



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Weiterentwicklung eines Wischerarmes für Schienenfahrzeuge

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs (Dipl. Ing.)

unter der Leitung von

A.o. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred Grafinger

(E307 Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung,
Forschungsbereich Maschinenbauinformatik und virtuelle Produktentwicklung)

Dipl.-Ing. Mathias Pleyer (Knorr-Bremse GmbH)

Dipl.-Ing. (FH) Christian Hasenöhl (Knorr-Bremse GmbH)

eingereicht an der TU Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Sebastian Fick, BSc



Wien, im August 2022

Sebastian Fick



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre hiermit Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im August 2022

Sebastian Fick

Kurzfassung

Gegenstand dieser Arbeit ist es, einen Wischerarm für Schienenfahrzeuge weiterzuentwickeln. Das Ziel der Weiterentwicklung ist es, die Montagekomplexität zu verringern und einen möglichst breit einsetzbaren Wischerarm zu erhalten, ohne dabei die Lebensdauer einzuschränken.

Auf Basis von aktuell eingesetzten Wischerarmen der Knorr-Bremse GmbH wurde ein neues Konzept erarbeitet, ein Modell konstruiert, berechnet und schließlich getestet. Die Arbeit umfasst die Entwicklungsarbeit vom Pflichtenheft bis hin zu Prototypentests. Die neue Konstruktion wurde mittels analytischen (FKM-Nachweis) und numerischen Berechnungen (FE-Analysen) auf ihre Festigkeit hin überprüft. Zudem wurden die Ergebnisse in Prototypentests verifiziert. In einem Prototypentest wurde klar, dass das Konzept eines Bauteils optimiert werden musste. Mit jenem optimierten Bauteil wurde anschließend ein Prototypentest erfolgreich durchgeführt. Aus zeittechnischen Gründen konnten jedoch nicht alle erforderlichen Schritte bis hin zu einem fertigen Produkt durchgeführt werden. Abschließend wurde eine Kostenanalyse durchgeführt, um zu überprüfen, ob der vorgegebene Kostenrahmen eingehalten wurde.

Durch den Einsatz von anderen Fertigungs- und Verbindungstechnologien, insbesondere durch den Verzicht auf Schweißverbindungen, konnte die Montagekomplexität deutlich gesenkt werden und infolgedessen auch die Kosten reduziert werden. Der neu entwickelte Wischerarm ist zudem modular für verschiedene Schienenfahrzeuge einsetzbar und befindet sich im vorgegebenen Kostenrahmen. Im Anschluss an diese Arbeit muss der Wischerarm noch einen Test unter realen Bedingungen, etwa auf einem Scheibenprüfstand, absolvieren.

Abstract

The purpose of this work is to further develop a wiper arm for rail vehicles. The aim of the development is to reduce the assembly complexity and to obtain a wiper arm that can be used as widely as possible without limiting the service life.

Based on currently used wiper arms from Knorr-Bremse GmbH, a new concept was developed, a model constructed, calculated, and finally tested. The work includes development work from specifications to prototype testing. The new design was tested for strength using analytical (FKM verification) and numerical calculations (FE analyses). In addition, the results were verified in prototype tests. In a prototype test, it became clear that the concept of a component had to be optimized. A prototype test was then successfully carried out with that optimized component. However, due to time constraints, not all the necessary steps up to a finished product could be carried out. Finally, a cost analysis was carried out to check whether the specified cost framework was met.

By using other manufacturing and joining technologies, by eliminating welded joints, the assembly complexity was significantly reduced and, as a result, costs were also cut. The newly developed wiper arm can also be used in a modular fashion for various rail vehicles and is within specified cost limits. Following this work, the wiper arm still has to pass a test under real conditions, for example on a windshield test stand.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung	1
1.2	Rahmenbedingungen	1
1.3	Aufbau der Arbeit.....	1
2	Grundlagen	2
2.1	Funktion.....	2
2.2	Bauweise	5
3	Anforderungen, Konzept und Konstruktion	6
3.1	aktueller Wischerarm	6
3.2	Pflichtenheft.....	7
3.3	Konzept	10
3.4	Konstruktion.....	13
4	Finite-Elemente Analyse	18
4.1	Vorgehensweise	18
4.2	Modellierung	18
4.3	Lastfälle und Randbedingungen	23
4.4	Vernetzung und Konvergenzstudie.....	25
4.5	Analyse.....	30
5	Festigkeit Nietverbindungen.....	40
5.1	Nietverbindung Halteblech – Rohr.....	40
5.2	Nietverbindung Rohr – Verbindungsstück	41
6	Rechnerischer Festigkeitsnachweis	43
6.1	FKM-Richtlinie	43
6.2	Nachweis	44
6.3	Ergebnisse.....	77
7	Prototypentest.....	79
7.1	Drehmomentprüfstand	79
7.2	Ergebnisse / Konstruktionsoptimierungen	85
8	Kostenanalyse	90
8.1	Kostenanalyse	90

8.2	Investitionsausgaben	91
8.3	Überlegungen zur Kostenoptimierung	91
9	Diskussion und Ausblick	92
9.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	92
9.2	Diskussion der Ergebnisse	92
9.3	Weitere Schritte zur Weiterentwicklung	93
10	Literaturverzeichnis.....	94
11	Abbildungsverzeichnis	96
12	Tabellenverzeichnis	98
13	Abkürzungsverzeichnis.....	100

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen neuen Wischerarm, auf Basis des bestehenden Armes zu entwickeln, welcher einfacher zu montieren und modular für verschiedene Scheibengrößen einsetzbar ist. Dazu ist es nötig ein Konzept zu erarbeiten, ein 3D-Modell zu erstellen, Berechnungen und Prototypentests durchzuführen und die Kosten zu analysieren.

1.2 Rahmenbedingungen

Scheibenwischersysteme werden dazu benötigt die Sichtbarkeit aus den Führerständen, unter Berücksichtigung aller normativen Vorgaben, zu gewährleisten. Die Firma Knorr-Bremse GmbH ist Zulieferunternehmen für den Nutz- und Schienenfahrzeugbau und entwickelt unter anderem Scheibenwischsysteme für Schienenfahrzeuge. Die Anforderungen an Scheibenwischer sind im Vergleich zur Automobilbranche bezüglich Lebensdauer und Festigkeit sehr hoch. Durch immer vielfältigere Scheibenformen und zunehmender Konkurrenz sollen die Entwicklungen in Richtung Modularisierung, Vereinheitlichung und Reduzierung der Montagekomplexität gehen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Vorgehensweise der Arbeit entspricht der typischen Vorgehensweise eines Entwicklungsprozesses. In Kapitel 2 und 3 werden die Grundlagen und das Konzept geklärt und vorgestellt. Anschließend erfolgen in Kapitel 4 bis 6 FE-Analysen und rechnerische Nachweise zur Validierung des Konzeptes. Zugleich wurden Prototypenteile bestellt und Versuche auf Prüfständen durchgeführt, welche in Kapitel 7 dokumentiert werden. Im Anschluss erfolgt in Kapitel 8 eine Kosten- und Investitionsanalyse. Abschließend werden in Kapitel 9 weitere Vorschläge für zukünftige Optimierungsschritte und eine Diskussion der Ergebnisse der Arbeit dargelegt.

2 Grundlagen

2.1 Funktion

In der DIN 5566-2, welche die Anforderungen an Führerräume von Schienenfahrzeugen regelt, wird von einer *Scheibenwischanlage* folgende Funktion gefordert: „Zur Sicherstellung der Sicht auf Strecke und Signale müssen die Scheibenwischer das auf die Frontscheibe projizierte Sichtfeld freihalten. Kann diese Anforderung in Abhängigkeit von der Fahrzeugumgebung nicht realisiert werden, ist eine Einschränkung des Sichtfelds von den Rändern her um höchstens 5 % der horizontalen und vertikalen Abmessungen zulässig. Das Wischbild sollte dann jedoch in der Mitte oben und rechts unten die Begrenzungen des Sichtfelds erreichen.“ [1].

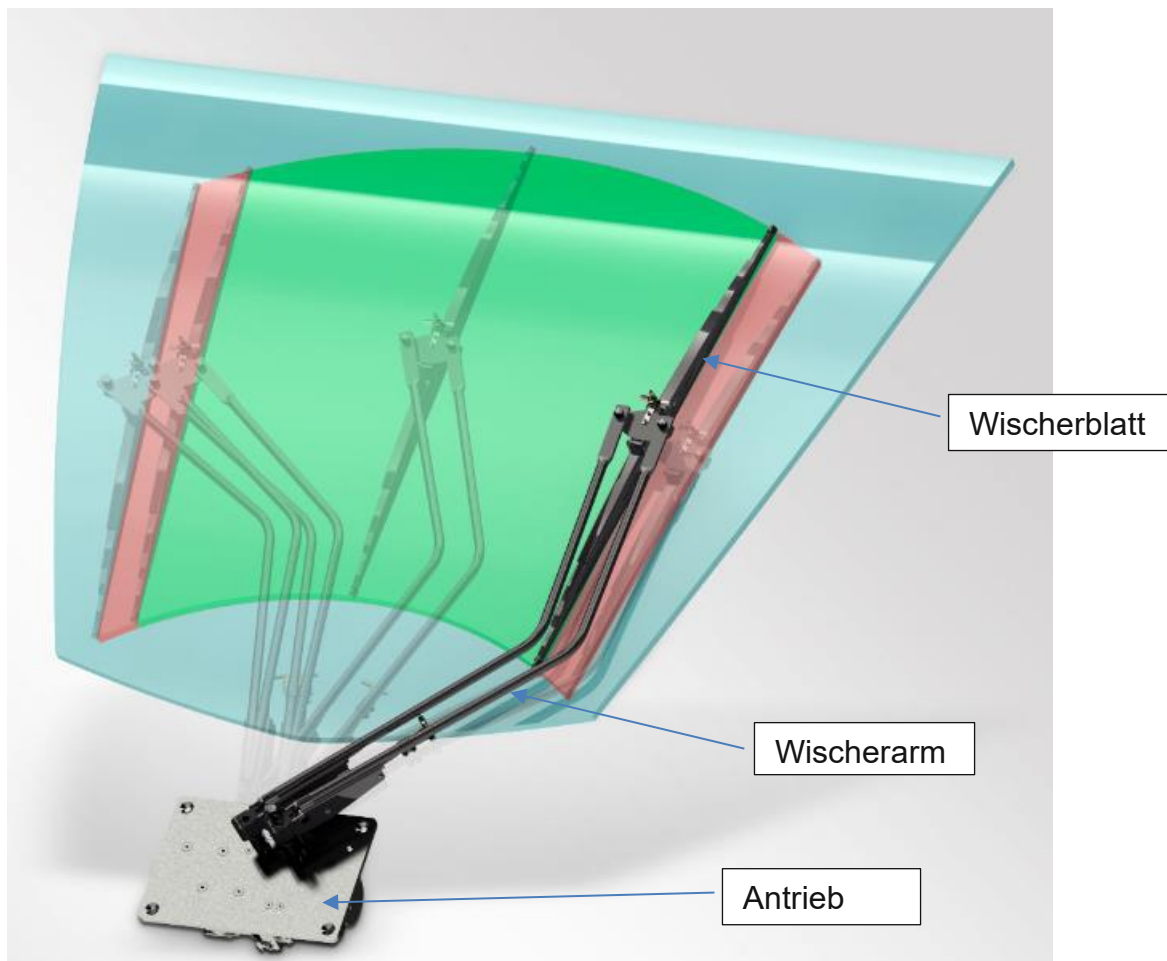


Figure 1 – Scheibenwischanlage [2]

In Figure 1 ist eine Scheibenwischanlage eines Schienenfahrzeuges, inklusive gefordertem Wischbild, abgebildet. Eine Scheibenwischanlage besteht generell aus drei Hauptkomponenten: dem Antrieb, dem Wischerarm, welcher in dieser Arbeit

betrachtet wird, und dem Wischerblatt. Dabei dient der Wischerarm als Führung und Verbindung zwischen den Komponenten und überträgt die Antriebsleistung vom Antriebsmotor zum Wischerblatt. Unabhängig von der Bauweise besitzt ein Wischerarm in der Regel mehrere funktionale Baugruppen, deren grundsätzliche Aufgabe nachfolgend beschrieben werden soll. Die Benennung dieser Baugruppen ist nicht standardisiert und wurde in dieser Arbeit so festgelegt. Die nachfolgenden Abbildungen der Baugruppen sind von einem bereits produzierten Knorr-Bremse GmbH Wischerarm.

Funktionale Baugruppe Verbindungsblech

Die Baugruppe Verbindungsblech besteht aus den Bauteilen Klemmbock, Halteblech und Feder (inklusive Befestigungsteilen). Der Klemmbock verbindet das Halteblech mit der Antriebswelle und dient zudem als Gelenksverbindung. Zwischen Klemmbock und Halteblech wird eine Zugfeder gespannt, welche für eine ausreichende Anpresskraft des Wischerblattes auf die Scheibe sorgt. Das Halteblech wiederum dient als Verbindung zwischen der Baugruppe Arm und dem Klemmbock. In Figure 2 ist die Baugruppe Halteblech eines aktuellen Knorr-Bremse Wischerarms zu sehen.

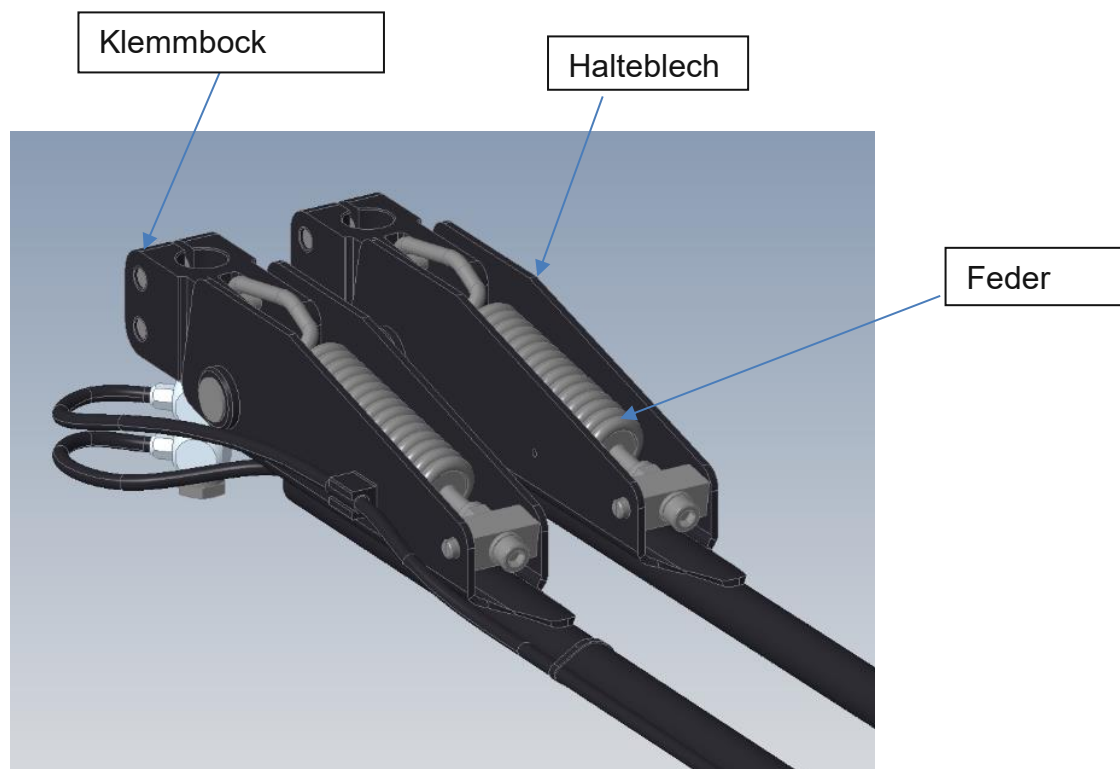


Figure 2 - Baugruppe Halteblech

Funktionale Baugruppe Arm

Zweck des Armes, welcher in der Regel als kreisförmiges oder rechteckiges Rohr ausgeführt wird, ist es, das Antriebsmoment vom Halteblech bis zur Baugruppe Wischblattaufnehmer zu übertragen. In Figure 3 ist das Rohr, verbunden mit dem Halteblech (links), zu sehen.

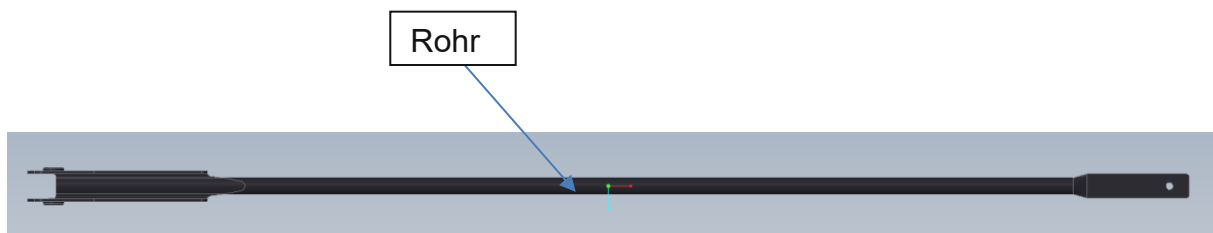


Figure 3 - Baugruppe Arm

Funktionale Baugruppe Wischblattaufnehmer

Die Baugruppe Wischblattaufnehmer wird, je nach Bauweise, auf ein oder zwei Armen gelagert. Aufgabe dieser Baugruppe ist die Aufnahme und Führung des Wischerblattes sowie weiteren Bauteilen wie zum Beispiel eine Spritzdüse. In Figure 4 ist die Baugruppe mit den Bauteilen Gabelstück (U-förmig) und dem Blech zu sehen.

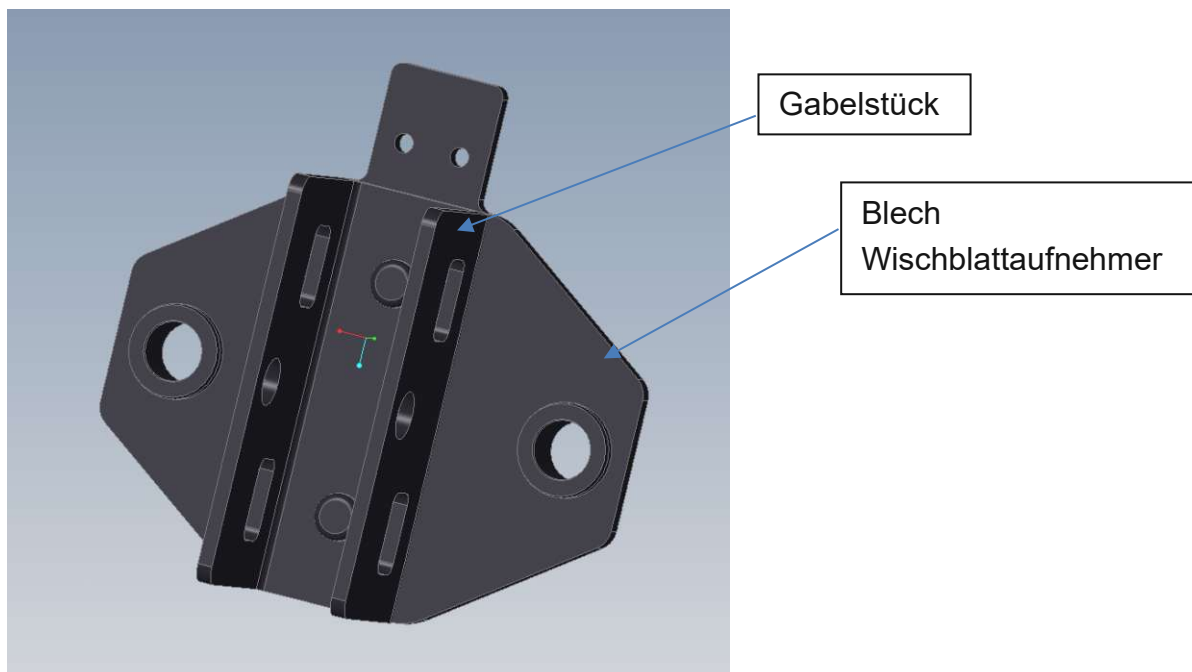


Figure 4 - Baugruppe Wischblattaufnehmer

2.2 Bauweise

Es soll ein Wischerarm in Parallel-Bauweise entwickelt werden. Bei dieser Bauweise schwenken zwei Arme parallel über die Scheibe. Am Klemmbock von einem der beiden Arme wird die Motorwelle angebracht und das Antriebsmoment übertragen. Dieser Arm wird als *Hauptarm* bezeichnet. Der andere Arm (*Nebenarm*) wird über die Verbindung an der Baugruppe Wischblattaufnehmer mitgeführt und ist mit einer Nebenwelle verbunden. In Figure 5 ist ein Parallelwischerarm auf einer Scheibe abgebildet.

