ergebnis erreicht wird. Jedoch nicht einen endgültigen Beweis ob diese Ergebnisse als ausreichend genau eingeordnet werden können. Weiters ist eine experimentelle Validierung für die Bewertung der Schraube mit der FKM-Richtlinie unumgänglich, da diese grundsätzlich nicht zugelassen ist. Sowie gegebenenfalls eine angepasste Ermittlung des Auslastungsgrades für Schrauben zu entwickeln.

Es empfiehlt sich auch die handfeste Vorspannung im allgemeinen für Schraubenverbindungen genauer zu untersuchen und die Daten normativ als Anhaltswerte für Berechnungen zur Verfügung zu stellen.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] WEIßBACH, Wolfgang; DAHMS, Michael (Mitarb.): *Werkstoffkunde : Strukturen, Eigenschaften, Prüfung ; mit 248 Tabellen*. 18., überarb. Aufl. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2012 (Studium Festigkeitslehre und Werkstofftechnik)
- [2] DIN EN ISO 4017. Oktober 2022. *DIN EN ISO 4017:2022-10, Verbindungselemente\_ - Sechskantschrauben mit Gewinde bis Kopf\_ - Produktklassen\_A und\_B (ISO\_4017:2022); Deutsche Fassung EN\_ISO\_4017:2022*
- [3] WÜRTH HANDELSGES.M.B.H.: *Online Katalog "Der Würth Gesamtkatalog"*. URL [https://media.witglobal.net/bkmedia/wuerth/3123/de/CompleteCatalog/?mode=or&searchquery=1557908&hook\\_url=https%3A%2F%2Feshop.wuerth.at%2F%2F#page\\_1](https://media.witglobal.net/bkmedia/wuerth/3123/de/CompleteCatalog/?mode=or&searchquery=1557908&hook_url=https%3A%2F%2Feshop.wuerth.at%2F%2F#page_1). – Aktualisierungsdatum: Verfügbar am 2022-09-04 um 14.29 Uhr
- [4] DECKER, Karl-Heinz (Hrsg.); KABUS, Karlheinz (Hrsg.); RIEG, Frank (Mitarb.); WEIDERMANN, Frank (Mitarb.); ENGELKEN, Gerhard (Mitarb.); HACKENSCHMIDT, Reinhard (Mitarb.); ALBER-LAUKANT, Bettina (Mitarb.) : *Tabellen und Diagramme*. 20., neu bearbeitete Auflage. München : Hanser, 2018 (Maschinenelemente / von Karl-Heinz Decker. Überarb. von Karlheinz Kabus tab,20)
- [5] Richtlinie VDI 2230 Blatt 1. November 2015. *Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen Zylindrische Einschraubenverbindungen*
- [6] FORSCHUNGSKURATORIUM MASCHINENBAU E.V., [Hrsg.]; RENNERT, Roland (Mitarb.); KULLIG, Eckehard (Mitarb.); VORMWALD, Michael (Mitarb.); ESDERTS, Alfons (Mitarb.); LUKE, Michael (Mitarb.) : *Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen : Made of steel, cast iron and aluminium materials : FKM guideline*. 7., überarbeitete Auflage. Frankfurt am Main : Beuth Verlag GmbH, 2020 (FKM-Richtlinie)
- [7] DIN EN 1993-1-8. Dezember 2010. *DIN EN 1993-1-8:2010-12, Eurocode\_3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten\_ - Teil\_1-8: Bemessung von Anschlüssen; Deutsche Fassung EN\_1993-1-8:2005\_+ AC:2009*
- [8] DIN EN 1993-1-1. August 2020. *DIN EN 1993-1-1:2020-08, Eurocode\_3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten\_ - Teil\_1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche und Englische Fassung prEN\_1993-1-1:2020*
- [9] DIN EN 1993-1-8. März 2021. *DIN EN 1993-1-8:2021-03, Eurocode\_3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten\_ - Teil\_1-8: Bemessung von Anschlüssen; Deutsche und Englische Fassung prEN\_1993-1-8:2021*

- [10] DÖRRE, M. ; GLIENKE, R. ; DENKERT, C. ; BERSCHNEIDER, G.: *Bewertung des Scherfestigkeitsverhältnisses für Schrauben festgelegter Festigkeitsklassen : Evaluation of the shearing strength ratio for bolts with defined strength grades*. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & CO. KGaA, 2019, S. 382–404
- [11] KALKOWSKY, Florian ; GLIENKE, Ralf ; DÖRRE, Maik ; HENKEL, Knuth-Michael: *Möglichkeit zum Nachweis der Ermüdungsfestigkeit mit Nennspannungen auf Basis des Eurocode 3 und aktueller FKM-Richtlinie für nichtgeschweißte Bauteile*. URL [https://www.researchgate.net/publication/350157422\\_Möglichkeit\\_zum\\_Nachweis\\_der\\_Ermüdungsfestigkeit\\_mit\\_Nennspannungen\\_auf\\_Basis\\_des\\_Eurocode\\_3\\_und\\_aktueller\\_FKM-Richtlinie\\_für\\_nichtgeschweißte\\_Bauteile](https://www.researchgate.net/publication/350157422_Möglichkeit_zum_Nachweis_der_Ermüdungsfestigkeit_mit_Nennspannungen_auf_Basis_des_Eurocode_3_und_aktueller_FKM-Richtlinie_für_nichtgeschweißte_Bauteile). – Aktualisierungsdatum: verfügbar am 2022-11-04 um 15:04 Uhr
- [12] VERERFVEN, Manuel, BSc: *Bewertung der Lochleibungstragfähigkeit von Schraubenverbindungen mittels FEM : Masterarbeit*. Innsbruck, Oktober 2017
- [13] KREIßIG, Reiner ; BENEDIX, Ulrich: *Höhere technische Mechanik : Lehr- und Übungsbuch*. Wien : Springer, 2002 (Springer Technik)
- [14] RUST, Wilhelm: *Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen : Kontakt, Kinematik, Material*. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2016 (Lehrbuch)
- [15] AUSTRIAN STANDARDS INTERNATIONAL: *Eurocodes Eine stille Revolution im Bauwesen*. URL <https://www.austrian-standards.at/de/themengebiete/bau-immobilien/eurocodes#7.1%20Eurocode%20%C3%9Cbersicht>. – Aktualisierungsdatum: 2022-08-21 um 19:39 Uhr
- [16] AUSTRIAN STANDARD INTERNATIONAL: *Stand der Implementierung von Eurocodes in Austria*. URL [https://www.austrian-standards.at/dokumente/Themengebiete/Bau%20%26%20Immobilien/Stand\\_Implementierung\\_Eurocodes\\_Austria\\_2016-03.pdf](https://www.austrian-standards.at/dokumente/Themengebiete/Bau%20%26%20Immobilien/Stand_Implementierung_Eurocodes_Austria_2016-03.pdf). – Aktualisierungsdatum: verfügbar am 2022-08-22 um 20:22 Uhr
- [17] KALKOWSKY, Florian ; GLIENKE, Ralf ; BLUNK, Christoph ; DÖRRE, Maik ; HENKEL, Knuth-Michael: *Zur Bemessung von Scher-/Lochleibungsverbindungen mit Blindnieten im Stahlbau*. In: *Stahlbau* 89 (2020), Nr. 4, S. 304–325
- [18] DIN EN 1090-2. September 2018. *DIN EN 1090-2:2018-09, Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken\_ - Teil\_2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken; Deutsche Fassung EN\_1090-2:2018*
- [19] Richtlinie VDI 2230 Blatt 2. Dezember 2014. *Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen Mehrschraubenverbindungen*