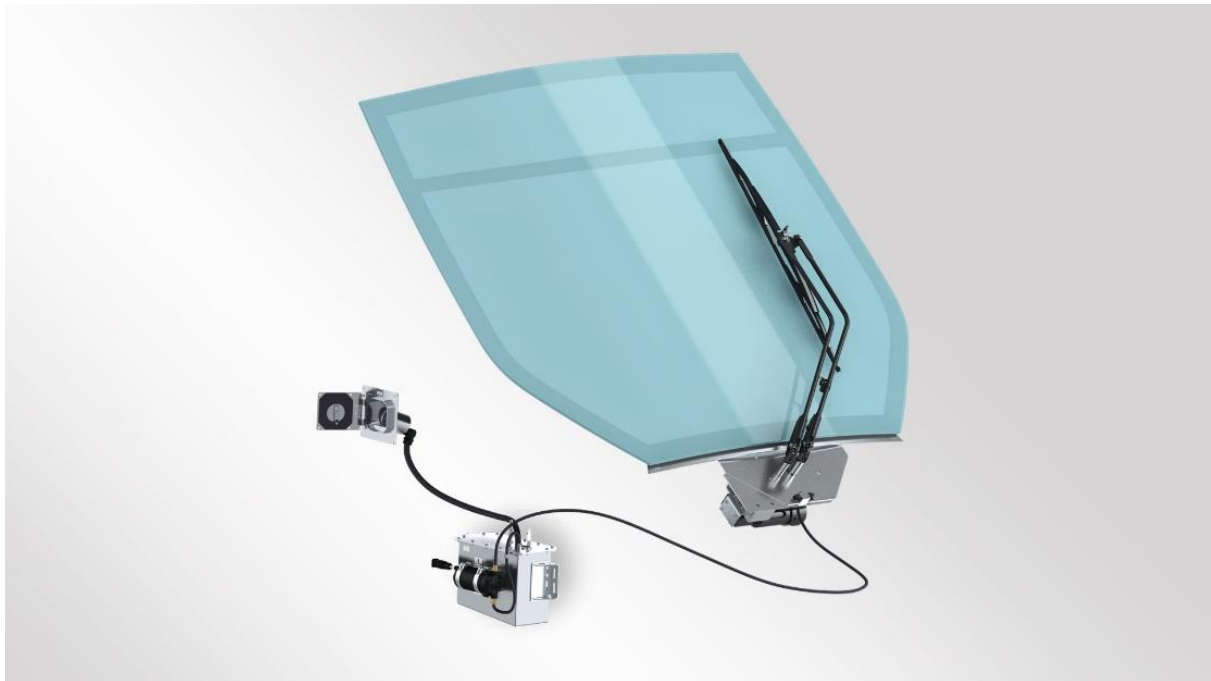


Figure 5 – Parallelwischerarm [2]

3 Anforderungen, Konzept und Konstruktion

3.1 aktueller Wischerarm

In Figure 6 ist ein Wischerarm der Knorr-Bremse GmbH abgebildet. Da der Arm als Rundrohr ausgeführt ist, wird dieser nachfolgend als *Rundrohrwischerarm* bezeichnet.

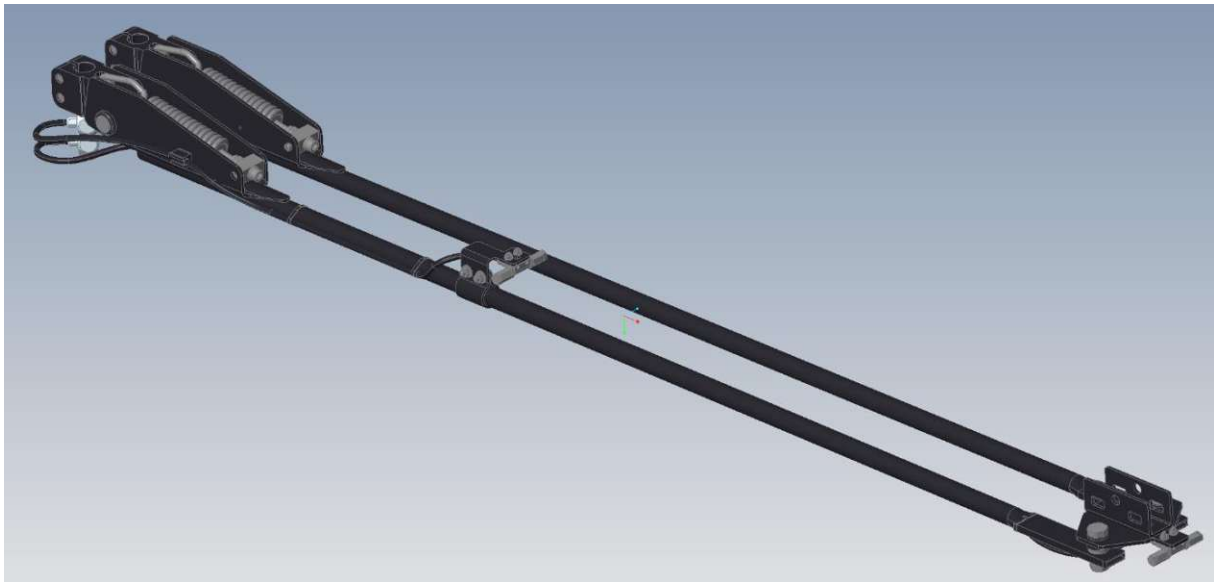


Figure 6 – Rundrohrwischerarm

Das Rohr hat einen Außendurchmesser von 16 mm. Zwischen Halteblech und Rohr wird durch Schweißen eine Verbindung hergestellt. Am scheibenseitigen Ende des Rohres wird das runde Rohr abgeflacht, so dass ein rechteckiges Endstück entsteht. Auf diesem rechteckigen Endstück befindet sich eine Bohrung und an dieser Stelle wird die Baugruppe Wischerblattaufnehmer verschraubt. Am Halteblech müssen für den Halbrundniet zwei Inserts angelötet werden.

Ziel der Weiterentwicklung dieses Armes ist es, die Montagekomplexität zu verringern. Zudem soll ein modularer Arm entstehen, wobei lediglich das Rohr je nach Bedarf verschiedene Längen erhält. Vor allem durch den Einsatz anderer Verbindungstechniken sollen direkte Kosten sowie Montagezeit minimiert werden. Im folgenden Kapitel 3.2 werden alle Anforderungen beschrieben, welche in der Entwicklung des neuen Wischerarmes berücksichtigt werden müssen.

3.2 Pflichtenheft

Im Pflichtenheft werden alle Anforderungen an die neue Konstruktion festgehalten. Diese Anforderungen wurden im Unternehmen intern festgelegt und werden in funktionelle-, allgemeine- und Umgebungsanforderungen eingeteilt. Nachfolgend werden die Anforderungen tabellarisch zusammengefasst und anschließend näher erklärt. Das Pflichtenheft bildet die Basis für die Auslegung und Konstruktion.

3.2.1 funktionelle Anforderungen

Es soll ein Parallelwischerarm entwickelt werden, welcher zwischen 600 mm bis 1200 mm Wischerarmlänge skalierbar ist. Damit möglichst hohe Stückzahlen erreicht werden können, soll sich für die verschiedenen Längen nur das Rohr verändern – die restlichen Bauteile bleiben ident.

3.2.2 allgemeine Anforderungen

In Table 1 sind die allgemeinen Anforderungen tabellarisch dargestellt. Im Anschluss an die Tabelle werden die genannten Begriffe genauer erklärt.

Table 1 - allgemeine Anforderungen

Anforderung	Wert	Bemerkung
Lebensdauer	10.000.000 Doppelhübe	
Oberflächenbeschichtung/ Korrosionsschutz	Ja	Oberflächenbeschichtung (Blendschutz)
Werkstoff	Aluminium oder Edelstahl	Rohr
Dauerbetriebsmoment max.	80 Nm	
Klemmbock	-	Bereits definiert
Feder	-	Vorspannkraft optional einstellbar bzw. entlastbar
Gelenk	-	Dauerfest bis 80Nm

Halteblech	-	Nur 1 Variante für alle Längen, keine Schweißnähte
Rohr	Rechteckprofil	Schlauchdurchführung, Kantenschutz, Düsenbefestigung
Wischblattträger		Montage ohne Werkzeug optional,
Düsen	-	Waschwasserbeständigkeit, Einstellbarkeit, Fächerdüsen optional (Wassereinsparung)
Wischblatt	-	Nur einen Wischblattträger für verschiedene Wischblätter
Schlauch	-	Nutzfahrzeugschläuche, Knick-, Scheuer-, Waschmittel-, Temperatur-, UV-Beständig

Lebensdauer: Der Wischerarm soll bei einem Antriebsmoment von 80 Nm zehn Millionen Doppelhübe ausführen können und daher als dauerfest gelten. Ein Doppelhub umfasst die Auslenkung der Antriebswelle in positive und negative Richtung. Das maximale Antriebsmoment von 80 Nm tritt im sogenannten Modus „Wischen Schnell“ auf. Daher wird der Wischerarm im Betrieb auch mit niedrigeren Antriebsmomenten betrieben und die Auslegung liegt auf der sicheren Seite.

Werkstoff: Alle Bauteile, mit Ausnahme des Rohrs, sollen aus Edelstahl (1.4301) gefertigt werden. Das Rohr kann entweder aus Edelstahl oder Aluminium bestehen. Die Materialauswahl ist durch die Korrosionsbeständigkeit und Festigkeitseigenschaften begründet. Um Probleme mit Kontaktkorrosion zu vermeiden, wird auch das Rohr aus Edelstahl ausgeführt.

Dauerbetriebsmoment: Der Wischerarm wird bis zu 80 Nm Dauerbetriebsmoment betrieben. Daher muss die Dauerfestigkeit bei diesem Antriebsmoment gegeben sein.

Klemmbock: Der Klemmbock wurde bereits entwickelt und ist somit vorgegeben.

Feder: Die Vorspannkraft der Feder, die für die Anpresskraft an die Scheibe sorgt, soll nachträglich einstellbar sein.

Halteblech: Es soll ein Standard-Halteblech für verschiedene Wischerarmlängen konstruiert werden. Lediglich das Rohr kann in seiner Länge variabel sein. Zudem soll auf Schweißverbindungen aus Montage- und Kostengründen verzichtet werden.

Rohr: Aus verschiedenen Gründen (Kosten, Verfügbarkeit, Optik, Verbindungen) soll das Rohr als quadratisches Rechteckprofil ausgeführt sein. Des Weiteren muss eine Schlauchführung und Befestigungen für Spritzdüsen vorgesehen werden.

Wischblattträger: Der Wischblattträger soll, gleich wie das Halteblech, für alle Wischerarmlängen gleich sein und in Leichtbauweise konstruiert werden. Auf dem Wischblattträger soll eine Spritzdüse befestigt werden können.

Wischerarmlänge: Der Wischerarm soll skalierbar entwickelt werden und in Längen zwischen 600 mm bis 1200 mm hergestellt werden, wobei sich nur das Rohr in der Länge unterscheiden soll.

3.2.3 Umgebungsanforderungen

Table 2 - Umgebungsanforderungen

Anforderung	Wert	Bemerkung
Umgebungstemperaturbereich	-40°C ...+70°C	
Lackierung	DB Lackierung	
Lackierung Schichtdicke	/	
Farbe	Schwarz	
Korrosionsfestigkeit	500h NSS	ISO9227
Spezielle Anforderungen an den Einbauort	Ja	Außenbereich
Feuchtigkeit	5 -100% rF	
Brandschutz	Ja	EN 45545-2:2013-03
Schock- und Vibration	Kat. 1 Klasse B	IEC 61373:2010-05

In Table 2 sind die Umgebungsbedingungen und Anforderungen dargestellt.

Umgebungstemperaturbereich: Der Temperaturbereich wird auf -40°C bis +70°C festgelegt.

Lackierung: Die Lackierung des Wischerarmes soll in einer DB-Farbe (Deutsche-Bahn Farbtonkarte) entstehen. Diese bietet durch einen hohen Anteil an Eisenglimmer einen verbesserten Korrosionsschutz.

Lackierung Schichtdicke: Die Schichtdicke der Lackierung ist noch nicht festgelegt.

Korrosionsfestigkeit: Der Wischerarm muss mindestens einen 500h NSS (Neutraler Salzsprühnebeltest) nach ISO 9227 bestehen.

Spezielle Anforderungen an den Einbauort: Der Wischerarm wird am Außenbereich eines Schienenfahrzeuges montiert.

Feuchtigkeit, Brandschutz, Schock und Vibration: Die zu erfüllenden Normen sind in Table 2 ersichtlich.

3.3 Konzept

In diesem Kapitel wird das Konzept für die Weiterentwicklung des Wischerarmes erläutert. Neben den Anforderungen aus dem Pflichtenheft liegt der Fokus vor allem auf der Komplexitätsverringerung der Einzelteile, Verbindungen und Montage des Wischerarmes. Des Weiteren soll wo möglich auf Standardhalbzeuge oder bereits im Konzern vorhandene Teile zurückgegriffen werden.

3.3.1 Verbindungen

Das größte Potential zur Vereinfachung der Montage und der Standardisierung bieten die Verbindungen. Aktuell werden Schweiß-, Löt- und Schraubverbindungen eingesetzt. Die Herstellung dieser Verbindungen ist aufgrund der benötigten Arbeitszeit, Montagevorrichtungen und den benötigten Fachkenntnissen komplex und kostenintensiv. Aufgrund dessen sollen die Schweiß- und Schraubverbindungen durch Blindnieten ersetzt werden und anstelle der Lötverbindung soll eine Verbindung mittels dem Umformverfahren Kragenziehen geschaffen werden. Nietverbindungen haben bei dünnwandigen Bauteilen, insbesondere bei der Verwendung von Blindnieten, den Vorteil einer sehr schnellen und einfachen Montage und sind zudem kostengünstig. Im Gegensatz zu anderen Nietarten benötigt man bei Blindnieten lediglich Zugang zur Verbindungsstelle von einer Seite. Dies verringert den Aufwand zur Herstellung der Nietverbindung deutlich.

Table 3 - Übersicht Verbindungen

Zu verbindende Bauteile	Aktueller Arm	Neuer Arm
Rohr - Halteblech	Schweißverbindung	Nietverbindung
Rohr - Verbindungsstück	Schraubverbindung	Nietverbindung
Gabelstück - Blech	Nietverbindung	Nietverbindung
Hauptgelenksverbindung	Verlötete Einsätze + Taumelniet	Kragenziehen + Halbrundniet
Verbindungsstück – Blech Wischblattaufnehmer	Schraubverbindung	Gleitlager + verpresster Lagerbolzen

Verbindung Rohr – Halteblech

Diese Verbindung soll durch vier Stück Blindnieten erfolgen. Da, besonders ohne seitliche Unterstützung des Halteblechs, diese Nieten hohe Kräfte aufnehmen müssen, werden hochfeste Blindnieten (Durchmesser 6.8 mm) gewählt. Später soll aufgrund der vor allem bei Blindnieten unsicheren analytischen Nachweismöglichkeiten, die Festigkeit in Prototypentests überprüft werden.

Verbindung Rohr – Verbindungsstück

Auch hier sollen Nietverbindungen eingesetzt werden. Hier sind deutlich geringere Kräfte zu erwarten und daher werden Standard-Blindnieten (Durchmesser 4.8 mm) verwendet.

Verbindung Gabelstück – Blech Wischblattaufnehmer

Diese unkritische Nietverbindung wird durch zwei Stück Standard-Blindnieten (Durchmesser 4.8 mm) realisiert.

Verbindung Gelenk Klemmbock

Diese gelenkige Verbindung wurde bisher durch eine Hülse und einen Niet mit Senkkopf (DIN 660, Durchmesser 8mm) sichergestellt. Zur Unterbringung der Senkköpfe des Nietes müssen Inserts am Halteblech eingelötet werden, wodurch die Produktionskosten erhöht werden. Der Montageaufwand, welcher durch die Verlotung der Buchsen entsteht, soll verringert werden.

Die neue Verbindung soll ähnlich gestaltet werden. Anstelle des Senknietes wird ein Halbrundniet verwendet, so dass keine Inserts benötigt werden. Zudem soll mittels des

Verfahrens *Kragenziehen* das Halteblech in die Hülse eingepresst werden, so dass die Stabilität erhöht wird.

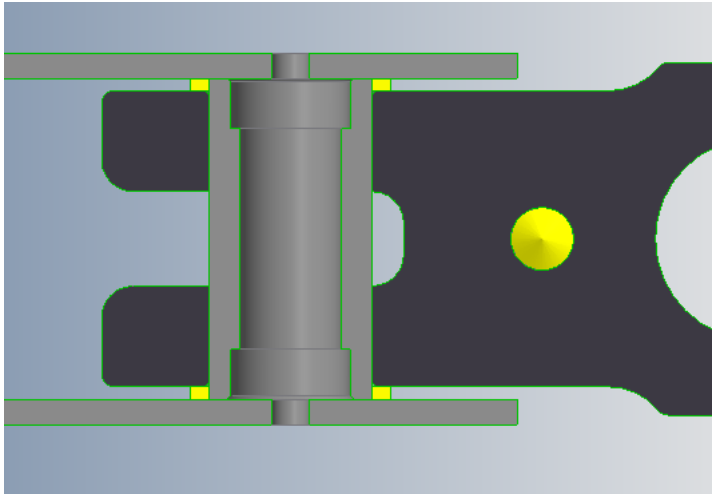


Figure 7 – Gelenksverbindung

In Figure 7 ist die Gelenksverbindung geschnitten dargestellt. Zwischen Klemmbock (schwarz) und der Hülse ist eine rotatorische Bewegung um die Hülse möglich. Das Halteblech wird mittels eines Stempels und einer Presse in den größeren Radius der Hülse eingedrückt. Zwei Anlaufscheiben (gelb) sorgen dafür, dass das Spiel minimiert wird. Nachdem das Halteblech eingedrückt wird, wird ein DIN 660 Halbrundniet durchgeführt (nicht dargestellt).

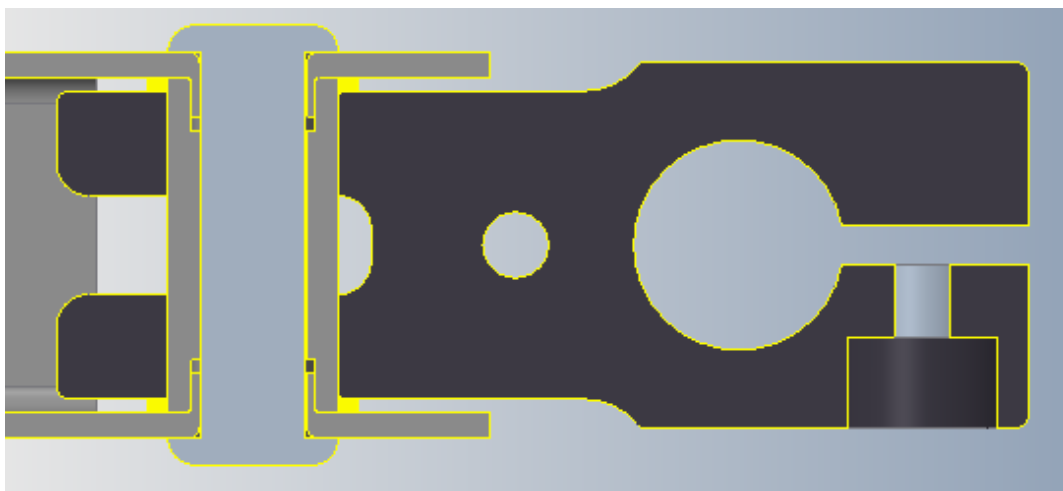


Figure 8 - fertige Gelenksverbindung

In Figure 8 ist die Verbindung mit gezogenem Kragen und durchgeführtem Niet dargestellt.

Verbindung Verbindungsstück – Blech Wischblattaufnehmer

Mittels den zwei Verbindungsstücken wird das Rohr mit der Baugruppe Wischblattaufnehmer verbunden. Dies geschieht auf folgende Weise: In das Verbindungsstück wird eine Gleitlagerbuchse eingepresst, in welcher ein Bolzen gelagert wird, der in das Blech Wischblattaufnehmer eingepresst wurde.

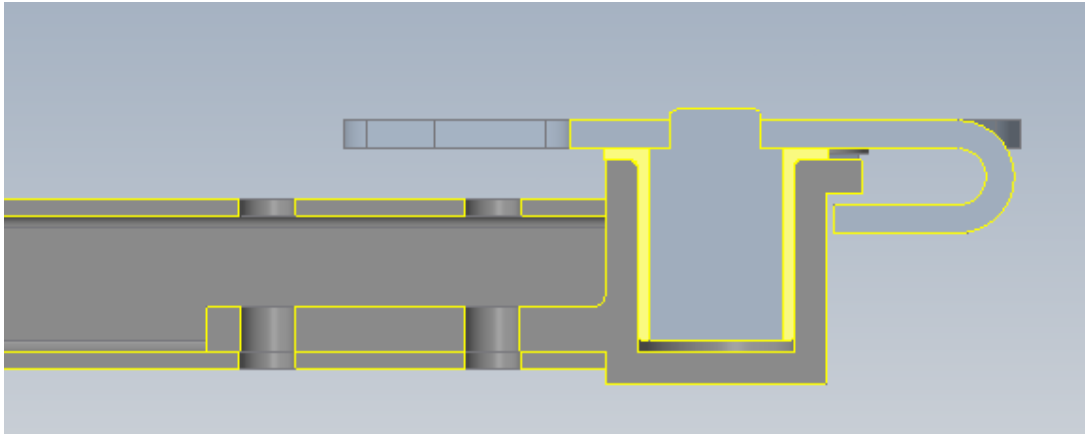


Figure 9 - Verbindung Verbindungsstück - Blech Wischblattaufnehmer

In Figure 9 ist diese Verbindung dargestellt. Das Verbindungsstück mit dem Rohr wird wiederum durch zwei Blindnieten verbunden (nur Bohrungen dargestellt).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass alle Schweißverbindungen durch Nietverbindungen ersetzt werden und die Schraubverbindung (mit Hülse) soll durch einen verpressten gelagerten Bolzen ersetzt werden. Im nachfolgenden Kapitel 3.4 werden die konstruktiven Ausführungen genauer dargelegt.

3.3.2 Einzelteile

Die Einzelteile sollen möglichst einfach im Hinblick auf die Fertigung, bevorzugt als Blech- und Biegeteile, gestaltet werden. Ebenso wird darauf geachtet, dass möglichst viele Standard-Halbzeuge und Standard -Normteile verwendet werden.

3.4 Konstruktion

3.4.1 Auslegung

Die Auslegung der Bauteile basiert auf der Grundlage von Kenntnissen aus Vorgängerprodukten, FE-Analysen und durch geometrische Vorgaben aus

vorgegebenen Teilen (Klemmbock, Wischblatt). Neben den Hauptaspekten Festigkeit und Kosten, fließen noch folgende Vorgaben in die Auslegung mit ein:

- Der Klemmbock gibt die Breite am antriebsseitigen Ende des Halteblechs vor.
- Das Rechteckrohr wird als Quadratrohr mit 15x15x1.5 mm oder 16x16x2 mm ausgeführt. Vorausgehende Arbeiten [3] haben diese Dimensionen aus Kosten- und Festigkeitsgründen für optimal befunden. Da zur Zeit der Auslegung und Konstruktion kein Lieferant ein 16x16x2 mm Rohr im Standardsortiment hat, wird ein 15x15x1.5 mm Rohr ausgewählt.
- Die Breite des Wischblattaufnehmers ist durch Standard-Wischerblätter vorgegeben.
- Die Länge des gesamten Wischerarmes ist durch das Pflichtenheft vorgegeben.
- Das Halteblech muss ausreichend dimensioniert werden für Wischerarmlängen bis zu 1200 mm.
- Weiters ist genug Platz für Nietverbindungen vorzusehen.

Zudem müssen die Konstruktionsrichtlinien (Biegeradien, Blechstärken, Falzlängen, etc.) der Lieferanten eingehalten werden. Aus den vorhin genannten Punkten sowie den Konstruktionsrichtlinien der Lieferanten ergeben sich die genauen Abmaße der Bauteile. In den folgenden Kapiteln 3.4.2 bis 3.4.5 wird die Funktion der neu zu konstruierenden Teilen beschrieben.

3.4.2 Halteblech

Die Funktion des Halteblechs besteht darin, den Klemmbock, welcher die Verbindung zwischen der Antriebswelle und dem Wischerarm darstellt, mit dem Rohr zu verbinden. Zudem sorgt eine Feder die sowohl am Klemmbock als auch am Halteblech angebracht wird, für eine ausreichende Anpresskraft auf die Scheibe. Das Halteblech wird als Blechbiegeteil mit einer Blechstärke von 2 mm ausgeführt. An der Bodenfläche werden vorerst vier Bohrlöcher für die Nietverbindung vorgesehen. Ebenso werden an den Seitenwänden Bohrungen für die Hauptgelenksverbindung und weitere Anschlusspunkte angebracht. Zudem muss sichergestellt werden, dass der Klemmbock frei um die Gelenksachse rotieren kann, ohne mit dem Halteblech zu kollidieren. Es soll, wenn möglich, ein gerades Halteblech konstruiert werden, welches durch einfache Biegeprozesse hergestellt werden kann. Da ein gerades Halteblech das Rohr seitlich nicht unterstützt, soll mittels FKM-Nachweises und Prototypentest

überprüft werden, ob die Festigkeit ohne seitliche Unterstützung gegeben ist. Sollte keine ausreichende Festigkeit gegeben sein, müssen alternative Bleche, mit seitlicher Unterstützung, analysiert werden. In Figure 10 ist das 3D-Modell des Halteblechs dargestellt.

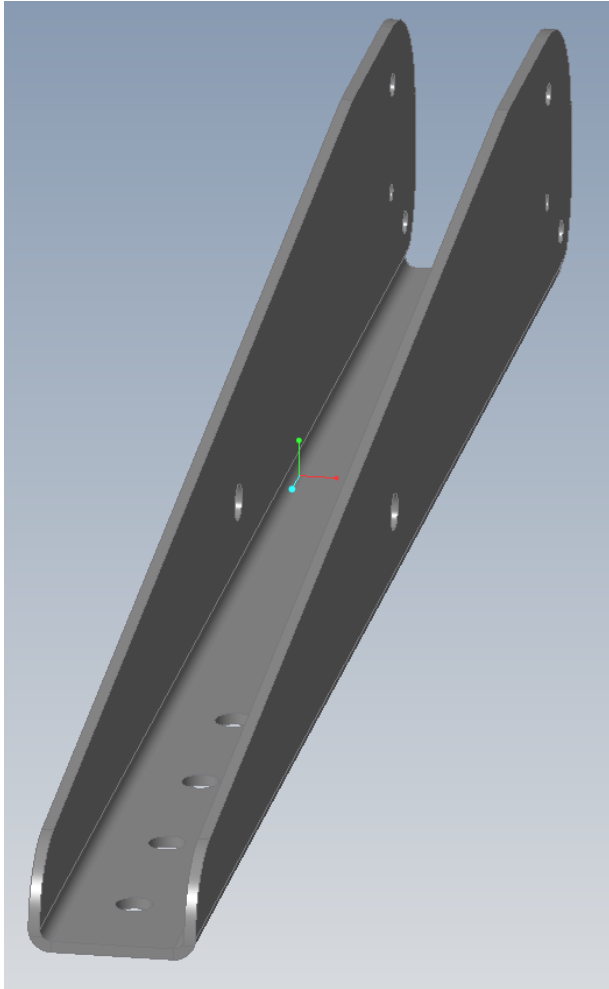


Figure 10 - Halteblech

3.4.3 Rohr

Das quadratische Rohr (15x15x1.5 mm) wird auf der einen Seite mit dem Halteblech, und auf der anderen Seite mit dem Verbindungsstück vernietet. Dazu erhält das Rohr auf beiden Seiten Bohrungen. Diese Bohrungen gehen sowohl durch die Ober- und Unterseite des Rohres, da die Nieten im Rohzustand länger als 15 mm sind. Die Wasserzuführung für die Spritzdüsen soll im Inneren des Rohres verlaufen. Daher sind Öffnungen für den Ein- und Auslass des Schlauches an der Rohroberseite angebracht.

3.4.4 Verbindungsstück

Die Funktion des Verbindungsstückes besteht darin, das Blech Wischblattaufnehmer zu lagern. Zu diesem Zweck wird in das Verbindungsstück ein Gleitlager eingepresst. Die Verbindung zum Rohr erfolgt wieder durch eine Nietverbindung.

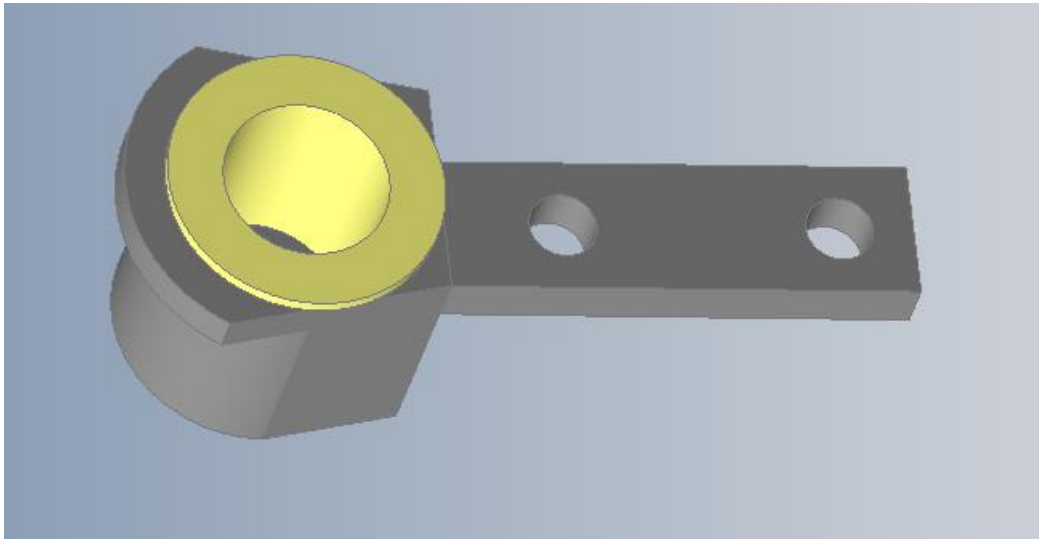


Figure 11 - Verbindungsstück mit eingepresster Lagerbuchse

In Figure 11 ist ein Verbindungsstück mit eingepresster Lagerbuchse abgebildet. Vorerst wird dieses als Frästeil gefertigt. Sollte sich die Konstruktion bewähren soll dieses zu einem späteren Zeitpunkt als Gussteil umkonstruiert und gefertigt werden.

3.4.5 Blech Wischblattaufnehmer

Über das Blech Wischblattaufnehmer werden die beiden Arme miteinander verbunden. Zudem werden an diesem Blech das Gabelstück und die Spritzdüse befestigt. Die Verbindung zwischen Blech Wischblattaufnehmer und Gabelstück erfolgt durch Nieten und die Verbindung Blech Wischblattaufnehmer und Spritzdüse durch eine Schraubverbindung. Die beiden umgefalteten Blechzungen verhindern das Abheben der Verbindungsstücke.

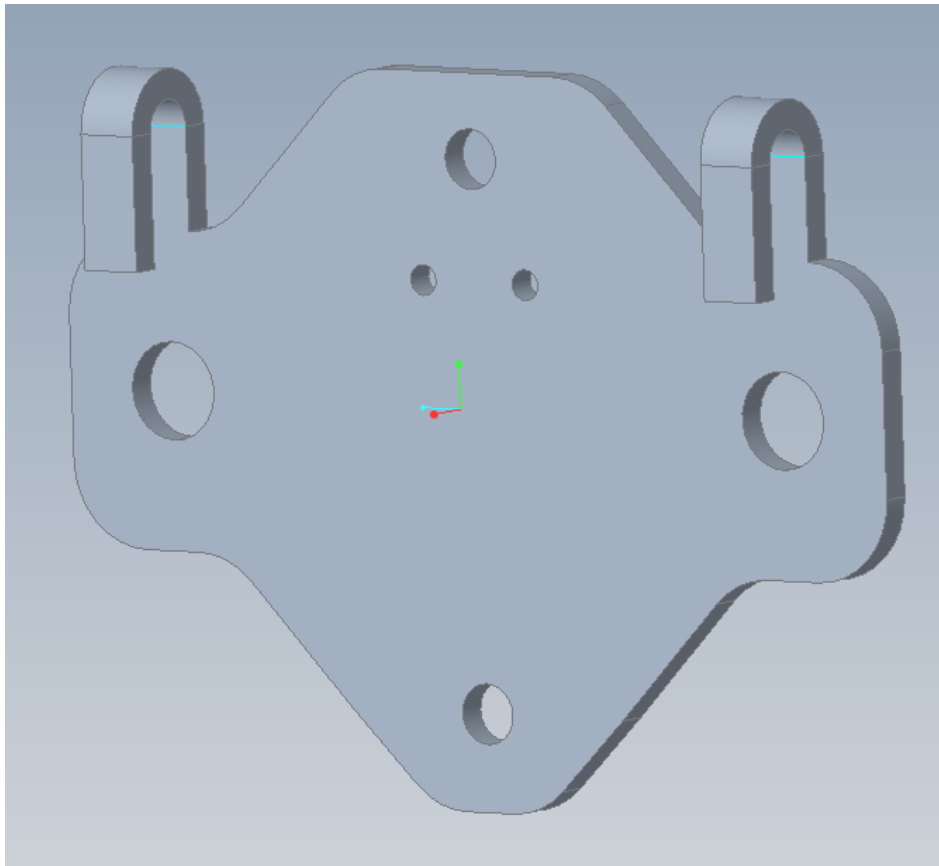


Figure 12 - Blech Wischblattaufnehmer

4 Finite-Elemente Analyse

4.1 Vorgehensweise

Der gesamte Parallelwischerarm soll in einem Finite-Elemente-Modell abgebildet und analysiert werden. Die Ergebnisse der Simulation sollen die Grundlage für den Festigkeitsnachweis nach der FKM-Richtlinie (siehe Kapitel 6) und weiteren Berechnungen bilden. In den folgenden Kapiteln wird die Modellierung, die Vernetzung und die Analyse der Ergebnisse dokumentiert. Die verwendete Software ist das kommerzielle Finite-Elemente Paket *Ansys Mechanical R2 2021* von *Ansys Inc.* [4].

4.2 Modellierung

Für eine FE-Analyse wird ein Modell des Wischerarmes benötigt, welches durch finite Elemente diskretisiert werden kann. Hierzu kann das bereits vorhandene 3D-Modell verwendet werden. Dazu sind mehrere Arbeitsschritte notwendig, die in den folgenden Unterkapiteln erläutert werden.

4.2.1 Import und Vorbereitung des CAD-Modells

Um die Geometrie zu erhalten, wird das CAD-Modell aus dem verwendeten CAD-Programm als STEP-Datei exportiert und in *Ansys* importiert. Anschließend werden in der *Ansys* internen CAD-Modellierungssoftware *Space Claim* weitere Bearbeitungsschritte zur Vereinfachung und Vorbereitung der Geometrie für das FE-Modell vorgenommen. Die Aufbereitung des importierten CAD-Modells geschieht in zwei Schritten:

1. Extraktion der Mittelflächen von dünnwandigen Bauteilen

Um den Rechenaufwand zu minimieren, können dünnwandige Bauteile durch Schalenelemente modelliert werden. Durch die Modellierung mittels Schalenelementen ist der Vernetzungsaufwand sowie die benötigte Elementgröße deutlich geringer [5]. Dazu müssen die Mittelflächen aller dünnwandigen Bauteile aus den Volumenmodellen extrahiert werden. Mit dem Tool *Mittelflächen extrahieren* im Reiter *Konstruktion* in *Space Claim* werden die Mittelflächen generiert. Bis auf die Bauteile Bolzen, Verbindungsstück und Lagerbuchse, werden alle Teile durch Schalenelemente modelliert. Neben dem Vorteil des geringeren Rechenaufwandes bietet diese Vorgehensweise einen weiteren Vorteil: Den auf diese Weise modellierten

Bauteilen kann von ihrer Mittelfläche aus eine Wandstärke zugewiesen und einfach verändert werden. Somit können bei den Blechen oder dem Rohr beispielsweise schnell und unkompliziert verschiedene Wandstärken simuliert werden, ohne dazu ein neues Modell erstellen zu müssen.

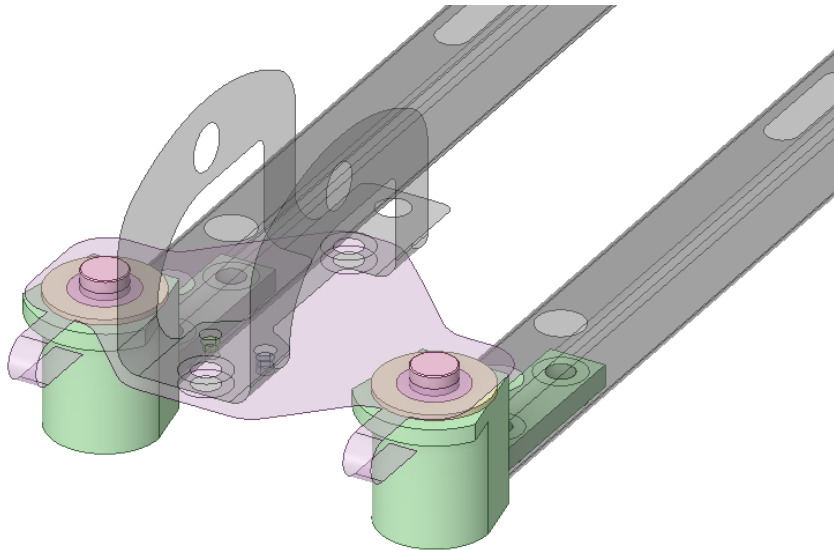


Figure 13 - Baugruppe Wischblattaufnehmer

In Figure 13 ist die Baugruppe Wischblattaufnehmer nach der Mittelflächenextraktion zu sehen. Bis auf das Verbindungsstück, im Bild in grüner Farbe zu sehen, dem Bolzen (pink) und der Lagerbuchse (gelb), sind nur mehr Mittelflächen vorhanden. Im Anschluss kann den Schalen Material, Versatztyp und eine Dicke zugewiesen werden.