- [20] DIN 33411-5. September 2022. *DIN 33411-5:2022-09, Körperkräfte des Menschen\_ - Teil\_5: Maximale statische Aktionskräfte, Werte*
- [21] DIN 3113. September 2007. *DIN 3113:2007-09, Ring-Maulschlüssel mit gleichen Schlüsselweiten\_ - Prüfdrehmomente nach Reihe\_A und\_C*
- [22] DIN EN ISO 4032. Juni 2022. *DIN EN ISO 4032:2022-06, Mechanische Verbindungselemente\_ - Sechskantmuttern (Typ\_1) (ISO/DIS\_4032.2:2022); Deutsche und Englische Fassung prEN\_ISO\_4032:2022*
- [23] EINBOCK AKADEMIE: *Die plastische Formzahl nach der FKM Richtlinie einfach mit FEM Berechnen. Eine Schritt für Schritt Anleitung.* URL <https://www.einbock-akademie.de/die-plastische-formzahl-nach-der-fkm-richtlinie-mit-fem-schritt-fur-schritt-anleitung/>. – Aktualisierungsdatum: verfügbar am 2022-11-19 um 22:03 Uhr
- [24] LINKE, Markus ; NAST, Eckart: *Festigkeitslehre für den Leichtbau : Ein Lehrbuch zur Technischen Mechanik.* Berlin, Heidelberg : Springer Vieweg, 2015 (Lehrbuch)
- [25] RENNERT, Roland ; WÄCHTER, Michael ; ESDERTS, Alfons: *Potenziale für die zukünftige Weiterentwicklung der FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis“.* Deutscher Verband für Materialforschung und –prüfung e.V (2022)
- [26] FIEDLER, Melanie ; RENNERT, Roland: *Die FKM-Richtlinien "Rechnerischer Festigkeitsnachweis" und "Richtlinie Nichtlinear" - Zusammenhänge, Unterschiede und Anwendung.* – Berlin. Juni 2022
- [27] DIN EN ISO 898-1. Mai 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 (ISO\_898-1:2013); Deutsche Fassung EN\_ISO\_898-1:2013*
- [28] GROTE, Karl-Heinrich (Hrsg.); BENDER, Beate (Hrsg.); GÖHLICH, Dietmar (Hrsg.): *Taschenbuch für den Maschinenbau.* 25., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer Vieweg, 2018
- [29] DIN EN 1993-1-1. Dezember 2010. *DIN EN 1993-1-1:2010-12, Eurocode\_3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten\_ - Teil\_1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN\_1993-1-1:2005\_+ AC:2009*



# Anlagen

<b>Abbildungen.....</b>	<b>II</b>
<b>Tabellen .....</b>	<b>III</b>
<b>Verwendete technische Ressourcen.....</b>	<b>IV</b>
<b>Weiterführende Einstellungen im ANSYS.....</b>	<b>V</b>
<b>Fallbeispiel .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Selbstständigkeitserklärung.....</b>	<b>XXIII</b>

# Abbildungen

Abbildung A1: Bild für die Netzerkennung ..... VII

Abbildung A2: Grundvernetzung..... VII

Abbildung A3: Grafische Darstellung der Schraubenverbindung des Fallbeispiels, eigene Darstellung G. Reisinger 2023..... VIII

## Tabellen

Tabelle A1: Programmparameter in der Spannungsanalyse, eigene Darstellung G. Reisinger 2023.....	V
Tabelle A2: Kontaktformulierung, eigene Darstellung G. Reisinger 2023.....	VI
Tabelle A3: Programmparameter in der Analyse zur plastischen Formzahl, eigene Darstellung G. Reisinger 2023.....	VI
Tabelle A4: Gegebene Größen des Zugstabes, eigene Darstellung G. Reisinger 2023.....	IX
Tabelle A5: Gegebene Größen der Schraube, eigene Darstellung G. Reisinger 2023.....	IX
Tabelle A6: Gegebene Beiwerte und Teilsicherheitsfaktoren für Zugstab und Schraube, eigene Darstellung G. Reisinger 2023 .....	IX
Tabelle A7: Schritt für Schritt Nachweisführung mit der FKM-Richtlinie (Zugstange), eigene Darstellung G. Reisinger 2023.....	X
Tabelle A8: Schritt für Schritt Nachweisführung mit der FKM-Richtlinie (Schraube), eigene Darstellung G. Reisinger 2023.....	XIV
Tabelle A9: Schritt für Schritt Nachweisführung mit der EN 1993-1-8, eigene Darstellung G. Reisinger 2023.....	XVIII

## **Verwendete technische Ressourcen**

Für die CAD-Modelle welche zum Teil auch in das FEM-Programm übertragen wurde, wurde SIEMENS Solid Edge Student bzw. Academic Edition 2022 verwendet.

Für die FEA, die generierten Berichte auf dem Datenträger und den daraus generierten Abbildungen stand das Programm ANSYS Enterprise 2022 R2 in Verwendung.

Für die Flussdiagramme, Diagramme, Tabellen und Fließtext und Grafiken wurde das Microsoft 365 Single Paket verwendet.

Als Literaturverwaltungsprogramm stand Citavi 6 mit der Campus Lizenz zur Verfügung.

## Weiterführende Einstellungen im ANSYS

In der folgenden Tabelle sind wichtigsten Analyseinstellungen welche im ANSYS durchgeführt wurden gelistet.