2. Bearbeitung der Geometrie für die Modellierung der Verbindungen

Die Verbindung zwischen Halteblech und Rohr, Rohr und Verbindungsstück sowie Gabelstück und Blech Wischblattaufnehmer wird durch Nietverbindungen realisiert. Die Nietverbindungen werden als Bushing Element nachgebildet (siehe Kapitel 4.2.2). Hierzu muss die Geometrie vorbereitet werden. Auf den Bauteilen, die durch einen Niet verbunden werden sollen, muss rund um die Bohrung die Fläche aufgespalten werden, damit sie später in der Verbindungsdefinition separat ausgewählt werden kann. Dazu wird ein Kreis, dessen Mittelpunkt, mit dem der Bohrung zusammenfällt, skizziert. Der Kreis hat genau den Radius, den der Nietkopf im gestauchten Zustand besitzt. Anschließend kann mit der Funktion *Projizieren* im Reiter *Konstruktion* in *Space Claim* die Fläche aufgespalten werden. Damit die beiden Flächen wie ein Bauteil behandelt werden, muss unter *Eigenschaften* --> *Topologie* die Option *Gemeinsam benutzen* für die beiden Flächen ausgewählt werden.

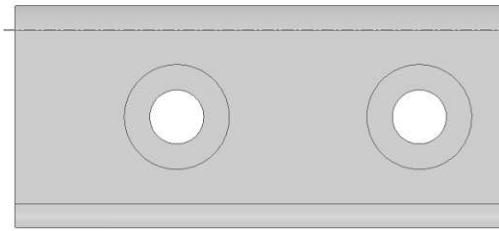


Figure 14 - Geometrievorbereitung Nietverbindung am Halblech

In Figure 14 ist die vorbereitete Geometrie für die Nietmodellierung zu sehen. Rund um die Bohrung für den Niet wurde genau die Fläche abgespalten, die der verstauchte Nietkopf einnehmen würde.

4.2.2 Kontakte und Verbindungen

Zwischen angrenzenden Bauteilen muss angegeben werden, wie die Bauteile sich zueinander verhalten und welche Verbindungen oder Kontakte zwischen ihnen bestehen. In *Ansys* stehen verschiedene Kontakt- und Verbindungsmöglichkeiten zur Verfügung. *Kontakte* werden im Allgemeinen verwendet, wenn sich zwei Bauteile berühren oder eine Kraft- oder formschlüssige Verbindung bilden. *Verbindungen* hingegen werden gesetzt, wenn zwei Bauteile durch ein Verbindungselement verbunden werden, etwa durch Schrauben, Nieten oder Bolzen. Eine vollständige Beschreibung aller möglichen Kontakte und Verbindungen und deren Eigenschaften sind in der Online-Hilfe von *Ansys* [6] zu finden.

Table 4 – definierte Kontakte

Kontakt zwischen Bauteilen	Art des Kontaktes	Realer Kontakt
Bolzen - Gleitlagerbuchse	Reibungsfrei	Gleitlagerung
Bolzen - Blech Wischblattaufnehmer	Verbund	Pressverband und Vertaumelung
Gleitlagerbuchse - Verbindungsstück	Verbund	Eingepresste Gleitlagerbuchse
Buchsenbund - Blech Wischblattaufnehmer	Reibungsfrei	Kontakt Buchsenbund - Blech
Buchsenbund - Blech Wischblattaufnehmer	Keine Trennung	Durch die Scheibenanpresskraft soll kein Abheben stattfinden.

In Table 4 sind die Kontakte zwischen den Bauteilen aufgelistet. Die Gleitlagerung und der Kontakt zwischen der Gleitlagerbuchse und dem Blech Wischblattaufnehmer wird

als reibungsfrei angenommen. Die Verbindung Bolzen - Blech Wischblattaufnehmer sowie die in das Verbindungsstück eingepresste Bundbuchse wird als Verbund modelliert. Des Weiteren wird bei dem Kontakt Buchsenbund - Blech Wischblattaufnehmer, angenommen, dass keine Trennung auftritt. Diese Annahme ist damit zu rechtfertigen, dass auch im realen Betrieb es nur in Ausnahmesituationen zu einer Trennung kommen kann. In der Regel ist die Scheibenanpresskraft ausreichend, um dies zu verhindern. Generell wurden die Kontakte so gewählt, dass eine lineare und nicht zu rechenintensive Simulation ermöglicht wird.

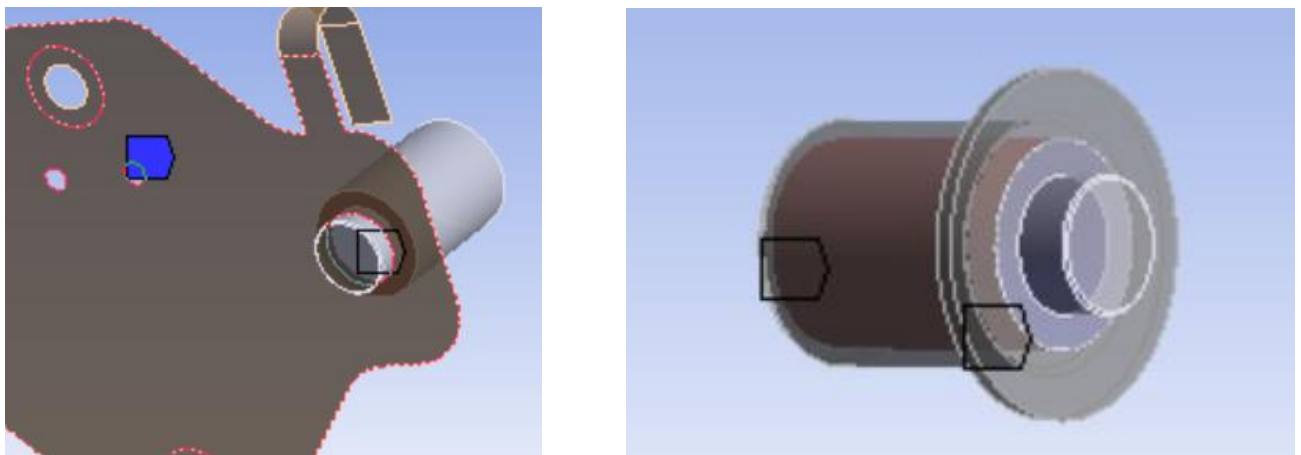


Figure 15 - Kontakt Bolzen-Blech Wischblattaufnehmer und Kontakt Lagerbuchse Bolzen

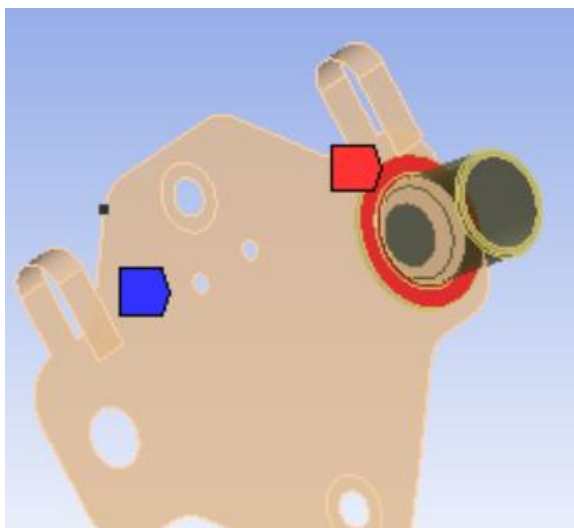


Figure 16 - Kontakt Buchsenbund-Blech Wischblattaufnehmer

In Figure 15 und 16 sind die vorhin genannten Kontakte dargestellt. Die Kontaktflächen sind rot eingefärbt.

Table 5 - Verbindungen

Verbindung	Art der Verbindung	Reale Verbindung
Halteblech-Rohr	Bushing Element	Nietverbindung
Verbindungsstück-Rohr	Bushing Element	Nietverbindung
Gabelstück-Blech Wischblattaufnehmer	Bushing Element	Nietverbindung

In Table 5 sind die verwendeten Verbindungen aufgelistet. Verbindungen werden hier zur Modellierung der Nietverbindungen eingesetzt. Prinzipiell gibt es mehrere Möglichkeiten zur Modellierung von Nietverbindungen, welche sich in Komplexität, Genauigkeit und Modellierungsaufwand unterscheiden. Auf Basis der Diplomarbeit „Automatisierte FE-Berechnung von Sandkästen“ [7] und unternehmensinternen Erfahrungen, wird die Modellierung mittels *Bushing* Elementen gewählt. Bei dieser Verbindungsart können Steifigkeitswerte für alle sechs Freiheitsgrade definiert werden [7].

Modellierung von Nietverbindungen als Bushing-Element

Die Modellierung als Bushing-Element bietet mehrere Vorteile. Zum einen lassen sich diese Verbindungen in *Ansys* auf schnelle Weise erstellen und zum anderen wird die Steifigkeit der Nietverbindung berücksichtigt. Mit dieser Methodik kann zwar die Vorspannung nicht erfasst werden, allerdings fällt diese bei Blindnieten, im Vergleich zu Vollnieten, geringer aus und zudem ist es ohnehin schwierig, eine Aussage über die Vorspannkraft zu treffen. [8]

Im Folgenden wird die Vorgehensweise zur Modellierung der Nietverbindungen in *Ansys* erläutert:

1. Aufspalten der Geometrie

Zuerst muss die Fläche rund um die Nietbohrung aufgespalten werden. Die Vorgehensweise dazu wurde bereits in Kapitel 4.2.1 beschrieben.

2. Flächennormale

Nach der Aufspaltung der Flächen muss darauf geachtet werden, dass die aufgespaltene Fläche und die umliegende Fläche, die gleiche Flächennormale besitzt. Zudem muss die Flächennormale jeweils „nach außen“, also vom Bauteil weg, zeigen.

Die Kontrolle der Flächennormale geschieht mit dem Tool *Flächennormale prüfen* im Reiter *Messen*.

3. Verbindung setzen und Steifigkeitswerte eingeben

In *Ansys* entspricht die Verbindung mit Verbindungstyp „Körper-Körper“ und Typ „Lager“. Um die Verbindung zu setzen, muss nun jeweils die abgespaltene Außenfläche der zu verbindenden Bauteile, ausgewählt werden. Zudem können nun für alle sechs Freiheitsgrade, Steifigkeitswerte eingegeben werden. Die eingegebenen Steifigkeitswerte für diese Simulation stammen aus internen Erfahrungswerten sowie der Diplomarbeit von Miesgang, in der eine Parameterstudie für verschiedene Blechdicken und Blindnieten zur Ermittlung der Steifigkeitswerte, durchgeführt wurde [7].

4. Verbindungskoordinatensystem anpassen

Falls die zu verbindenden Blechen eine unterschiedliche Wandstärke haben, muss noch das Verbindungskoordinatensystem der „Körper-Körper“-Verbindung angepasst werden. Das Verbindungskoordinatensystem soll im Falle von gleicher Blechstärken in der Mitte liegen und im Falle von verschiedenen Blechstärken an der Kontaktebene der Bleche.

4.3 Lastfälle und Randbedingungen

4.3.1 Lastfälle

Es wird ein Antriebsmoment von 80 Nm, sowie eine Scheibenanpresskraft von 20N pro Meter Wischerarmlänge aufgebracht. Diese Werte stammen aus dem Pflichtenheft (siehe Kapitel 3.2). Um ein Antriebsmoment von 80 Nm zu erreichen, wird eine Kraft von 67 N mittels einer externen Kraft an den Befestigungsbohrungen für das Wischerblatt aufgebracht. Ebenso wird an dieser Stelle, aber normal auf die Scheibe wirkend, die Scheibenanpresskraft aufgebracht. Dies ergibt mit der Hebellänge von 1200 mm ein Moment von 80 Nm. Um einen kompletten Doppelhub zu simulieren, werden zwei Lastschritte erstellt. Im ersten Lastschritt wirkt die Kraft in positive X-Richtung und im zweiten Lastschritt in negative X-Richtung. Die Anpresskraft wirkt konstant in Y-Richtung und wird im gleichen Punkt aufgebracht. In Figure 17 ist mittig

die Aufbringung der externen Kraft und die Verbindungen der Bushing Elemente zu sehen. In Figure 18 ist ein Koordinatensystem eingeblendet.

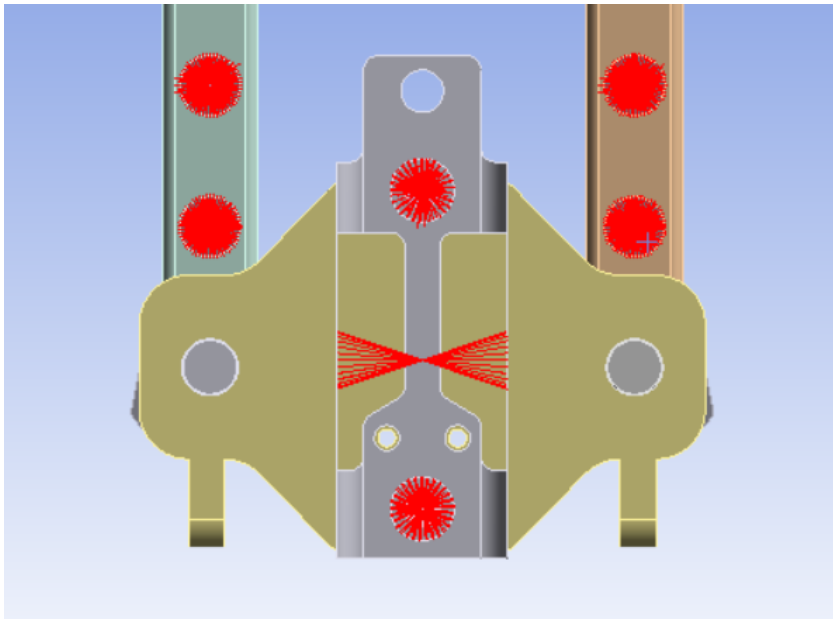


Figure 17 - Externe Kraft (mittig am Gabelstück) und Nietmodellierungen

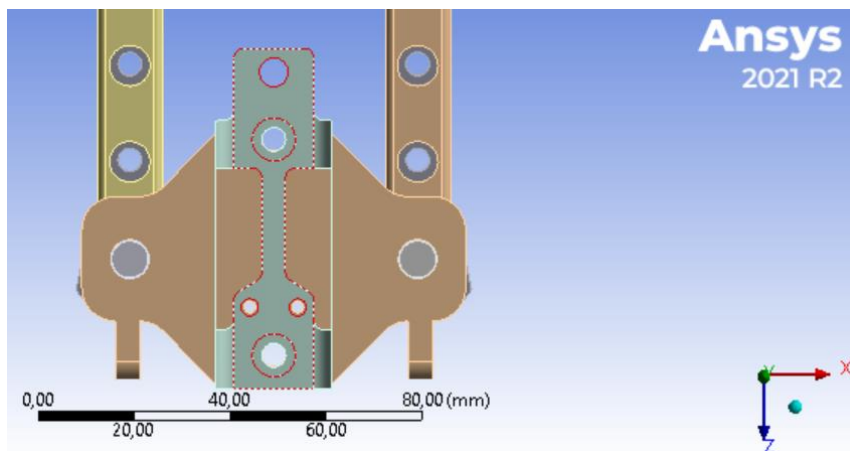


Figure 18 - Baugruppe Wischblattaufnehmer mit Koordinatensystem

Table 6 - Aufgebrachte Lasten

Kraft	Art der Kraft	Reale Belastung	Lastschritt
69 N	Externe Kraft	Antriebsmoment	1
24 N	Externe Kraft	Scheibenanpresskraft	1
24 N	Externe Kraft	Scheibenanpresskraft	2
-69 N	Externe Kraft	Antriebsmoment	2

4.3.2 Randbedingungen

Der Wischerarm wird am antriebsseitigen Ende am Halteblech mittels fixierter Lagerung eingespannt. Die Einspannung erfolgt an der Bohrung für die Hauptgelenksverbindung. Die Gelenksverbindung wird nicht modelliert.

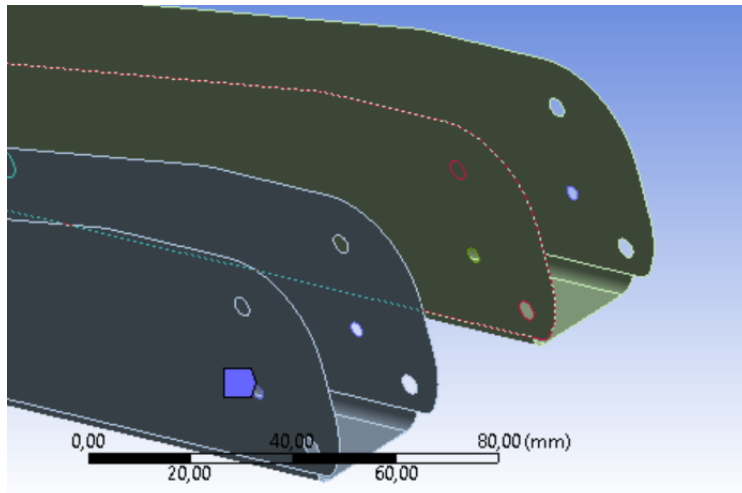


Figure 19 - Fixierte Lagerung

In Figure 19 ist die Lagerung gezeigt. Die beiden Haltebleche sind jeweils an den Kanten der Bohrung (lila markiert) eingespannt. Diese Art der Randbedingung wurde gewählt, da die Belastungen an dieser Stelle in der FE-Analyse nicht beurteilt werden sollen. Durch die Komplexität der tatsächlichen Verbindung (siehe Kapitel 3.3) ist eine realitätsnahe Abbildung in einem FE-Modell sehr aufwendig zu realisieren. Die Festigkeit und Funktionalität dieser Verbindung wird in Prototypentests (siehe Kapitel 8) überprüft bzw. nachgewiesen.

4.4 Vernetzung und Konvergenzstudie

In einer Konvergenzstudie wird die Elementgröße so lange verfeinert, bis die Spannungswerte konvergieren. Dadurch wird eine Elementgröße ermittelt, die ausreichend fein ist, um realistische Ergebnisse zu erhalten. Dabei wird wie folgt vorgegangen: Die Vernetzung erfolgt für die gesamte Baugruppe. An kritischen Stellen an denen hohe Spannungen zu erwarten sind (Bohrungen, hochbelastete Übergänge, Kanten), wird von Anfang an eine feine Vernetzung vorgenommen. An allen anderen Bereichen wird die Elementgröße variiert (siehe Table 7 und Table 8) und zugehörige Spannungs- und Verschiebungskennwerte analysiert.