**Tabelle A1: Programmparameter in der Spannungsanalyse, eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

Objektname	Analyseinstellungen
<b>Schrittsteuerung</b>	
Anzahl Lastschritte	5
Aktuelle Schrittnummer	1
Zeit nach Schritt	1, s
Automatische Zeitschrittsteuerung	Ein
Definiert durch	Substeps
Anfängliche Substeps	10
Min. Substeps	1
Max. Substeps	10
Große Verformung	Ein
<b>Nichtlineare Steuerungen</b>	
Newton-Raphson Option	Unsymmetrisch

In der vorangegangenen Weganalyse zur Ermittlung der Kraftreaktion wurden ähnliche Einstellungen getroffen.

Für die Kontaktbedingungen, wurden die folgenden Einstellungen manuell getroffen.

**Tabelle A2: Kontaktformulierung, eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

<b>Objektname</b>	<b>Reibungsbehaftet - Bauteil1 bis Schraube</b>
<b>Zustand</b>	Vollständig definiert
<b>Zuweisung</b>	
<b>Zuweisungsmethode</b>	Geometrieauswahl
<b>Kontakt</b>	1 Kante
<b>Ziel</b>	1 Kante
<b>Kontaktkörper</b>	Bauteil1
<b>Zielkörper</b>	Schraube
<b>Typ</b>	Reibungsbehaftet
<b>Reibkoeffizient</b>	0,2
<b>Kontaktfindung</b>	Automatisch
<b>Verhalten</b>	Symmetrisch
<b>Erweitert</b>	
<b>Algorithmus</b>	Augmented-Lagrange-Verfahren
<b>Kontaktsteifigkeit</b>	Faktor
<b>Kontaktsteifigkeitsfaktor</b>	0,5
<b>Pinball-Bereich</b>	Radius
<b>Pinball-Radius</b>	5,e-002 mm
<b>Geometriemodifikation</b>	
<b>Kontaktbehandlung</b>	Auf Berührung anpassen

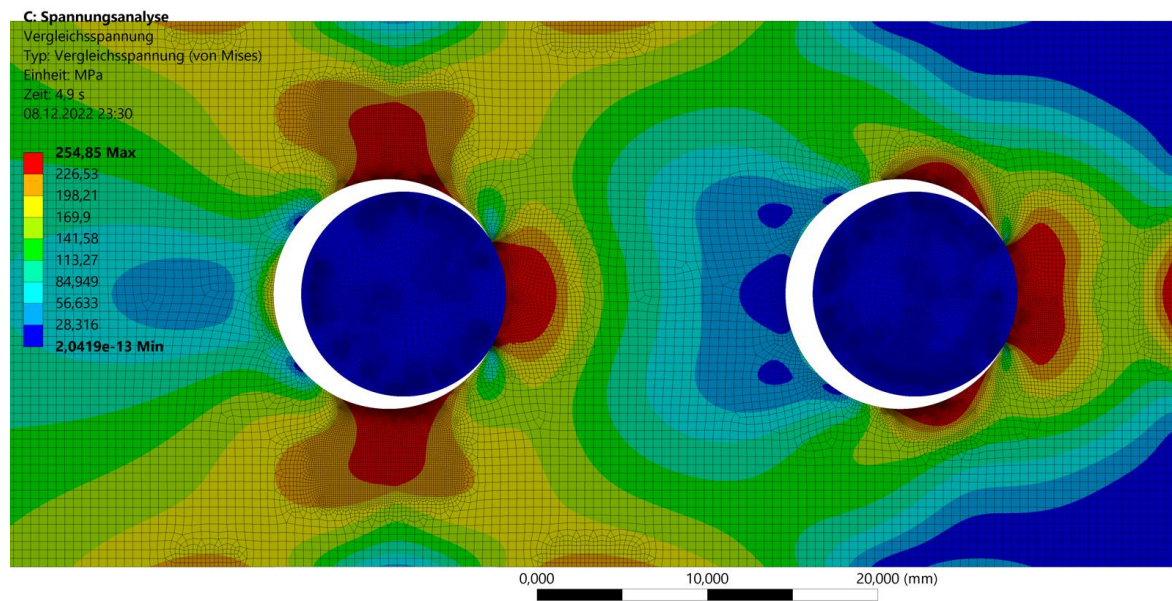
Die nachfolgende Tabelle zeigt die Programmeinstellungen für die plastische Formzahl

**Tabelle A3: Programmparameter in der Analyse zur plastischen Formzahl, eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

<b>Objektname</b>	<b>Analyseeinstellungen</b>
<b>Schrittsteuerung</b>	
<b>Anzahl Lastschritte</b>	8
<b>Aktuelle Schrittnummer</b>	1
<b>Zeit nach Schritt</b>	2, s
<b>Große Verformung</b>	Ein

Die vollständigen Berichte der Analysen befinden sich am Datenträger in der gebundenen Ausgabe als PDF Datei, sowie sämtliche Ergebnisse der einzelnen Analysen. In den gezeigten Tabellen wurden nur die geänderten Parameter gelistet. Die Programmgesteuerten Parameter und Randbedingungen wurden außen vor gelassen um den Rahmen der Informationen aus Platzgründen nicht zu überziehen, zumal das Hauptaugenmerk der vorliegenden Arbeit der Richtlinienvergleich ist.