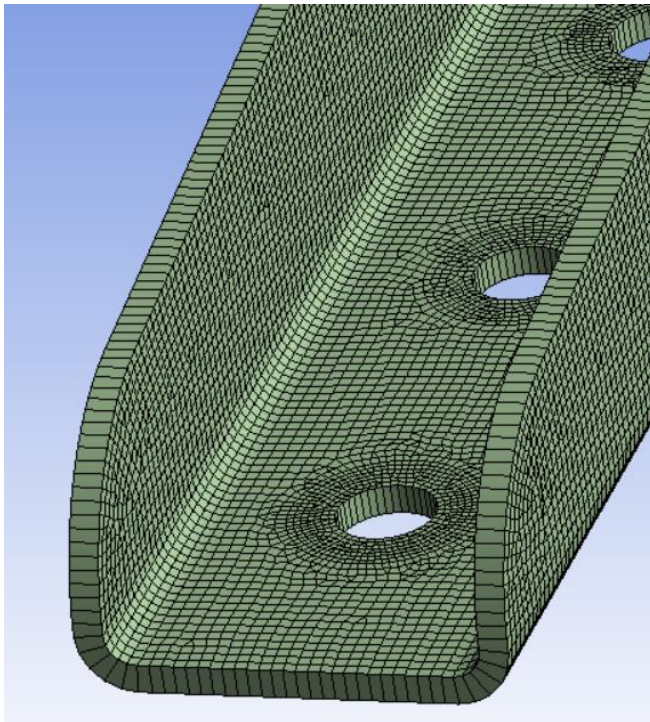


Figure 20 - Vernetzung Halteblech

In Figure 20 ist die Vernetzung des Halteblechs zu erkennen. Im Bereich um die Bohrungen beträgt die Vernetzung 0.5 mm und in den restlichen Bereichen wird die Größe variiert. Sobald die Kennwerte konvergieren und eine weitere Elementverkleinerung keine maßgeblichen Änderungen mehr liefert, ist eine ausreichende Elementgröße ermittelt. Folgende Kennwerte werden ermittelt und verglichen:

- Maximale Vergleichsspannung (von Mises)
- Maximale Gesamtverformung
- Vergleichsspannung (von Mises) an Stelle 1 (SP1)
- Vergleichsspannung (von Mises) an Stelle 2 (SP2)
- Vergleichsspannung (von Mises) an Stelle 3 (SP3)

Die Stellen SP1, SP2 und SP3 wurden in der Nähe von hochbelasteten Stellen an verschiedenen Bauteilen gewählt. Diese Koordinatensysteme wurden koordinatenfest, also knotenunabhängig gewählt. Dies garantiert, dass auch bei Netzveränderung immer an den gleichen Stellen die Spannungen ausgelesen und verglichen werden können.

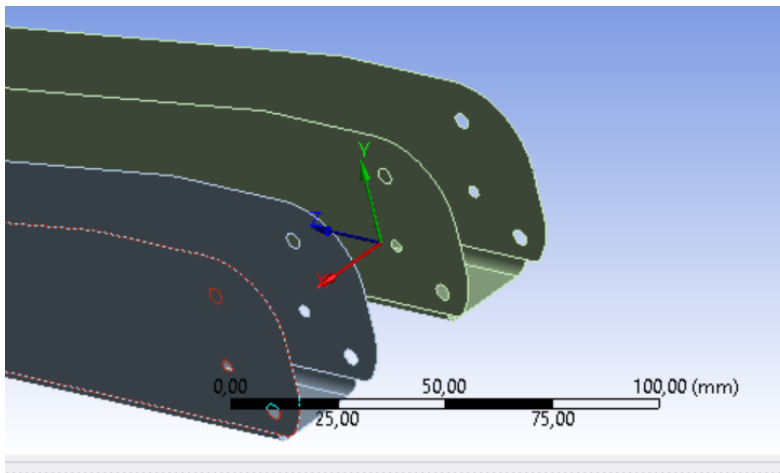


Figure 21 - Koordinatensystem SP1 (KS an linker Seitenfläche des rechten Halteblechs)

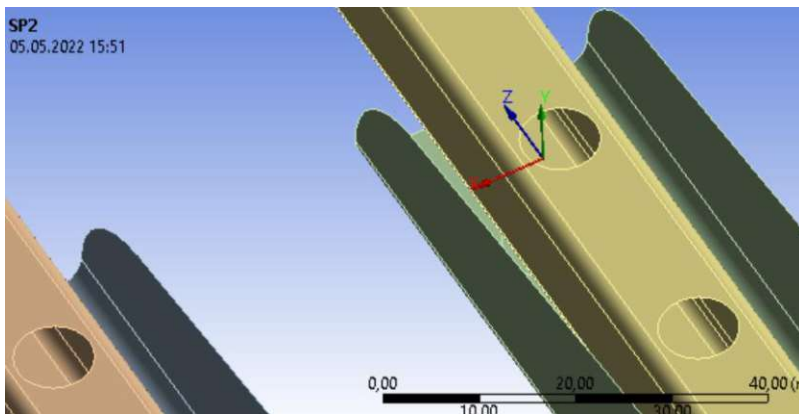


Figure 22 - Koordinatensystem SP2 (im Bereich der Nietverbindung im Rohrinneen)

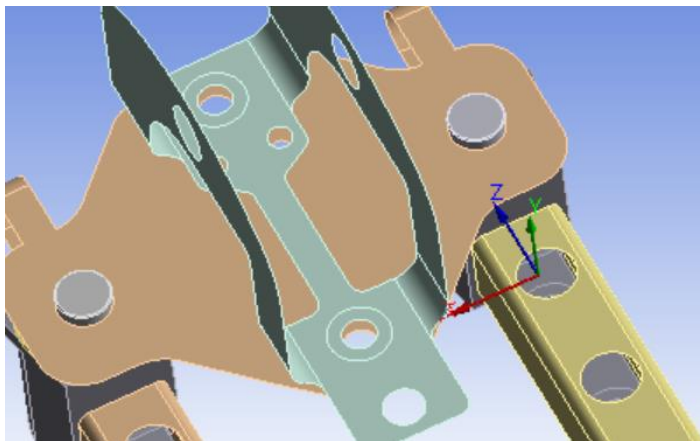


Figure 23 - Koordinatensystem SP3 (im Bereich der Nietverbindung am Verbindungsstück)

In Figure 21, 22 und 23 sind die Koordinatensysteme SP1, SP2 und SP3 abgebildet.

4.4.1 Vernetzung

Table 7 - Netzeinstellungen

Analysotyp	Statisch-mechanisch
Große Verschiebungen	Nein (Linear)
Elementansatzfunktion	programmgesteuert
Adaptive Größe verwenden	Nein
Elementgröße kritische Stellen	0,5 mm

Erläuterungen zu Netzeinstellungen

In Table 7 sind die verwendeten Netzeinstellungen zusammengefasst.

Große Verschiebungen (nicht-lineare Analyse)

Da keine großen Verformungen zu erwarten sind und die Kontakte so gewählt wurden, dass es zu keinen Nicht-Linearitäten kommt, kann von linearem Verhalten ausgegangen werden. Lediglich das Kunststoff-Gleitlager weist nicht-lineares Materialverhalten auf. An diesem Bauteil sind keine großen Belastungen zu erwarten und das Lager ist von untergeordnetem Interesse für die Analyse. Daher wird aus Gründen der Rechenleistung auf nicht lineare Berechnungen verzichtet.

Elementansatzfunktion

Wird die Einstellung „programmgesteuert“ gewählt, trifft *Ansys* selbst die Entscheidung ob Elemente mit linearer oder quadratischer Ansatzfunktion verwendet werden sollen [9].

Adaptive Größe verwenden

Ist die Einstellung „Adaptive Größe verwenden“ ausgeschaltet, so wird die Elementgröße ausschließlich durch die Eingabe von Elementgrößen in verschiedenen Bereichen gesteuert [10]. Dies ist für die Durchführung der Konvergenzstudie nötig, damit die Konvergenz je Elementgröße analysiert werden kann.

4.4.2 Konvergenzstudie

Table 8 - Konvergenzstudie

Netz	Element größe (mm)	Vergleichsspannung (maximal) (MPa)	Verformung (maximal) (mm)	SP1 (MPa)	SP2 (MPa)	SP3 (MPa)
1	5 (1)	524	27	52.9	108	48.7
2	3.5 (1)	516	26.7	50.6	109.7	47.1
3	3 (1)	596	26.9	53	99.7	47.8
4	2.5 (1)	544	26.9	49.7	99.2	48.3
5	2 (1)	571	26.6	52.1	97.9	48
6	1.5 (1)	619	26.5	51.9	98	48.3
7	1.2 (1)	603	26.5	52	98.2	48.6
8	1 (1)	666	26.4	51.8	99.6	48.9
9	0.8*	Keine Lösung möglich**				
10	0.5*	Keine Lösung möglich**				

*ohne Elementanpassung an kritischen Stellen

** Für diese Berechnungen kam es zu RAM-Problemen auf der verwendeten Hardware

Table 9 - Konvergenzstudie

Netz	Element größe (mm)	Vergleichsspannung (maximal) (MPa)	Verformung (maximal) (mm)	SP1 (MPa)	SP2 (MPa)	SP3 (MPa)
11	2 (0.5)	638	26.6	50.5	98.2	49.2
12	1.5 (0.5)	665	26.6	51	97.7	49
13	1.2 (0.5)	674	26.6	51.4	97.4	49.2
14	1 (0.5)	680.4	26.5	52	97.5	49.4
15	0.9 (0.5)	714	26.5	51.5	97.8	49.3

In Table 8 und 9 sind die Einstellungen der Konvergenzanalyse dargestellt. In der Spalte Elementgröße ist die jeweilige Elementgröße angegeben, wobei die in Klammer angegebenen Werte der Elementgröße an den kritischen Stellen entspricht.

4.4.3 Auswertung und Interpretation Konvergenzstudie

Der Ort der maximalen Vergleichsspannung befindet sich an der Stelle der Einspannung am Halteblech. Die Randbedingung an den Lochkanten verursacht Singularitäten, das heißt, dass die Spannung an diesen Stellen, je feiner das Netz wird, gegen unendlich streben wird. Dies lässt sich auch gut in Table 8 (Spalte Vergleichsspannung maximal) erkennen. An den anderen Auswertungsstellen (SP1,

SP2, SP3) schwanken die Ergebnisse der Vergleichsspannung im 1-Prozent-Bereich. Es zeigen sich klar konvergierende Spannungs- und Verformungswerte. Unter einer Elementgröße von 1 mm, bei Elementgröße von 0.5 mm in kritischen Bereichen, verlängert sich die Berechnungsdauer deutlich. Die Berechnungen wurden auf zwei verschiedenen Endgeräten durchgeführt, da auf dem ersten Gerät (16 GB RAM) für die Berechnung mit Netz 15 zu wenig Arbeitsspeicher verfügbar war. Aufgrund der ausreichenden Konvergenz und der geringeren Rechendauer wird das Netz 14 für die FE-Analysen verwendet.

4.4.4 Singularitäten

Im Sinne der Finiten-Elemente-Analyse spricht man von einer Singularität, sobald an einer Stelle die Spannungswerte gegen unendlich streben, je weiter das Netz verfeinert wird. An solch einer Stelle kommt es zwar zu unrealistischen Spannungsspitzen, allerdings sind diese Stellen meist auch in der Realität kritische Stellen. Typischerweise treten Singularitäten an Einspannungen, großen Steifigkeitssprüngen und Lasteinleitungsstellen auf [11]. In diesem FE-Modell tritt eine Singularität an der Einspannung auf. Zudem kommt es, hervorgerufen durch sehr hohe Steifigkeitsgradienten an den Nietmodellierungen, in einzelnen Knoten zu unrealistisch hohen Spannungsspitzen.

4.5 Analyse

4.5.1 Beurteilung der Spannungen und Verformungen

Generell lässt sich sagen, dass alle kritischen beziehungsweise hochbelasteten Bereiche des Wischerarmes sich am antriebsseitigen Ende befinden. Dies ist zu erwarten, da dort die höchsten Biegemomente auftreten. Hochbelastet sind die Rohre sowie die Haltebleche, wohingegen das Verbindungsstück, Gabelstück sowie das Blech Wischblattaufnehmer keine hohen Spannungen ausgesetzt sind. Die Gesamtverformung beträgt 26.5 mm und liegt im erwarteten Bereich. Im folgenden Absatz wird erklärt, welche Stellen in Kapitel 6 genauer betrachtet werden sollen und als Nachweisstellen für den Dauerfestigkeitsnachweis nach FKM herangezogen werden.

Halteblech

Im Falle des Halteblechs soll der Übergangsbereich des hochbelasteten ersten Niets (Scheibenseitig) betrachtet werden. Die Singularität an der fixierten Lagerung wird nicht betrachtet. Da auch in Knoten im Bereich großer Steifigkeitssprünge, wie es bei dieser Nietmodellierung der Fall ist, extreme Spannungsspitzen auftreten können, wird die Spannungsstichprobe am höchstbelasteten Nachbarknoten genommen. Die Stelle ist in Figure 24 in der linken Bildhälfte zu erkennen.



Figure 24 - Vergleichsspannung Halteblech

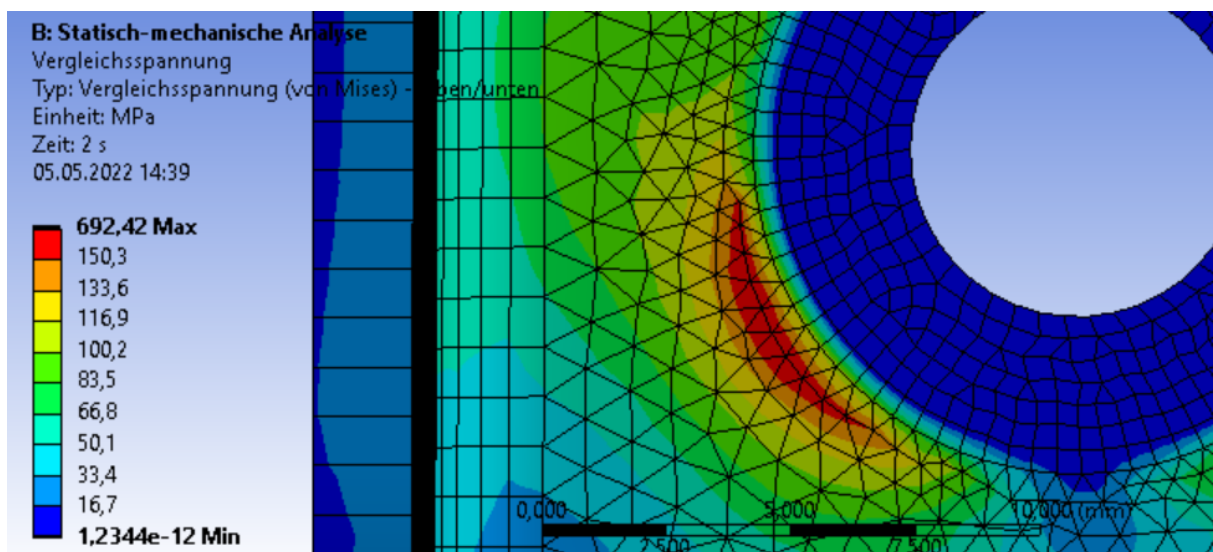


Figure 25 - Detailausschnitt Vergleichsspannung Halteblech

In Figure 25 ist die kritische Stelle detaillierter dargestellt. Die Abbildung zeigt den Bereich um die linke Bohrung aus Figure 24, um den die größten Spannungen, abgesehen von der Einspannstelle, auftreten.

Rohr

Auch im Bereich des Rohres wird auf der Rohrinneenseite der Übergangsbereich der ersten Nietverbindung betrachtet. In Figure 26 ist diese Stelle dargestellt und mit „Max“ gekennzeichnet.

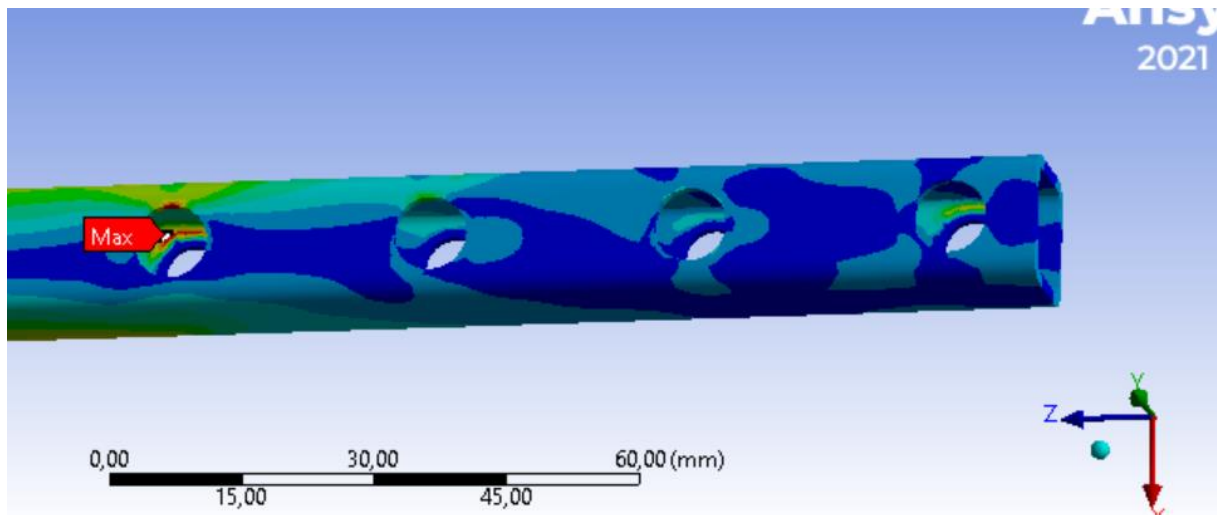


Figure 26 - Vergleichsspannung Rohr

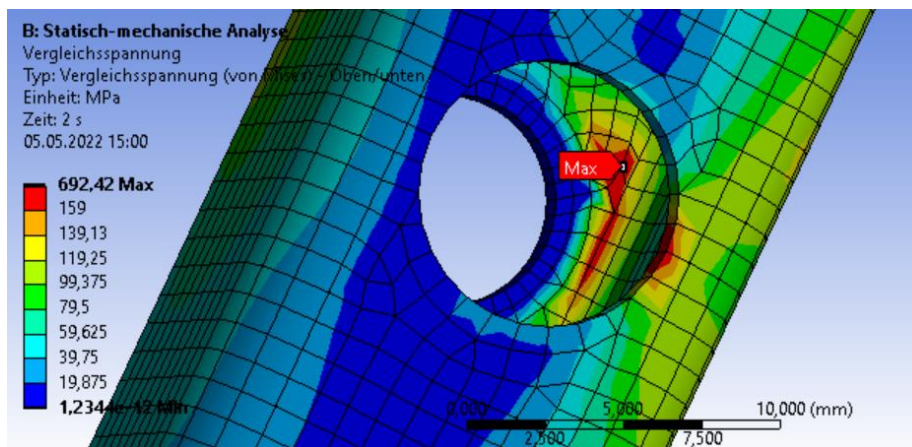


Figure 27 - Detailausschnitt Vergleichsspannung Rohr

In Figure 27 ist die kritische Stelle des Rohres genauer dargestellt.

Verbindungsstück

Die Nachweisstelle des Verbindungsstücks ist in Figure 28 dargestellt und mit „Max“ gekennzeichnet.

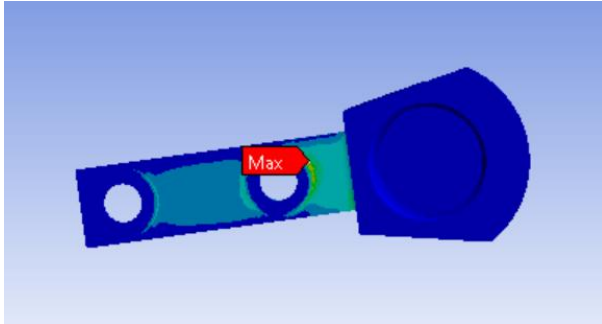


Figure 28 - Vergleichsspannungen Verbindungsstück

Blech Wischblattaufnehmer

In Figure 29 ist die Spannungsverteilung des Blechs dargestellt. Die Nachweisstelle ist mit „Max“ gekennzeichnet.

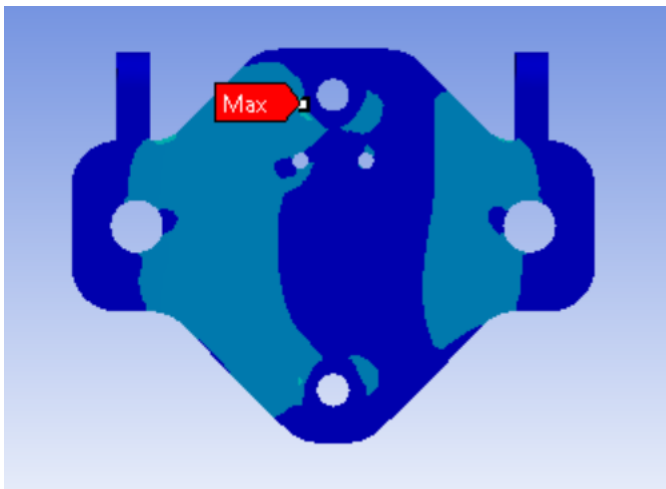


Figure 29 - Vergleichsspannung Blech Wischblattaufnehmer

Gabelstück

In Figure 30 ist die Spannungsverteilung am Gabelstück dargestellt. Die Nachweisstelle ist mit „Max“ gekennzeichnet.

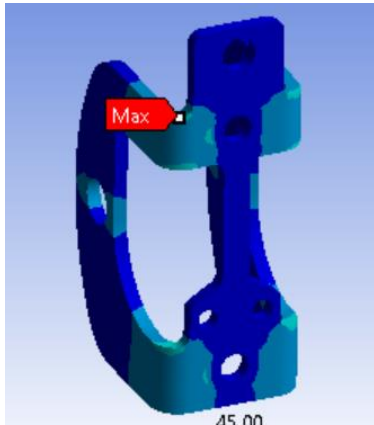


Figure 30 - Vergleichsspannung Gabelstück

4.5.2 Kennwerte Festigkeitsnachweis

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der FE-Analyse zusammengefasst. Dabei werden für jedes Bauteil, für das ein FKM-Nachweis geführt wird, folgende Kennwerte ausgelesen beziehungsweise ermittelt:

- Von-Mises Vergleichsspannung
- Spannungsamplitude 1. Hauptspannung
- Mittelwert 1. Hauptspannung
- Spannungsamplitude 2. Hauptspannung
- Mittelwert 2. Hauptspannung
- A90-Fläche (Hochbeanspruchte Fläche nach Sonsino)
- Bezogenes Spannungsgefälle je Hauptspannungsrichtung

Die A90-Fläche sowie die bezogenen Spannungsgefälle werden für die Ermittlung von Teilfaktoren für den FKM-Nachweis benötigt.

Hochbeanspruchte Fläche nach Sonsino

Die hochbeanspruchte Fläche ist ein Kennwert, der für den Nachweis der Dauerfestigkeit benötigt wird. Dabei handelt es sich um jene Bauteiloberfläche, auf der die Spannungsspitze der Nachweisstelle, auf der die Spannung mindestens 90% der Spannung der Nachweisstelle beträgt [10]. Die Ermittlung dieser Fläche in *Ansys* wird in Kapitel 4.5.3 aufgezeigt.

Bezogenes Spannungsgefälle

Das bezogene Spannungsgefälle wird für die Berechnung der Stützzahlen in der FKM-Richtlinie benötigt. Dieser Kennwert gibt den Spannungsgradienten ausgehend von der kritischen Nachweisstelle an [10].

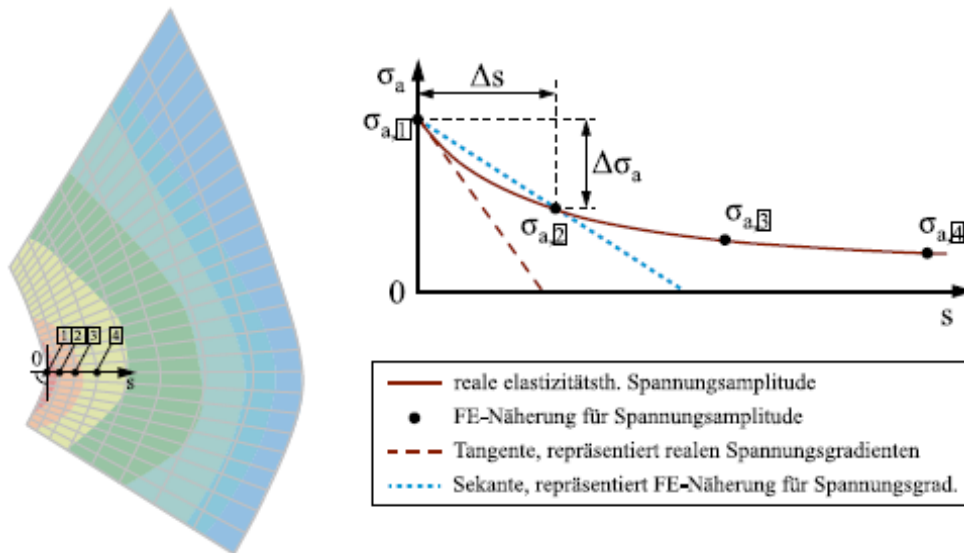


Figure 31 - Bezogenes Spannungsgefälle [10]

In Figure 31 ist die Definition des realen Spannungsgradienten (rote gestrichelte Linie) sowie die FE-Näherung (blaue gestrichelte Linie) zu sehen. In Kapitel 4.5.3 wird gezeigt, wie der Spannungsgradient in *Ansys* ermittelt werden kann. Um den Spannungsgradienten ermitteln zu können, werden die Werte der Spannungsamplitude der ersten und zweiten Hauptspannung in einem festgelegten Abstand Δs , ausgehend von der Nachweisstelle, benötigt. Die Vorgehensweise zur Ermittlung dieser Kennwerte wird in Kapitel 4.5.3 beschrieben und deckt sich mit der Vorgehensweise aus dem Buch „Angewandter Festigkeitsnachweis nach FKM-Richtlinie“ von Wächter, Müller und Esderts [10].

4.5.3 Halteblech

Der Wert σ_{a11} entspricht der Spannungsamplitude der ersten Hauptspannung an der Stelle 1, wobei die Stelle 1 dem Knoten der Spannungsstichprobe entspricht. σ_{a12} ist der Wert der Spannungsamplitude der ersten Hauptspannung im Abstand Δs (Normal zur Bauteiloberfläche) in das Bauteilinnere hinein. Das Auslesen dieser Spannungskennwerte erfolgt in *Ansys* mittels der Funktion *Pfad erstellen*.

Table 10 - Kennwerte für FKM - Halbleblech

Von-Mises Vergleichsspannung (max.)	167 MPa
Hochbeanspruchte Fläche (nach Sonsino)	20 mm ²
σ_{a11}	-184,35 MPa
σ_{a12}	-184,35 MPa
σ_{a21}	0 MPa
σ_{a22}	0 MPa

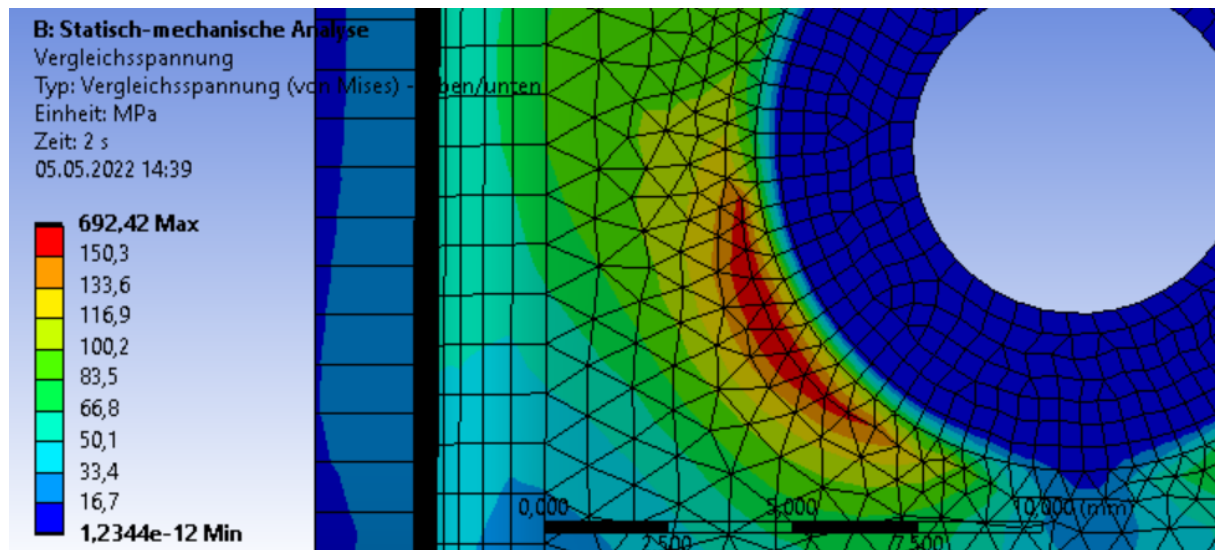


Figure 32 - hochbeanspruchte Fläche Halbleblech

An dieser Stelle soll die Vorgehensweise zur Ermittlung der hochbeanspruchten Fläche dargelegt werden. Laut Definition entspricht die hochbeanspruchte Fläche jener Fläche rund um die Spannungsspitze, auf der die Spannungswerte noch mindestens 90 Prozent des maximalen Spannungswertes betragen [10]. Daher wurde der Wert der Spannungsspitze, im Falle des Halbleblechs 167 MPa, mit 0.9 multipliziert und jene Fläche an denen die Spannung zwischen 167 MPa und 150.3 MPa beträgt, wurde anschließend rot eingefärbt. Im Anschluss kann durch die Elementgröße und den eingeblendeten Maßstab die rote Fläche abgeschätzt werden.

4.5.4 Rohr

Table 11 - Kennwerte für FKM - Rohr

Von-Mises Vergleichsspannung (zeitbezogener Höchstwert an Auswertestelle)	177 MPa
Hochbeanspruchte Fläche (nach Sonsino)	7 mm ²
σ_{a11}	-156,4 MPa
σ_{a12}	-156,4 MPa
σ_{a21}	0 MPa
σ_{a22}	0 MPa

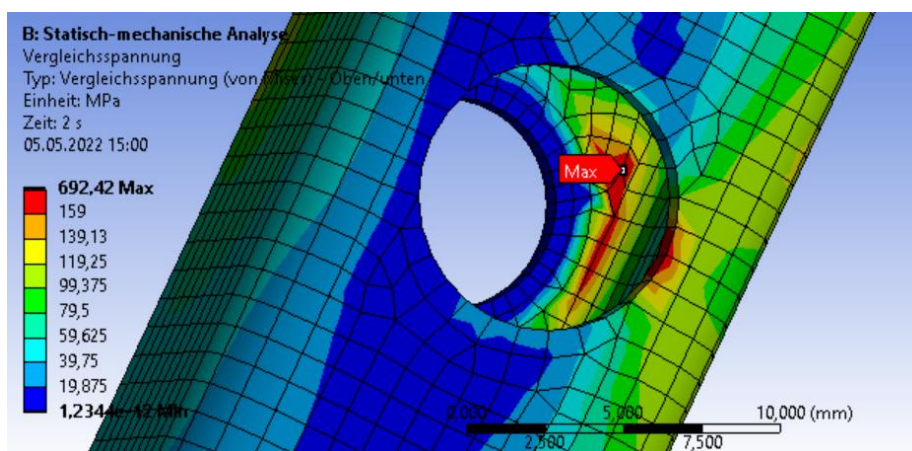


Figure 33 - hochbeanspruchte Fläche - Rohr

4.5.5 Verbindungsstück

Table 12 - Kennwerte für FKM Verbindungsstück

Von-Mises Vergleichsspannung (max.)	110 MPa
Hochbeanspruchte Fläche (nach Sonsino)	2 mm ²
σ_{a11}	-99 MPa
σ_{a12}	-89 MPa
σ_{a21}	16 MPa
σ_{a22}	12 MPa

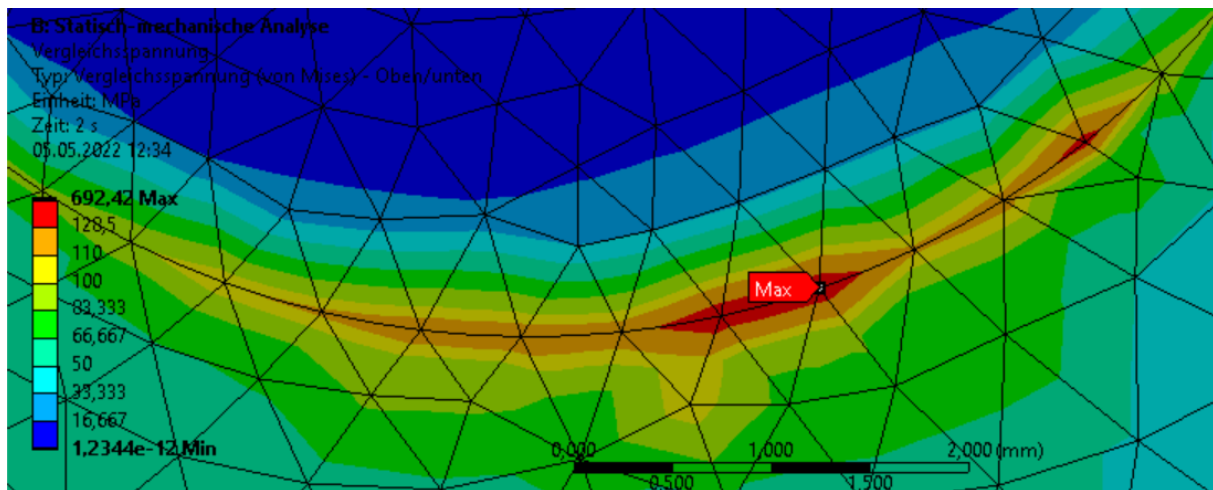


Figure 34 - hochbeanspruchte Fläche Verbindungsstück

4.5.6 Blech Wischblattaufnehmer

Table 13 - Kennwerte für FKM Blech Wischblattaufnehmer

Von-Mises Vergleichsspannung (max.)	49 MPa
Hochbeanspruchte Fläche (nach Sonsino)	5 mm ²
σ_{a11}	-40 MPa
σ_{a12}	-54 MPa
σ_{a21}	-6.2 MPa
σ_{a22}	-2.7 MPa

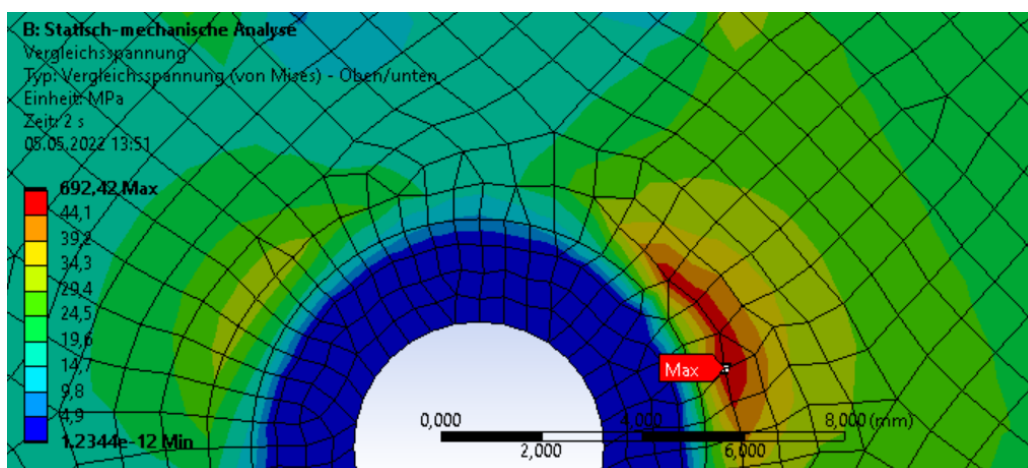


Figure 35 - hochbeanspruchte Fläche Blech Wischblattaufnehmer

4.5.7 Gabelstück

Table 14 - Kennwerte für FKM Gabelstück

Von-Mises Vergleichsspannung (max.)	59 MPa
Hochbeanspruchte Fläche (nach Sonsino)	1 mm ²
σ_{a11}	33,6 MPa
σ_{a12}	33,7 MPa
σ_{a21}	1,01 MPa
σ_{a22}	1,015 MPa

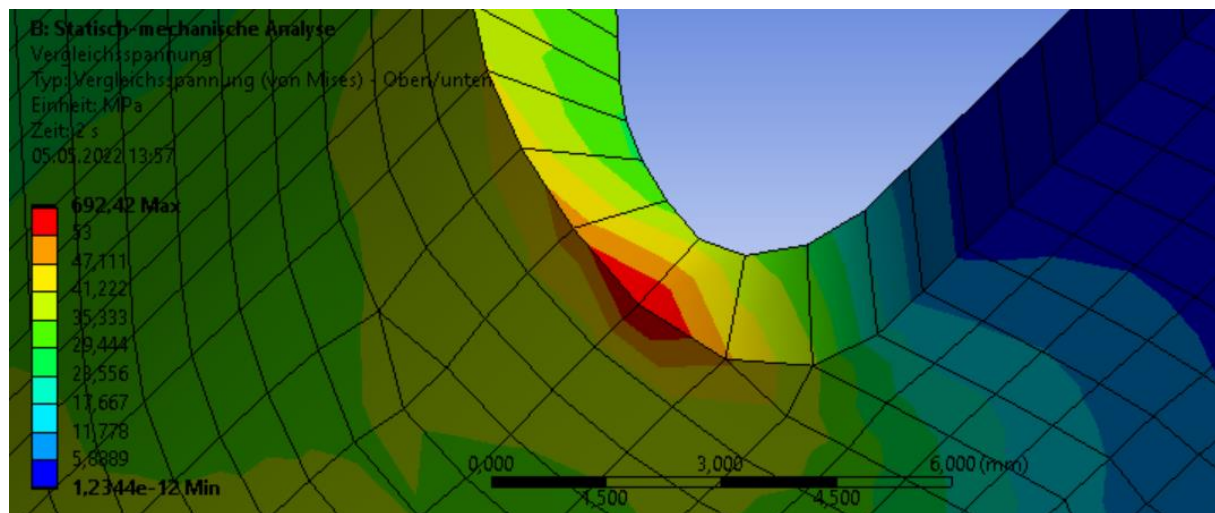


Figure 36 - hochbeanspruchte Fläche Gabelstück

5 Festigkeit Nietverbindungen

Da in der Finiten-Elemente-Berechnung am Übergang einer durch Bushing-Elemente modellierte Nietverbindung singuläre Stellen auftreten, ist eine sinnvolle Spannungsauswertung dort nicht möglich. Um dennoch eine Bewertung dieser dynamisch belasteten Verbindungen durchführen zu können, werden die Verbindungen nach DIN 15018-1 (Betriebsfestigkeitsnachweis für Krantragwerke) und Roloff/Matek [12] nachgerechnet. An jeder der Nietverbindungen wird jeweils der höchstbelastete Niet berücksichtigt. Die Verweise in den Klammern neben den Formeln beziehen sich in den Kapiteln 5.1 bis 5.2 auf das Buch *Maschinenelemente* von Roloff/Matek [12].