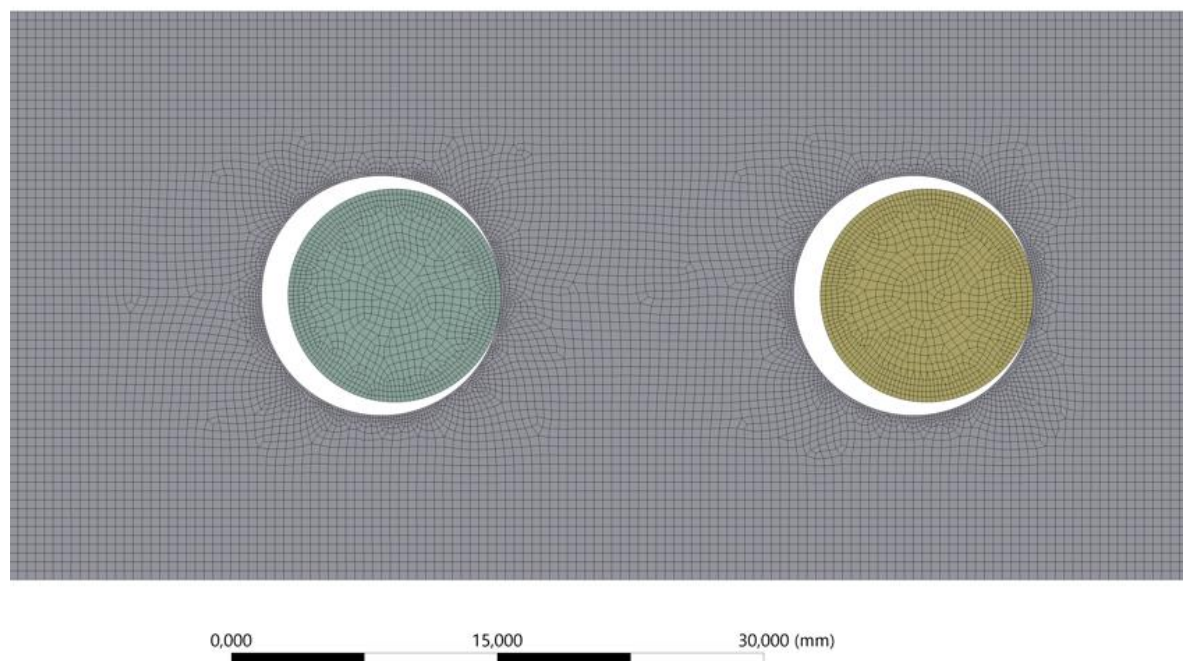
Nachfolgend wird ein Bild der Bauteilvernetzung gezeigt:



**Abbildung A1: Bild für die Netzerkennung**

Die feine Netzstruktur erfolgte durch das Programm beim Anwenden des Konvergenztools.

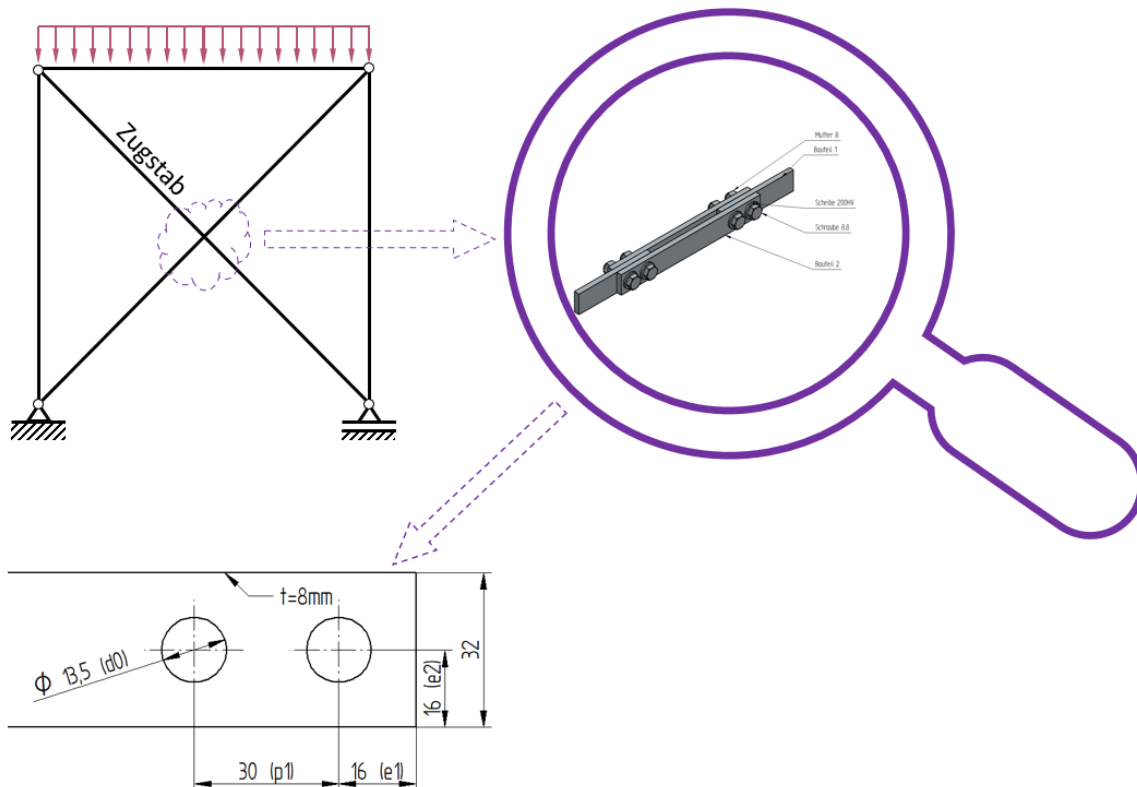
Die Grundvernetzung zeigt das nächste Bild:



**Abbildung A2: Grundvernetzung**

## Fallbeispiel

Die Schraubenverbindung mittig im Zugverband soll als zweischnittige Scher-Lochleibungsverbindung ausgelegt sein. Eine Bewertung mit der FKM-Richtlinie und der EN 1993-1-8 (Entwurfsversion) soll durchgeführt werden.



**Abbildung A3: Grafische Darstellung der Schraubenverbindung des Fallbeispiels, eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

Prämisse: Belastungskennwerte des Zugstabes sind aus vorangegangene statische Berechnungen bekannt. Kennwerte der Schraube und des Materials sind ebenfalls bekannt.

In der nachfolgenden Tabellen A4 bis A6 sind die gegebenen Werte, sowie alle gegebene Tabellenwerte aus den entsprechenden Normen und Richtlinien eingetragen. Folgende Normen und Richtlinien wurden zur Berechnung (Tabelle A7 bis A9) und zur Ermittlung der notwendigen Tabellenwerte herangezogen: [5], [6], [8], [9], [18] und [27].



Tabelle A4: Gegebene Größen des Zugstabes, eigene Darstellung G. Reisinger 2023

Allgemein bekannte Größen und bekannte Größen nach statischer Berechnung						
Zugbelastung von 29600 N						
Konstruktionsmaße (vgl. Abbildung A3)						
Werkstoff S235JR						
E-Modul			210000 MPa			
Querkontraktionszahl			0,27			
für EN 1993-1-8 notwendige Größen			für FKM notwendige Größen			
$F_{v,Ed}; N_{Ed}$	29600 N		$\sigma_1$	268,54 MPa	$d_{eff,N,A}$	40 mm
$f_u$	360 MPa		$\sigma_2$	100,22 MPa	$f_{pl}$	31882 N
$f_y$	235 MPa		$\sigma_3$	-47,97 MPa	$f_{el}$	16282 N
$A$	256 mm <sup>2</sup>		$R_{m,N}$	360 MPa	$\epsilon_0$	0,05
$A_{net}$	148 mm <sup>2</sup>		$R_{p,N}$	235 MPa	$a_{d,m}$	0,05
$A_{gv}$	368 mm <sup>2</sup>		$A_N$	24%	$a_{d,p}$	0,26
$A_{nt}$	74 mm <sup>2</sup>		$d_{eff,N,m}$	3 mm	$a_{d,A}$	0,18
$A_{nv}$	206 mm <sup>2</sup>		$d_{eff,N,p}$	16 mm		

Tabelle A5: Gegebene Größen der Schraube, eigene Darstellung G. Reisinger 2023

Allgemein bekannte Größen und bekannte Größen nach statischer Berechnung					
M12 FKL 8.8					
Anzahl n der Schrauben			2		
Spannungsquerschnitt $A_s$			84,3 mm <sup>2</sup>		
Schraubennennendurchmesser			12 mm		
für EN 1993-1-8 notwendige Größen			für FKM notwendige Größen		
$F_{v,Ed}$	29600 N		$S_b$	90,4 MPa	
$F_{t,Ed}$	19089,5 N		$S_{zd}$	226,45 MPa	
$f_{ub}$	800 MPa		$T_s$	137,9 MPa	
$f_{yb}$	640 MPa		$T_t$	170,2 MPa	
$d$	12 mm		$R_m$	800 MPa	
$d_0$	13,5 mm		$R_p$	640 MPa	
			$A$	12%	

Tabelle A6: Gegebene Beiwerte und Teilsicherheitsfaktoren für Zugstab und Schraube, eigene Darstellung G. Reisinger 2023

für EN 1993-1-8 notwendige Beiwerte bzw. Teilsicherheitsfaktoren		für FKM notwendige Beiwerte bzw. Teilsicherheitsfaktoren			
$\gamma_{M0}$	1	$j_s$	1	$j_m$	1,8
$\gamma_{M2}$	1,25	$j_p$	1,35	$K_{T,m}$	1
$\alpha_v$	0,6	$K_{T,p}$	1	$f_t$	0,577
$k_m$	1	$K_A$	1		
		$f_\sigma$	1		

**Tabelle A7: Schritt für Schritt Nachweisführung mit der FKM-Richtlinie (Zugstange), eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

<b>FKM-Richtlinie (Zugstange)</b>
<b>Schritt 1: Spannungskennwerte</b>
Werte bereits durch FEA bzw. analytische Rechnung ermittelt
<b>1a) von Mises Vergleichsspannung:</b>
$\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$
$\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{2}[(268,54 - 100,22)^2 + (100,22 + 47,97)^2 + (-47,97 - 268,54)^2]}$
$\sigma_V = 274,29 \text{ MPa}$
<b>1b) hydrostatische Spannung:</b>
$\sigma_H = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$
$\sigma_H = \frac{1}{3}(268,54 \text{ MPa} + 100,22 \text{ MPa} - 47,97 \text{ MPa})$
$\sigma_H = 106,93 \text{ MPa}$
<b>1c) Mehrachsigenheitsgrad:</b>
$h = \frac{\sigma_H}{\sigma_V}$
$h = \frac{106,93 \text{ MPa}}{274,29 \text{ MPa}}$
$h = 0,39$
<b>Schritt 2: Werkstoffkennwerte</b>
<b>2a) effektiver Durchmesser:</b>
$S235JR \rightarrow \text{Fall 2} \rightarrow s = d_{eff} = 8 \text{ mm} \rightarrow \text{Kriterium } d_{eff} > d_{eff,N,m}$
daher folgt für
<b>2b) Technologischer Größenfaktor:</b>

$$K_{d,m} = \frac{1 - 0,7686 \cdot a_{d,m} \cdot \lg\left(\frac{d_{eff}}{7,5 \text{ mm}}\right)}{1 - 0,7686 \cdot a_{d,m} \cdot \lg\left(\frac{d_{eff,N,m}}{7,5 \text{ mm}}\right)}$$

$$K_{d,m} = \frac{1 - 0,7686 \cdot 0,05 \cdot \lg\left(\frac{8 \text{ mm}}{7,5 \text{ mm}}\right)}{1 - 0,7686 \cdot 0,05 \cdot \lg\left(\frac{3 \text{ mm}}{7,5 \text{ mm}}\right)}$$

$$K_{d,m} = 0,984$$

für Streckgrenze und Bruchdehnung ist  $K_d = 1$ , da  $d_{eff} \leq d_{eff,N,m}$

### 2c) Zugfestigkeit auf die Zugstange normiert:

$$R_m = K_{d,m} \cdot K_A \cdot R_{m,N}$$

$$R_m = 0,984 \cdot 1 \cdot 360 \text{ MPa}$$

$$R_m = 354,24 \text{ MPa}$$

### 2d) Streckgrenze auf die Zugstange normiert:

$$R_p = K_{d,p} \cdot K_A \cdot R_{p,N}$$

$$R_p = 1 \cdot 1 \cdot 235 \text{ MPa}$$

$$R_p = 235 \text{ MPa}$$

### 2e) Bruchdehnung auf die Zugstange normiert:

$$A = K_{d,A} \cdot A_N$$

$$A = 1 \cdot 0,24$$

$$A = 0,24 \rightarrow 24\%$$

## Schritt 3: Konstruktionskennwerte

### 3a) Plastische Formzahl:

$$K_p = \frac{f_{pl}}{f_{el}}$$

$$K_p = \frac{31882 \text{ N}}{16282 \text{ N}}$$

$$K_p = 1,958$$

### 3b) ertragbare Dehnung:

$$\varepsilon_{ref} = A + \frac{R_p}{E}$$

$$\varepsilon_{ref} = 0,24 + \frac{235 \text{ MPa}}{210000 \text{ MPa}}$$

$$\varepsilon_{ref} = 0,2411$$

$$\varepsilon_{ertr} = \begin{cases} \varepsilon_{ref}, & h \leq \frac{1}{3} \\ \varepsilon_0 + 0,3 \cdot \left( \frac{\varepsilon_{ref} - \varepsilon_0}{0,3} \right)^{3 \cdot h}, & h > \frac{1}{3} \end{cases}$$