5.1 Nietverbindung Halteblech – Rohr

5.1.1 vorhandene Spannung

Die vorhandene Abscherspannung sowie die vorhandene Lochleibungsspannung ergeben sich zu:

$$\tau_a := \frac{F}{m \cdot n \cdot A_0} = 9.33 \text{ MPa} \quad (7.10)$$

$$\sigma_l := \frac{F}{n \cdot d_0 \cdot t_{\min}} = 28.212 \text{ MPa} \quad (7.11)$$

Die Kraft F setzt sich aus der X- und Y-Komponente aus der Verbindungsstichprobe zusammen und wird anschließend mit einem Faktor, welcher die dynamische Belastung berücksichtigt, multipliziert.

$$F_v := \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = 225.694 \text{ N}$$

$$K_A := 1.2 \text{ (TB 3-4C)}$$

$$F := F_v \cdot K_A = 270.833 \text{ N}$$

Weiters fließt die Schnittigkeit m und die Anzahl der kraftübertragenden Niete n ein.

$$n := 1$$

$$m := 1$$

Die Querschnittsfläche des Niets entspricht einem Kreisring:

$$d_0 := 6.4 \text{ mm}$$

$$d_1 := 2 \text{ mm}$$

$$A_0 := \pi \cdot \frac{d_0^2 - d_1^2}{4} = 2.903 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

5.1.2 zulässige Spannung

Nach Roloff/Matek TB 7-5 und DIN 15018-1 ergeben sich für den Betriebsfestigkeitsnachweis dynamisch beanspruchter Bauteile und wechselnde Beanspruchung für einschnittige Verbindungen die zulässigen Spannungen zu:

$$\sigma_{1\text{zul}} := 1.5 \cdot \sigma_{W\text{zul}} = 126 \text{ MPa}$$

$$\tau_{a\text{zul}} := 0.8 \cdot \sigma_{W\text{zul}} = 67.2 \text{ MPa}$$

Für die zulässigen Wechsellastspannungen werden die Werte für gelochte Bauteile aus S235 (TB 7-5) verwendet. Unter Berücksichtigung der Häufigkeit der Höchstlast (ständig) sowie einer Anzahl an vorgesehenen Spannungsspielen von über $2 \cdot 10^6$ lässt sich folgende zulässige Wechsellastspannung auslesen:

$$\sigma_{W\text{zul}} := 84 \text{ MPa}$$

5.1.3 Bewertung

Der Festigkeitsnachweis ist erbracht.

5.2 Nietverbindung Rohr – Verbindungsstück

5.2.1 Vorhandene Spannung

$$F_x := -40 \text{ N}$$

$$F_y := 12 \text{ N}$$

$$F_v := \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = 41.76 \text{ N}$$

$$\tau_a := \frac{F}{m \cdot n \cdot A_0} = 3.351 \text{ MPa}$$

$$\sigma_1 := \frac{F}{n \cdot d_0 \cdot t_{\min}} = 6.96 \text{ MPa}$$

$$n := 1$$

$$m := 1$$

$$d_0 := 4.8 \text{ mm}$$

$$t_{\min} := 1.5 \text{ mm}$$

$$d_1 := 2 \text{ mm}$$

$$A_0 := \pi \cdot \frac{d_0^2 - d_1^2}{4} = 1.495 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

5.2.2 Ertragbare Spannung

$$\sigma_{Wzul} := 84 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{1zul} := 1.5 \cdot \sigma_{Wzul} = 126 \text{ MPa}$$

$$\tau_{aZul} := 0.8 \cdot \sigma_{Wzul} = 67.2 \text{ MPa}$$

5.2.3 Bewertung

Der Festigkeitsnachweis ist erbracht.

6 Rechnerischer Festigkeitsnachweis

6.1 FKM-Richtlinie

Der „Rechnerische Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“, kurz FKM-Richtlinie, wird vom Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM) herausgegeben. Die Richtlinie erlaubt den rechnerischen statischen und Ermüdungsfestigkeitsnachweis für allgemeine Maschinenbauteile aus Eisen- und Aluminiumwerkstoffen. Der Nachweis kann für Bauteile mit geometrischen Kerben und Schweißverbindungen durchgeführt werden. [13]

Grundlage für den rechnerischen Nachweis sind die Spannungswerte aus der FE-Berechnung. Für die neuen Bauteile des Wischerarmes soll die Dauerfestigkeit mit örtlichen Spannungen rechnerisch nachgewiesen werden. Dabei werden folgende Bauteile betrachtet:

- Rohr
- Halteblech
- Verbindungsstück
- Blech Wischblattaufnehmer
- Gabelstück

Welche Stellen für den Nachweis herangezogen werden, wird auf Basis der FE-Ergebnisse entschieden. Als kritische Stelle wird der Ort der höchsten Von-Mises-Vergleichsspannung herangezogen. Sollte es sich an einem Bauteil dabei um eine Singularität oder Spannungsspitze, hervorgerufen durch Einspannungen oder anderen vereinfachten Modellierungen, handeln, wird eine Spannungsstichprobe an den höchstbelasteten Nachbarknoten ausgewertet. Es wird der statische Festigkeitsnachweis sowie der Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen durchgeführt. Der statische Festigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen erfolgt nach FKM, 7. Auflage 2020, Kapitel 3 und der Ermüdungsfestigkeitsnachweis nach FKM, 7. Auflage 2020, Kapitel 4. Die in den folgenden Kapiteln 6.2.1 bis 6.2.5 verwendeten Formeln, Faktoren und Kennwerte stammen aus dieser Richtlinie. Die Bezeichnung beziehungsweise Nummerierung der Formeln, Kennwerte und anderen Größen stimmen mit jener Auflage der FKM-Richtlinie überein und können dort nachgeschlagen werden. Da eine genaue Erklärung

der Vorgehensweise und der Faktoren den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde und nicht zielführend ist, beschränken sich die Erläuterungen auf das Wesentliche. Weitere Erklärungen und Darlegungen können aus der Richtlinie entnommen werden. Die Unterteilung der folgenden Unterkapitel ist an die Vorgehensweise der FKM-Richtlinie angepasst. Weiters gilt es zu erwähnen, dass für manche Einflussfaktoren in gewissen Fällen, etwa die plastische Formzahl K_p oder der Kerbeinflussfaktor K_f , aufwendige FE-Berechnungen, zum Beispiel nichtlineare Vergleichsrechnungen, nötig wären. In diesen Fällen wurden für jene Faktoren zuerst die ungünstigsten bzw. konservativsten Werte angenommen. Wenn mit diesen konservativen Annahmen der Nachweis erbracht werden kann, ist eine genaue Ermittlung dieser Faktoren nicht weiter notwendig. In Kapitel 6.2.1 wird die Vorgehensweise anhand des Nachweises für das Rohr dokumentiert und kommentiert. Da die Vorgehensweise für die weiteren Bauteile analog ist, werden in den darauffolgenden Nachweisen lediglich die wichtigsten Formeln und Faktoren ohne weitere Kommentare dargelegt.

6.2 Nachweis

6.2.1 Nachweis Rohr

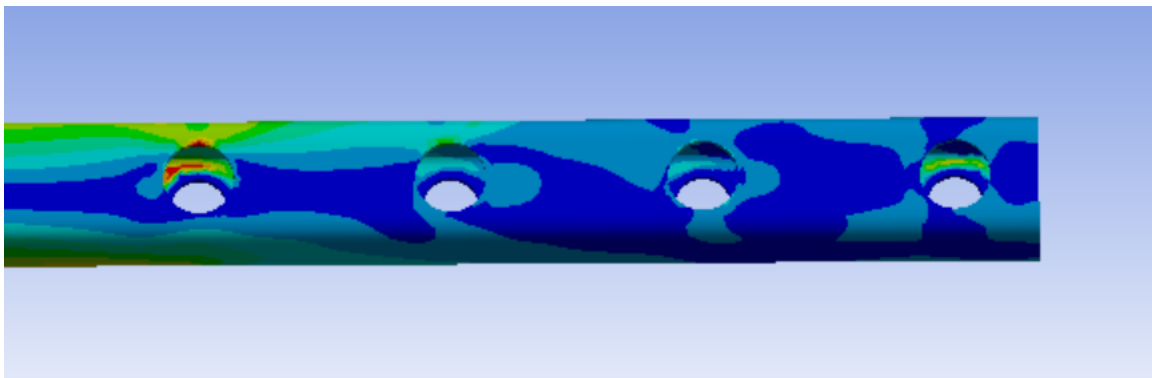


Figure 37 - Von-Mises Vergleichsspannung Rohr

In Figure 37 ist das antriebsseitige Ende des Rohres dargestellt. Die Nachweisstelle befindet sich an der ersten Bohrung (links) im roten Bereich.

Statischer Festigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen

Spannungskennwerte (nach FKM, Kapitel 3.1 [13])

Für den statischen Festigkeitsnachweis mit örtlicher Spannung ist der maßgebliche Spannungskennwert die maximale Von-Mises-Vergleichsspannung. Diese kann direkt aus der FE-Analyse ausgelesen werden (siehe Kapitel 4.5.4).

$$\sigma_{\text{Mises}} := 177 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Werkstoffkennwerte (nach FKM, Kapitel 3.2 [13])

Die Werkstoffnormwerte für den Werkstoff X5CrNi18-10 werden aus der FKM-Richtlinie, Kapitel 5.1 entnommen.

$$R_{mN} := 520 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad R_{pN} := 220 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$R_m := K_{dm} \cdot K_A \cdot R_{mN} = 520 \text{ MPa} \quad (3.2.1)$$

$$R_p := K_{dp} \cdot K_A \cdot R_{pN} = 220 \text{ MPa} \quad (3.2.1)$$

Die technologischen Größenfaktoren und der Anisotropiefaktor K_A weisen für nichtrostenden Stahl folgende Werte auf:

Table 15 - Faktoren Bauteil-Normwerte

Faktor	Wert	FKM-Richtlinie
K_{dm}	1	3.2.6
K_{dp}	1	3.2.6
K_{dA}	1	3.2.6
K_A	1	3.2.6

Konstruktionskennwerte (nach FKM, Kapitel 3.3 [13])

Durch die plastische Stützzahl n_{pl} wird der Einfluss der Spannungsverteilung auf die statische Bauteilfestigkeit infolge der Bauteilform und Belastung berücksichtigt. Die plastische Stützzahl n_{pl} ergibt sich zu:

$$f_R := 0.5 \left(1 + \frac{R_m}{R_p} \right) = 1.682 \quad (3.3.3)$$

$$n_{pl} := f_R \cdot K_p = 2.085 \quad (3.3.1)$$

Der Verfestigungsfaktor f_R berücksichtigt, dass bei duktilen Werkstoffen zur Berechnung der vollplastischen Ersatztragkraft eine erhöhte Fließgrenze herangezogen werden kann. Durch die plastische Formzahl K_P ist das Verhältnis zwischen der vollplastischen und der elastischen Traglast und beschreibt somit die Tragreserve eines Bauteiles bis zum Erreichen der vollplastischen Traglast. Im Falle des Rohres kann ein Ersatzquerschnitt zur Ermittlung der plastischen Formzahl herangezogen werden.

$$K_{pb} := 1.5 \cdot \frac{\left[1 - \left(\frac{b}{B} \right) \cdot \left(\frac{h}{H} \right)^2 \right]}{1 - \left(\frac{b}{B} \right) \cdot \left(\frac{h}{H} \right)^3} = 1.24 \quad (\text{Tab 1.3.2})$$

$$K_{tb} := 1$$

$$K_P := K_{pb} \cdot K_{tb} = 1.24 \quad (\text{Tab 1.3.2})$$

Bauteilfestigkeit (nach FKM, Kapitel 3.4 [13])

Die statische Bauteilfestigkeit ergibt sich für nichtgeschweißte Bauteile zu:

$$\sigma_{sk} := R_p \cdot n_{pl} = 4.587 \times 10^8 \text{ Pa} \quad (3.4.1)$$

Sicherheitsfaktoren

Für den Nachweis müssen geeignete Sicherheitsfaktoren festgelegt werden.

Table 16 - Faktoren Sicherheit

Faktor	Wert	FKM-Richtlinie
j_p	1.3	3.5.1
j_s	1	3.5.1
j_g	1	3.5.1

Der Lastfaktor j_s beschreibt die Sicherheit der Lastannahme. Wenn der Lastfall sicher angenommen werden kann, erhält dieser Faktor den Wert Eins. Der Grundsicherheitsfaktor J_p ist aus Tabelle 3.5.1 zu entnehmen und berücksichtigt die Schadensfolgen sowie die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Spannung. J_g ist ein zusätzlicher Teilsicherheitsfaktor, der nur bei Gussbauteilen einen Wert ungleich Eins

annimmt. Der Gesamtsicherheitsfaktor setzt sich aus den Teilsicherheitsfaktoren J_p , J_s und J_g zusammen und lautet:

$$j_{ges} := j_s \cdot \left(j_g \cdot \frac{j_p}{K_{Ttp}} \right) = 1.3 \quad (3.5.4)$$

Nachweis (nach FKM, Kapitel 3.6 [13])

Der Vergleichssicherheitsfaktor wird folgendermaßen berechnet und gibt den statischen Auslastungsgrad an:

$$a_{sk} := \frac{\frac{\sigma_{Mises}}{\sigma_{sk}}}{j_{ges}} = 0.502 \quad (3.6.1)$$

Der statische Auslastungsgrad beträgt 50.2% und der statische Nachweis ist somit erbracht!

Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen

Spannungskennwerte (nach FKM, Kapitel 4.1 [13])

Für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen werden die Amplituden und Mittelwerte der Hauptspannungen im kritischen Punkt herangezogen. Die Spannungsamplituden, Mittelwerte und Maximalwerte ergeben sich aus der FE-Analyse und besitzen folgende Werte:

Table 17 - Spannungskennwerte Rohr

Spannungskomponente	Wert
1.Hauptspannung Amplitude	165.1 MPa
1.Hauptspannung Mittelwert	8.7 MPa
2.Hauptspannung Amplitude	7.69 MPa
2.Hauptspannung Mittelwert	-14.49 MPa

Die Spannungsverhältnisse lauten:

$$R_1 := \frac{\sigma_{1m} - \sigma_{1a}}{\sigma_{1m} + \sigma_{1a}} = -0.9 \quad R_2 := \frac{\sigma_{2m} - \sigma_{2a}}{\sigma_{2m} + \sigma_{2a}} = 3.262 \quad (4.1.1)$$

Werkstoffkennwerte (nach FKM, Kapitel 4.2 [13])

Die Werte der Werkstofffestigkeit können im Abschnitt Statischer Nachweis nachgesehen werden. Zusätzlich wird für den Ermüdungsnachweis die Bauteilwechselfestigkeit für Zug/Druck benötigt.

Table 18 - Faktoren Werkstofffestigkeit

Faktor	Wert	FKM-Richtlinie
$f_{W\sigma}$	0.4	Tab 4.2.1

$$\sigma_{Wzd} := f_{W\sigma} \cdot R_m = 208 \text{ MPa} \quad (4.21)$$

σ_{Wzd} ist die Werkstoff-Wechselfestigkeit für Zug-Druck Belastungen.

Konstruktionskennwerte (nach FKM, Kapitel 4.3 [13])

Für die Berechnung der plastischen Stützzahl n_σ wird der Rechengang „Werkstoffmechanisch begründete Stützzahl“ angewendet. Die Stützzahl setzt sich zusammen aus der statistischen Stützzahl n_{st} , der verformungsmechanischen Stützzahl n_{vm} und der bruchmechanischen Stützzahl n_{bm} .

$$n_{\sigma 1} := n_{st} \cdot n_{vm} \cdot n_{bm1} = 1.176 \quad (4.3.10)$$

$$n_{\sigma 2} := n_{st} \cdot n_{vm} \cdot n_{bm2} = 1.176 \quad (4.3.10)$$

Die Berechnung der Stützzahlen erfolgt nach Kapitel 4.3.1.3.2.

Table 19 - Faktoren Stützzahl

Beschreibung	Faktoren	Wert	FKM-Richtlinie
Referenzoberfläche	A_{Ref}	500 mm ²	4.3.12
Bez. Spannungsgefälle 1.Hauptspannung	G_1	0 [1/m]	
Bez. Spannungsgefälle 2.Hauptspannung	G_2	0 [1/m]	
Weibull-Exponent	k_{st}	30	Tab 4.3.3
Beiwert Verformungsmechanische Stützzahl	n	0.15	4.3.14
Dauerfest ertragbare wechselplastische Dehnung	E_{pl}	$2 \cdot 10^{-4}$	4.3.14
Referenzzugfestigkeit Bruchmechanische Stützzahl	R_{mbm}	680 MPa	Tab 4.3.4

$$n_{st} := \left(\frac{A_{ref}}{A_{\sigma}} \right)^{\frac{1}{k_{st}}} = 1.143 \quad (4.3.11)$$

$$n_{vm} := \sqrt[1 + E \cdot \varepsilon_{pl} \cdot \frac{n_{st}^{\frac{1}{n-1}}}{\sigma_{Wzd}}]} = 1.074 \quad (4.3.14)$$

$$n_{bm1} := \frac{(5 + \sqrt{G_1 \cdot mm})}{5 \cdot n_{vm} \cdot n_{st} + \frac{R_m}{R_{mbm}} \cdot \frac{\sqrt{(7.5 + \sqrt{G_1 \cdot mm})}}{\sqrt{1 + 0.2 \cdot \sqrt{G_1 \cdot mm}}}} = 0.682 \quad (4.3.16)$$

$$n_{bm2} := \frac{(5 + \sqrt{G_2 \cdot mm})}{5 \cdot n_{vm} \cdot n_{st} + \frac{R_m}{R_{mbm}} \cdot \frac{\sqrt{(7.5 + \sqrt{G_2 \cdot mm})}}{\sqrt{1 + 0.2 \cdot \sqrt{G_2 \cdot mm}}}} = 0.632 \quad (4.3.16)$$

Im Falle, dass die Werte für die bruchmechanische Stützzahl n_{bm} Werte kleiner Eins annehmen, erhalten die Faktoren den Wert Eins. Die Größen, die für die Berechnung der Teilstützzahlen benötigt werden, sind die hochbeanspruchte Fläche A_{σ} und das bezogene Spannungsgefälle G . Die hochbeanspruchte Fläche A_{σ} wird mit der A90%-Methode abgeschätzt (siehe Kapitel 4.5.2). Um das bezogene Spannungsgefälle zu berechnen, müssen Randspannungsamplituden in einem Abstand Δs ausgehend vom kritischen Punkt berechnet werden.

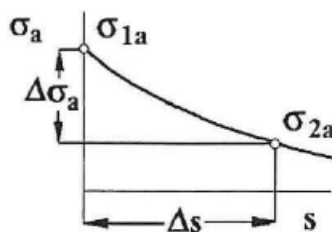


Figure 38 - Bezogenes Spannungsgefälle [13]

Table 20 - Spannungskennwerte für bez. Spannungsgefälle

Spannungskennwerte	Wert
σ_{a11}	-156.4 MPa
σ_{a12}	-156.4 MPa
σ_{a21}	1 MPa
σ_{a22}	1 MPa
Δs	0.1 mm

$$G_1 := \frac{\left(1 - \frac{\sigma_{a12}}{\sigma_{a11}}\right)}{\Delta s} = 0 \frac{1}{m} \quad (4.3.18)$$

$$G_2 := \frac{\left(1 - \frac{\sigma_{a22}}{\sigma_{a21}}\right)}{\Delta s} = 0 \frac{1}{m} \quad (4.3.18)$$

Konstruktionskennwerte (nach FKM, Kapitel 4.3 [13])

Um den Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die Ermüdungsfestigkeit des Bauteils einzurechnen, wird der Rauigkeitsfaktor berechnet:

$$K_{R\sigma} := 1 - a_{R\sigma} \cdot \log(R_z) \cdot \log\left(2 \cdot \frac{R_m}{R_{\min}}\right) = 0.835 \quad (4.3.22)$$

Weiters zu ermitteln sind der Randschichtfaktor K_V und der Schutzschichtfaktor K_S . Für Bauteile aus Stahl ohne Randschichthärtung und Schutzschicht ergeben sich beide Werte zu Eins.