$$\varepsilon_{ertr} = 0,05 + 0,3 \cdot \left( \frac{0,2411 - 0,05}{0,3} \right)^{3 \cdot 0,39}$$

$$\varepsilon_{ertr} = 0,227 \rightarrow 22,7\%$$

### 3c) Verfestigungsfaktor:

$$f_R = 0,5 \cdot \left( 1 + \frac{R_m}{R_p} \right)$$

$$f_R = 0,5 \cdot \left( 1 + \frac{354,24 \text{ MPa}}{235 \text{ MPa}} \right)$$

$$f_R = 1,254$$

### 3d) Plastische Stützzahl:

$$n_{pl} = \text{MIN} \left( \sqrt{E \cdot \frac{\varepsilon_{ertr}}{R_p}}; f_R \cdot K_p \right)$$

$$n_{pl} = \text{MIN} \left( \sqrt{210000 \text{ MPa} \cdot \frac{0,227}{235 \text{ MPa}}}; 1,254 \cdot 1,958 \right)$$

$$n_{pl} = \text{MIN}(14,24; 2,46)$$

$$n_{pl} = 2,46$$

**Schritt 4: Bauteilfestigkeit****Bemessungswert  $\sigma_{SK}$ :**

$$\sigma_{SK} = R_p \cdot n_{pl}$$

$$\sigma_{SK} = 235 \text{ MPa} \cdot 2,46$$

$$\sigma_{SK} = 578,1 \text{ MPa}$$

**Schritt 5: Sicherheitsfaktor****Gesamtsicherheitsfaktor:**

$$j_{ges} = j_s \cdot \left[ j_G \cdot \text{MAX} \left( \frac{j_m}{K_{T,m}} \cdot \frac{R_p}{R_m}; \frac{j_p}{K_{T,p}}; \frac{j_{mt}}{K_{Tt,m}} \cdot \frac{R_p}{R_m}; \frac{j_{pt}}{K_{Tt,p}} \right) + \Delta j \right]$$

$$j_{ges} = j_s \cdot \frac{j_p}{K_{T,p}}$$

$$j_{ges} = 1 \cdot \frac{1,35}{1}$$

$$j_{ges} = 1,35$$

Faktoren in **dieser Farbe** sind für das Fallbeispiel irrelevant.

**Schritt 6: Nachweis der Zugstange****Kriterium und Auslastung bezgl. Normalkraftbeanspruchung der Zugstange:**

$$a_{SK} \leq 1$$

$$a_{SK} = \frac{\sigma_V \cdot j_{ges}}{\sigma_{SK}}$$

$$a_{SK} = \frac{274,29 \text{ MPa} \cdot 1,35}{578,1 \text{ MPa}}$$

$$a_{SK} = 0,641 \rightarrow \text{erfüllt}$$

$$\text{in Prozent} \rightarrow a_{SK} \cdot 100 \% = 0,641 \cdot 100 \% = 64,1 \%$$

**Tabelle A8: Schritt für Schritt Nachweisführung mit der FKM-Richtlinie (Schraube), eigene Darstellung G. Reisinger 2023**

<b>FKM-Richtlinie (Schraube)</b>
<b>Schritt 1: Spannungskennwerte</b>
Werte bereits durch analytische Berechnung ermittelt
<b>Schritt 2: Werkstoffkennwerte</b>
Ermittelbar aus den Schraubendaten entsprechender Normen
<b>Schritt 3: Konstruktionskennwerte</b>
<p><b>3a) Verfestigungsfaktor</b></p> $f_R = 0,5 \cdot \left( 1 + \frac{R_m}{R_p} \right)$ $f_R = 0,5 \cdot \left( 1 + \frac{800 \text{ MPa}}{640 \text{ MPa}} \right)$ $f_R = 1,125$ <p><b>3b) Plastische Stützzahl</b></p> $f_R = n_{pl} = 1,125$
<b>Schritt 4: Bauteilfestigkeit</b>
<p><b>4a) Bauteilfestigkeit für Normalspannungen:</b></p> $S_{SK,zd,b} = f_\sigma \cdot R_p \cdot n_{pl}$ $S_{SK,zd,b} = 1 \cdot 640 \text{ MPa} \cdot 1,125$ $S_{SK,zd,b} = 720 \text{ MPa}$ <p><b>4a) Bauteilfestigkeit für Schubspannungen:</b></p>

$$T_{SK,S,t} = f_t \cdot R_p \cdot n_{pl}$$

$$T_{SK,S,t} = 0,577 \cdot 640 \text{ MPa} \cdot 1,125$$

$$T_{SK,S,t} = 415,44 \text{ MPa}$$

### Schritt 5: Sicherheitsfaktor

#### Gesamtsicherheitsfaktor:

$$j_{ges} = j_s \cdot j_G \cdot \text{MAX} \left( \frac{j_m}{K_{T,m}} \cdot \frac{R_p}{R_m}; \frac{j_p}{K_{T,p}}; \frac{j_{mt}}{K_{Tt,m}} \cdot \frac{R_p}{R_m}; \frac{j_{pt}}{K_{Tt,p}} \right)$$

$$j_{ges} = j_s \cdot \frac{j_m}{K_{T,m}} \cdot \frac{R_p}{R_m}$$

$$j_{ges} = 1 \cdot \frac{1,8}{1} \cdot \frac{640 \text{ MPa}}{800 \text{ MPa}}$$

$$j_{ges} = 1,44$$

Faktoren in **dieser Farbe** sind für das Fallbeispiel irrelevant

### Schritt 6: Nachweis der Schraube

**6a) Kriterium und Auslastung bezgl. Normalkraftbeanspruchung der Schraube:**

$$a_{SK,zd} \leq 1$$

$$a_{SK,zd} = \frac{|S_{zd}| \cdot j_{ges}}{S_{SK,zd,b}} = \frac{226,45 \text{ MPa} \cdot 1,44}{720 \text{ MPa}} \leq 1$$

$$a_{SK,zd} = 0,45 \leq 1 \rightarrow \text{erfüllt}$$

$$\text{in Prozent} \rightarrow a_{SK,zd} \cdot 100 \% = 0,45 \cdot 100 \% = 45 \%$$

**6b) Kriterium und Auslastung bezgl. Biegebeanspruchung der Schraube:**

$$a_{SK,b} \leq 1$$

$$a_{SK,b} = \frac{|S_b| \cdot j_{ges}}{S_{SK,zd,b}} = \frac{90,4 \text{ MPa} \cdot 1,44}{720 \text{ MPa}} \leq 1$$

$$a_{SK,b} = 0,18 \leq 1 \rightarrow \text{erfüllt}$$

$$\text{in Prozent} \rightarrow a_{SK,b} \cdot 100 \% = 0,18 \cdot 100 \% = 18 \%$$

**6c) Kriterium und Auslastung bezgl. Schubbeanspruchung der Schraube:**

$$a_{SK,s} \leq 1$$

$$a_{SK,s} = \frac{|T_s| \cdot j_{ges}}{T_{SK,s,t}} = \frac{137,9 \text{ MPa} \cdot 1,44}{415,44 \text{ MPa}} \leq 1$$

$$a_{SK,s} = 0,48 \leq 1 \rightarrow \text{erfüllt}$$

$$\text{in Prozent} \rightarrow a_{SK,s} \cdot 100 \% = 0,48 \cdot 100 \% = 48 \%$$

**6d) Kriterium und Auslastung bezgl. Torsionsbeanspruchung der Schraube:**

$$a_{SK,t} \leq 1$$

$$a_{SK,t} = \frac{|T_t| \cdot j_{ges}}{T_{SK,s,t}} = \frac{170,2 \text{ MPa} \cdot 1,44}{415,44 \text{ MPa}} \leq 1$$

$$a_{SK,t} = 0,59 \leq 1 \rightarrow \text{erfüllt}$$

$$\text{in Prozent} \rightarrow a_{SK,t} \cdot 100 \% = 0,59 \cdot 100 \% = 59 \%$$

**6e) Kriterium und Vergleichsauslastung der Schraube:**



**Anteil der Gestaltänderungshypothese:**

$$s = a_{SK,zd} + a_{SK,b} = 0,45 + 0,18 = 0,63$$

$$t = a_{SK,s} + a_{SK,t} = 0,48 + 0,59 = 1,07$$

$$a_{GH} = \sqrt{s^2 + t^2} = \sqrt{0,63^2 + 1,07^2} = 1,24$$

**Anteil der Normalspannungshypothese:**

$$a_{NH} = \frac{1}{2} \cdot (|s| + \sqrt{s^2 + 4 \cdot t^2}) = \frac{1}{2} \cdot (0,63 + \sqrt{0,63^2 + 4 \cdot 1,07^2}) = 1,43$$

**Schubspannungsparameter:**

$$q = \text{MAX} \left( \frac{\sqrt{3} - \left(\frac{1}{f_t}\right)}{\sqrt{3} - 1}; 0 \right) = \text{MAX} \left( \frac{\sqrt{3} - \left(\frac{1}{0,577}\right)}{\sqrt{3} - 1}; 0 \right) = \text{MAX}(-0,0014; 0) \rightarrow 0$$

$$a_{SK,sv} \leq 1$$

$$a_{SK,sv} = q \cdot a_{NH} + (1 - q) \cdot a_{GH} = 0 \cdot 1,43 + (1 - 0) \cdot 1,24 \leq 1$$

$$a_{SK,sv} = 1,24 \leq 1 \rightarrow \text{nicht erfüllt}$$

$$\text{in Prozent} \rightarrow a_{SK,sv} \cdot 100 \% = 1,24 \cdot 100 \% = 124 \%$$

Es wurden nicht alle Einzelnachweise erfüllt, somit ist die Tragfähigkeit der Verbindung nicht gegeben. Es müssen Optimierungen vorgenommen werden.

Tabelle A9: Schritt für Schritt Nachweisführung mit der EN 1993-1-8, eigene Darstellung G. Reisinger 2023

## EN 1993-1-8 (für alle Komponenten)

### Schritt 1: Abscheren je Scherfuge

Bemessungswert  $F_{v,Rd}$ :

$$\beta_p = \frac{9 \cdot d}{8 \cdot d + 3 \cdot t_{pp}} \leq 1$$

$$\beta_p = \frac{9 \cdot 12 \text{ mm}}{8 \cdot 12 \text{ mm} + 3 \cdot 8 \text{ mm}} \leq 1$$

$$\beta_p = 0,9$$

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_S}{\gamma_{M2}} \cdot (\beta_p)$$

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \cdot 800 \text{ MPa} \cdot 84,3 \text{ mm}^2}{1,25} \cdot 0,9$$

$$F_{v,Rd} = 29134,1 \text{ N}$$

### Schritt 2: Lochleibung

2a) Bemessungswert  $F_{b,Rd}$  für Randschrauben

$$\alpha_b = \text{MIN} \left( \frac{e_1}{d_0}; 3 \cdot \frac{f_{ub}}{f_u}; 3 \right)$$

$$\alpha_b = \text{MIN} \left( \frac{16 \text{ mm}}{13,5 \text{ mm}}; 3 \cdot \frac{800 \text{ MPa}}{360 \text{ MPa}}; 3 \right) = \text{MIN}(1,185; 6,667; 3) \rightarrow \alpha_b = 1,185$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_m \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = \frac{1 \cdot 1,185 \cdot 360 \cdot 12 \cdot 8}{1,25}$$

$$F_{b,Rd} = 32762,9 \text{ N}$$

**2b) Bemessungswert  $F_{b,Rd}$  für innenliegende Schrauben:**

$$\alpha_b = \text{MIN} \left( \frac{p_1}{d_0} - \frac{1}{2}; 3 \cdot \frac{f_{ub}}{f_u}; 3 \right)$$

$$\alpha_b = \text{MIN} \left( \frac{30 \text{ mm}}{13,5 \text{ mm}} - \frac{1}{2}; 3 \cdot \frac{800 \text{ MPa}}{360 \text{ MPa}}; 3 \right) = \text{MIN}(1,722; 6,667; 3) \rightarrow \alpha_b = 1,722$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_m \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = \frac{1 \cdot 1,722 \cdot 360 \cdot 12 \cdot 8}{1,25}$$

$$F_{b,Rd} = 47609,9 \text{ N}$$

**2c) Begrenzungskriterium für  $F_{b,Rd}$ :**

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

$$V_{eff,1,Rd} = \frac{\left[ 74 \text{ mm}^2 \cdot 360 \text{ MPa} + \min \left( \frac{368 \text{ mm}^2 \cdot 235 \text{ MPa}}{\sqrt{3}}; \frac{206 \text{ mm}^2 \cdot 360 \text{ MPa}}{\sqrt{3}} \right) \right]}{1,25}$$

$$V_{eff,1,Rd} = \frac{[26640 \text{ N} + \min(49929,3 \text{ N}; 42816,3 \text{ N})]}{1,25}$$

$$V_{eff,1,Rd} = \frac{26640 \text{ N} + 42816,3 \text{ N}}{1,25} = \frac{69456,3 \text{ N}}{1,25}$$

$$V_{eff,1,Rd} = 55565 \text{ N}$$

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

$$N_{u,Rd} = \min \left( \frac{0,75 \cdot 148 \text{ mm}^2 \cdot 360 \text{ MPa}}{1,25}; 55565 \text{ N} \right)$$

$$N_{u,Rd} = \min(31968 \text{ N}; 55565 \text{ N})$$

$$N_{u,Rd} = 31968 \text{ N}$$

Der Wert  $N_{u,Rd}$  des Begrenzungskriteriums liegt unterhalb der jeweiligen Bemessungswerte  $F_{b,Rd}$ . Daraus folgt  $F_{b,Rd}$  für die vorliegende Verbindung zu:

$$F_{b,Rd} = 31968 \text{ N}$$

### Schritt 3: Zugbeanspruchung der Schraube

**Bemessungswert  $F_{t,Rd}$ :**

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_{ub} \cdot A_S}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \cdot 800 \text{ MPa} \cdot 84,3 \text{ mm}^2}{1,25}$$

$$F_{t,Rd} = 48556,8 \text{ N}$$

### Schritt 4: Normalkraftbeanspruchung der Zugstange mit Verweis auf EN 1993-1-1

**Bemessungswert  $N_{t,Rd}$ :**

$$N_{t,Rd} = \text{MIN} \left( \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}; \frac{0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \right)$$

$$N_{t,Rd} = \text{MIN} \left( \frac{256 \text{ mm}^2 \cdot 235 \text{ MPa}}{1,0}; \frac{0,9 \cdot 148 \text{ mm}^2 \cdot 360 \text{ MPa}}{1,25} \right)$$

$$N_{t,Rd} = \text{MIN}(60160 \text{ N}; 38361,6 \text{ N})$$

$$N_{t,Rd} = 38361,6 \text{ N}$$

### Schritt 5: Tragfähigkeit der Verbindungsmittelgruppe wieder nach EN 1993-1-8

**5a) Prüfung des Kriteriums (mit kleinstem Wert in dem Fall ausreichend):**

$$F_{v,Rd} \geq F_{b,Rd}$$

$29134,1 \text{ N} \geq 31986 \text{ N} \rightarrow$  nicht erfüllt  $\rightarrow$  Wähle Formel für diesen Fall

**5b) Bemessungswert  $\Sigma F_{Rd}$ :**

$$\sum F_{Rd} = n \cdot F_{v,Rd,min}$$

$$\sum F_{Rd} = 2 \cdot 29134,1 \text{ N}$$

$$\sum F_{Rd} = 58268,2 \text{ N}$$

### Schritt 6: Nachweis der Verbindung

#### 6a) Kriterium und Auslastung bezgl. Abscherung der Schraube:

$$\frac{F_{v,Ed}}{2} \leq \sum F_{Rd} \rightarrow 14800 \text{ N} \leq 58268,2 \text{ N} \rightarrow \text{erfüllt}$$

$$\text{in Prozent} \rightarrow \frac{F_{v,Ed}}{2 \cdot \sum F_{Rd}} \cdot 100 \% = \frac{29600 \text{ N}}{2 \cdot 58268,2 \text{ N}} \cdot 100 \% = 25,4 \%$$

#### 6b) Kriterium und Auslastung bezgl. Lochleibung:

$$F_{v,Ed} \leq \sum F_{Rd} \rightarrow 29600 \text{ N} \leq 58268,2 \text{ N} \rightarrow \text{erfüllt}$$

$$\text{in Prozent} \rightarrow \frac{F_{v,Ed}}{\sum F_{Rd}} \cdot 100 \% = \frac{29600 \text{ N}}{58268,2 \text{ N}} \cdot 100 \% = 50,8 \%$$

#### 6c) Kriterium und Auslastung bezgl. Zugbeanspruchung der Schraube:

$$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd} \rightarrow 19089,5 \text{ N} \leq 48556,8 \text{ N} \rightarrow \text{erfüllt}$$

$$\text{in Prozent} \rightarrow \frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} \cdot 100 \% = \frac{19089,5 \text{ N}}{48556,8 \text{ N}} \cdot 100 \% = 39,3 \%$$

#### 6d) Kriterium und Auslastung bezgl. Gesamtbeanspruchung der Schraube:

$$\frac{F_{v,Ed}}{2 \cdot \sum F_{Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1 \rightarrow \frac{29600 \text{ N}}{2 \cdot 58268,2 \text{ N}} + \frac{19089,5 \text{ N}}{1,4 \cdot 48556,8 \text{ N}} \leq 1$$

$$\rightarrow 0,535 \leq 1 \rightarrow \text{erfüllt}$$

$$\text{in Prozent} \rightarrow 0,535 \cdot 100 \% = 53,5 \%$$

#### 6e) Kriterium und Auslastung bezgl. Normalkraftbeanspruchung der Zugstange:

$$N_{Ed} \leq N_{t,Rd} \rightarrow 29600 \text{ N} \leq 38361,6 \text{ N} \rightarrow \text{erfüllt}$$

$$\text{in Prozent} \rightarrow \frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \cdot 100 \% = \frac{29600 \text{ N}}{38361,6 \text{ N}} \cdot 100 \% = 77,2 \%$$

Alle Einzelnachweise sind erfüllt, somit ist die Tragfähigkeit der Verbindung gegeben.

Zusammenfassung für das Fallbeispiel:

- Der Nachweis nach der EN 1993-1-8 wurde vollständig erbracht, das bedeutet die Verbindung kann gemäß EC3 verwendet werden.
- Der Nachweis nach der FKM-Richtlinie wurde NICHT vollständig erbracht.
  - Die Zugstange erfüllt den Nachweis und kann gemäß FKM-Richtlinie verwendet werden.
  - Die Schraube erfüllt den Nachweis nicht und kann daher gemäß FKM-Richtlinie nicht angewandt werden. Es müssen geeignete Optimierungen durchgeführt werden. Wie in der vorliegenden Arbeit zum Beispiel die Erhöhung der FKL.

Es ist zu empfehlen die entsprechenden Richtlinien und Normen, welche in der in der Arbeit genannt wurden, in den hier angeführten Auflagen und Versionen vorliegen zu haben.

## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Neukirchen am Walde, den 10.Jänner.2023

Gerold Reisinger