Table 21 - Faktoren Konstruktion

Beschreibung	Faktor	Wert	FKM-Richtlinie
Einflussfaktor Randschicht	K_V	1	4.3.30
Einflussfaktor Schutzschicht	K_S	1	4.3.31
Oberflächenrauigkeit	R_z	64 μm	
Konstante	$a_{R\sigma}$	0.22	Tab 4.3.5
Einflussfaktor Kerbe	$K_{f\sigma}$	1	4.3.2

Mit diesen Faktoren können nun die Konstruktionsfaktoren für nichtgeschweißte Bauteile berechnet werden:

$$K_{WK1} := \frac{1}{n_{\sigma 1}} \cdot \left[1 + \frac{1}{K_{f\sigma 1}} \cdot \left(\frac{1}{K_{R\sigma}} - 1 \right) \right] \cdot \frac{1}{K_V K_S} = 1.018 \quad (4.3.1)$$

$$K_{WK2} := \frac{1}{n_{\sigma 2}} \cdot \left[1 + \frac{1}{K_{f\sigma 1}} \cdot \left(\frac{1}{K_{R\sigma}} - 1 \right) \right] \cdot \frac{1}{K_V K_S} = 1.018$$

$$K_{WK3} := 1$$

Bauteilfestigkeit (nach FKM, Kapitel 4.4 [13])

Dadurch ergeben sich die ertragbaren Nennwerte der Bauteil-Wechselfestigkeit:

$$\sigma_{WK\sigma 1} := \frac{\sigma_{Wzd}}{K_{WK1}} = 2.043 \times 10^8 \text{ Pa} \quad (4.4.1)$$

$$\sigma_{WK\sigma 2} := \frac{\sigma_{Wzd}}{K_{WK2}} = 2.043 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{WK\sigma 3} := \frac{\sigma_{Wzd}}{1} = 2.08 \times 10^8 \text{ Pa}$$

Im nächsten Schritt muss die Mittelspannung berücksichtigt werden. Dazu wird ein Mittelspannungsfaktor berechnet. Die Mittelspannungsempfindlichkeit M_σ für nichtgeschweißte Bauteile lautet:

$$M_\sigma := a_M \cdot 10^{-3} \cdot \frac{R_m}{\text{MPa}} + b_M = 0.082$$

Table 22 - Faktoren Mittelspannungsempfindlichkeit

Beschreibung	Faktor	Wert	FKM-Richtlinie
Konstante für Mittelspannungsempfindlichkeit	a_M	0.35	Tab 4.4.1
Konstante für Mittelspannungsempfindlichkeit	b_M	-0.1	Tab 4.4.1

Die Faktoren a_M und b_M werden der Tabelle 4.4 entnommen. Im Anschluss kann der Mittelspannungsfaktor K_{AK} für den Überlastungsfall F2 berechnet werden. Je nach Spannungsverhältnis R , müssen verschiedene Formeln angewendet werden.

$$K_{AK1} := \frac{1}{\left(1 + M_\sigma \cdot \frac{\sigma_{1m}}{\sigma_{1a}}\right)} = 0.996 \quad (4.4.9)$$

$$K_{AK2} := \frac{(3 + M_\sigma)}{3 \cdot (1 + M_\sigma)^2} = 0.878 \quad (4.4.11)$$

In weiterer Folge kann nach der FKM-Richtlinie entweder nach dem Amplitudennachweis oder dem Äquivalentspannungsnachweis vorgegangen werden. In dieser Rechnung wird der Äquivalentspannungsnachweis angewendet. Beide Nachweise sind gleichwertig. Dazu muss die schädigungsgleiche Wechsellastspannungsamplitude für jede Kollektivstufe berechnet werden.

$$\sigma_{aw1} := \frac{\sigma_{1a}}{K_{AK1}} = 1.658 \times 10^8 \text{ Pa} \quad (4.4.5)$$

$$\sigma_{aw2} := \frac{\sigma_{2a}}{K_{AK2}} = 8.763 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Betriebsfestigkeitsberechnung

Da ein Dauerfestigkeitsnachweis geführt werden soll, wird der Betriebsfestigkeitsfaktor K_{BK} auf Eins gesetzt. Somit kann die Äquivalentspannungsamplitude für Normalspannungen bestimmt werden:

$$\sigma_{\text{äqu}1} := \frac{\sigma_{aw1}}{K_{BK}} = 1.658 \times 10^8 \text{ Pa} \quad (4.4.28)$$

$$\sigma_{\text{äqu}2} := \frac{\sigma_{aw2}}{K_{BK}} = 8.763 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Nachweis (nach FKM, Kapitel 4.6 [13])

Für ebene Spannungszustände ergibt sich der zyklische Auslastungsgrad zu:

$$a_{BK\sigma 1} := \frac{\frac{\sigma_{\text{äqu}1}}{\sigma_{WK\sigma 1}}}{j_d} = 1.055 \quad (4.6.3)$$

$$a_{BK\sigma 2} := \frac{\frac{\sigma_{\text{äqu}2}}{\sigma_{WK\sigma 2}}}{j_d} = 0.056$$

$$a_{BK\sigma V} := \sqrt{0.5 \left[\left(a_{BK\sigma 1} - a_{BK\sigma 2} \right)^2 + \left(a_{BK\sigma 2} \right)^2 + a_{BK\sigma 1}^2 \right]} = 1.029 \quad (4.6.18)$$

Der zyklische Auslastungsgrad beträgt 102.9 %. Allerdings wurden manche Faktoren, um die Rechnung zu vereinfachen sowie ein sichereres Ergebnis zu erhalten, sehr konservativ gewählt, sodass die tatsächliche Auslastung geringer sein wird. Zusammen mit der Sicherheit von 1.3 wird der zyklische Auslastungsgrad als annehmbar betrachtet.

6.2.2 Nachweis Halteblech

Statischer Festigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen

Spannungskennwerte

$$\sigma_{\text{Mises}} := 166 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Werkstoffkennwerte

$$R_{mN} := 520 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad R_{pN} := 220 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$R_m := K_{dm} \cdot K_A \cdot R_{mN} = 520 \text{ MPa} \quad (3.2.1)$$

$$R_p := K_{dp} \cdot K_A \cdot R_{pN} = 220 \text{ MPa} \quad (3.2.1)$$

Table 23 - Faktoren Werkstofffestigkeit

Faktor	Wert	FKM-Richtlinie
K_{dm}	1	3.2.6
K_{dp}	1	3.2.6
K_{dA}	1	3.2.6
K_A	1	3.2.6

Bauteilfestigkeit

$$f_R := 0.5 \cdot \left(1 + \frac{R_m}{R_p} \right) = 1.682 \quad (3.3.3)$$

$$n_{pl} := f_R \cdot K_p = 2.085 \quad (3.3.1)$$

Da für K_p für dieses Bauteil keine geometrische Abschätzung vorgenommen werden kann, wird der Faktor auf Eins gesetzt, dies entspricht der konservativsten Annahme. Auf diese Weise muss keine nicht-lineare Vergleichsrechnung durchgeführt werden.

$$K_p := 1$$

$$\sigma_{sk} := R_p \cdot n_{pl} = 3.7 \times 10^8 \text{ Pa} \quad (3.4.1)$$

Sicherheitsfaktoren

Table 24 - Faktoren Sicherheit

Faktor	Wert	FKM-Richtlinie
j_p	1.3	3.5.1
j_s	1	3.5.1
j_g	1	3.5.1

$$j_{ges} := j_s \cdot \left(j_g \cdot \frac{j_p}{K_{Ttp}} \right) = 1.3 \quad (3.5.4)$$

Nachweis

$$a_{sk} := \frac{\sigma_{Mises}}{\frac{\sigma_{sk}}{j_{ges}}} = 0.583 \quad (3.6.1)$$

Der statische Auslastungsgrad beträgt 58.3% und der statische Nachweis ist somit erbracht!

Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen

Spannungskennwerte

Table 25 - Spannungskennwerte Rohr

Spannungskomponente	Wert
1.Hauptspannung Amplitude	-156.1 MPa
1.Hauptspannung Mittelwert	-156.1 MPa
2.Hauptspannung Amplitude	-43.8 MPa
2.Hauptspannung Mittelwert	14.8 MPa

$$R_1 := \frac{\sigma_{1m} - \sigma_{1a}}{\sigma_{1m} + \sigma_{1a}} = 0$$

$$R_2 := \frac{\sigma_{2m} - \sigma_{2a}}{\sigma_{2m} + \sigma_{2a}} = -2.021 \quad (4.1.1)$$

Werkstofffestigkeit

Table 26 - Faktoren Werkstofffestigkeit

Faktor	Wert	FKM-Richtlinie
$f_{W\Sigma}$	0.4	Tab 4.2.1

$$\sigma_{Wzd} := f_{W\Sigma} \cdot R_m = 208 \text{ MPa} \quad (4.21)$$

Bauteilfestigkeit

$$n_{\sigma 1} := n_{st} \cdot n_{vm} \cdot n_{bm1} = 1.104 \quad (4.3.10)$$

$$n_{\sigma 2} := n_{st} \cdot n_{vm} \cdot n_{bm2} = 1.104 \quad (4.3.10)$$

Table 27 - Faktoren Stützzahl

Beschreibung	Faktoren	Wert	FKM-Richtlinie
Referenzoberfläche	A_{Ref}	500 mm ²	4.3.12
Bez. Spannungsgefälle 1.Hauptspannung	G_1	0 [1/m]	
Bez. Spannungsgefälle 2.Hauptspannung	G_2	0 [1/m]	
Weibull-Exponent	k_{st}	30	Tab 4.3.3
Beiwert Verformungsmechanische Stützzahl	n	0.15	4.3.14
Dauerfest ertragbare wechselpastische Dehnung	E_{pl}	$2 \cdot 10^{-4}$	4.3.14
Referenzzugfestigkeit Burchmechanische Stützzahl	R_{mbm}	680 MPa	Tab 4.3.4

$$n_{\text{st}} := \left(\frac{A_{\text{ref}}}{A_{\sigma}} \right)^{\frac{1}{k_{\text{st}}}} = 1.007 \quad (4.3.11)$$

$$n_{\text{vm}} := \sqrt{1 + E \cdot \varepsilon_{\text{pl}} \cdot \frac{n_{\text{st}}^{\frac{1}{n-1}}}{\sigma_{\text{Wzd}}}} = 1.096 \quad (4.3.14)$$

$$n_{\text{bm1}} := \frac{(5 + \sqrt{G_1 \cdot \text{mm}})}{5 \cdot n_{\text{vm}} \cdot n_{\text{st}} + \frac{R_{\text{m}}}{R_{\text{mbm}}} \cdot \frac{\sqrt{(7.5 + \sqrt{G_1 \cdot \text{mm}})}}{1 + 0.2 \cdot \sqrt{G_1 \cdot \text{mm}}}} = 0.657 \quad (4.3.16)$$

$$n_{\text{bm2}} := \frac{(5 + \sqrt{G_2 \cdot \text{mm}})}{5 \cdot n_{\text{vm}} \cdot n_{\text{st}} + \frac{R_{\text{m}}}{R_{\text{mbm}}} \cdot \frac{\sqrt{(7.5 + \sqrt{G_2 \cdot \text{mm}})}}{1 + 0.2 \cdot \sqrt{G_2 \cdot \text{mm}}}} = 0.657 \quad (4.3.16)$$

Table 28 - Spannungskennwerte für bez. Spannungsgefälle

Spannungskennwerte	Wert [MPa]
σ_{a11}	-184.3
σ_{a12}	-184.3
σ_{a21}	1
σ_{a22}	1

$$\Delta s := 0.1 \text{ mm}$$

$$G_1 := \frac{\left(1 - \frac{\sigma_{a12}}{\sigma_{a11}}\right)}{\Delta s} = 0 \frac{1}{\text{m}} \quad (4.3.18)$$

$$G_2 := \frac{\left(1 - \frac{\sigma_{a22}}{\sigma_{a21}}\right)}{\Delta s} = 0 \frac{1}{\text{m}} \quad (4.3.18)$$

Konstruktionskennwerte

$$K_{R\sigma} := 1 - a_{R\sigma} \cdot \log(R_z) \cdot \log\left(2 \cdot \frac{R_m}{R_{\text{mmin}}}\right) = 0.835 \quad (4.3.22)$$

Table 29 - Faktoren Konstruktion

Beschreibung	Faktor	Wert	FKM-Richtlinie
Einflussfaktor Randschicht	K_V	1	4.3.30
Einflussfaktor Schutzschicht	K_S	1	4.3.31
Oberflächenrauigkeit	R_z	64 μm	
Konstante	$a_{R\sigma}$	0.22	Tab 4.3.5
Einflussfaktor Kerbe	$K_{f\sigma}$	1	4.3.2

$$K_{WK1} := \frac{1}{n_{\sigma 1}} \cdot \left[1 + \frac{1}{K_{f\sigma 1}} \cdot \left(\frac{1}{K_{R\sigma}} - 1\right)\right] \cdot \frac{1}{K_V K_S} = 1.085 \quad (4.3.1)$$

$$K_{WK2} := \frac{1}{n_{\sigma 2}} \cdot \left[1 + \frac{1}{K_{f\sigma 1}} \cdot \left(\frac{1}{K_{R\sigma}} - 1\right)\right] \cdot \frac{1}{K_V K_S} = 1.085$$

$$K_{WK3} := 1$$

Bauteilfestigkeit

$$\sigma_{WK\sigma 1} := \frac{\sigma_{Wzd}}{K_{WK1}} = 1.917 \times 10^8 \text{ Pa} \quad (4.4.1)$$

$$\sigma_{WK\sigma 2} := \frac{\sigma_{Wzd}}{K_{WK2}} = 1.917 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{WK\sigma 3} := \frac{\sigma_{Wzd}}{1} = 2.08 \times 10^8 \text{ Pa} :$$

$$M_{\sigma} := a_M \cdot 10^{-3} \cdot \frac{R_m}{\text{MPa}} + b_M = 0.082$$

Table 30 - Faktoren Mittelspannungsempfindlichkeit

Beschreibung	Faktor	Wert	FKM-Richtlinie
Konstante für Mittelspannungsempfindlichkeit	a_M	0.35	Tab 4.4.1
Konstante für Mittelspannungsempfindlichkeit	b_M	-0.1	Tab 4.4.1

$$K_{AK1} := \frac{1}{\left(1 + M_{\sigma} \cdot \frac{\sigma_{1m}}{\sigma_{1a}}\right)} = 0.924 \quad (4.4.9)$$

$$K_{AK2} := \frac{1}{\left(1 + M_{\sigma} \cdot \frac{\sigma_{2m}}{\sigma_{2a}}\right)} = 1.028 \quad (4.4.11)$$

$$\sigma_{aw1} := \frac{\sigma_{1a}}{K_{AK1}} = -1.689 \times 10^8 \text{ Pa} \quad (4.4.5)$$

$$\sigma_{aw2} := \frac{\sigma_{2a}}{K_{AK2}} = -4.259 \times 10^7 \text{ Pa}$$

Betriebsfestigkeitsberechnung

$$\sigma_{\text{äqu}1} := \frac{\sigma_{\text{aw}1}}{K_{\text{BK}}} = -1.689 \times 10^8 \text{ Pa} \quad (4.4.28)$$

$$\sigma_{\text{äqu}2} := \frac{\sigma_{\text{aw}2}}{K_{\text{BK}}} = -4.259 \times 10^7 \text{ Pa}$$

Nachweis

Für ebene Spannungszustände ergibt sich der zyklische Auslastungsgrad zu:

$$a_{\text{BK}\sigma 1} := \frac{\sigma_{\text{äqu}1}}{\frac{\sigma_{\text{WK}\sigma 1}}{j_d}} = -1.145 \quad (4.6.3)$$

$$a_{\text{BK}\sigma 2} := \frac{\sigma_{\text{äqu}2}}{\frac{\sigma_{\text{WK}\sigma 2}}{j_d}} = -0.289$$

$$a_{\text{BK}\sigma V} := \sqrt{0.5 \cdot \left[(a_{\text{BK}\sigma 1} - a_{\text{BK}\sigma 2})^2 + (a_{\text{BK}\sigma 2})^2 + a_{\text{BK}\sigma 1}^2 \right]} = 1.032 \quad (4.6.18)$$

Der zyklische Auslastungsgrad beträgt 103.2 %.

6.2.3 Nachweis Verbindungsstück**Statischer Festigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen**Spannungskennwerte

$$\sigma_{\text{Mises}} := 142 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Werkstoffkennwerte

$$R_{\text{mN}} := 520 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad R_{\text{pN}} := 220 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$R_{\text{m}} := K_{\text{dm}} \cdot K_{\text{A}} \cdot R_{\text{mN}} = 520 \text{ MPa} \quad (3.2.1)$$

$$R_p := K_{dp} \cdot K_A \cdot R_{pN} = 220 \text{ MPa} \quad (3.2.1)$$

Table 31 - Faktoren Werkstofffestigkeit

Faktor	Wert	FKM-Richtlinie
K_{dm}	1	3.2.6
K_{dp}	1	3.2.6
K_{dA}	1	3.2.6
K_A	1	3.2.6

Bauteilfestigkeit

$$f_R := 0.5 \cdot \left(1 + \frac{R_m}{R_p} \right) = 1.682 \quad (3.3.3)$$

$$n_{p1} := f_R \cdot K_p = 1.682 \quad (3.3.1)$$

Für das Verbindungsstück kann keine einfache Abschätzung der plastischen Formzahl vorgenommen werden und müsste durch nichtlineare FE-Analysen ermittelt werden. Daher wird der Faktor K_p auf Eins gesetzt. Dies entspricht der konservativsten Annahme.

$$K_p := 1$$

$$\sigma_{sk} := R_p \cdot n_{p1} = 3.7 \times 10^8 \text{ Pa} \quad (3.4.1)$$

Sicherheitsfaktoren

Table 32 - Faktoren Sicherheit

Faktor	Wert	FKM-Richtlinie
j_p	1.3	3.5.1
j_s	1	3.5.1
j_g	1	3.5.1

$$j_{ges} := j_s \cdot \left(j_g \cdot \frac{j_p}{K_{Ttp}} \right) = 1.3 \quad (3.5.4)$$

Nachweis

$$a_{sk} := \frac{\sigma_{Mises}}{\frac{\sigma_{sk}}{j_{ges}}} = 0.499 \quad (3.6.1)$$

Der statische Auslastungsgrad beträgt 49.9% und der statische Nachweis ist somit erbracht!

Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen

Spannungskennwerte

Table 33 - Spannungskennwerte Rohr

Spannungskomponente	Wert
1.Hauptspannung Amplitude	88.05 MPa
1.Hauptspannung Mittelwert	-11.65 MPa
2.Hauptspannung Amplitude	-17.29 MPa
2.Hauptspannung Mittelwert	-0.49 MPa

Die Spannungsverhältnisse lauten:

$$R_1 := \frac{\sigma_{1m} - \sigma_{1a}}{\sigma_{1m} + \sigma_{1a}} = -1.305$$

$$R_2 := \frac{\sigma_{2m} - \sigma_{2a}}{\sigma_{2m} + \sigma_{2a}} = -0.945 \quad (4.1.1)$$

Werkstofffestigkeit

Table 34 - Faktoren Werkstofffestigkeit

Faktor	Wert	FKM-Richtlinie
f_{WSigma}	0.4	Tab 4.2.1

$$\sigma_{Wzd} := f_{W\sigma} \cdot R_m = 2.34 \times 10^8 \text{ Pa} \quad (4.21)$$

Bauteilfestigkeit

$$n_{\sigma 1} := n_{st} \cdot n_{vm} \cdot n_{bm1} = 1.259 \quad (4.3.10)$$

$$n_{\sigma 2} := n_{st} \cdot n_{vm} \cdot n_{bm2} = 1.259 \quad (4.3.10)$$

Table 35 - Faktoren Stützzahl

Beschreibung	Faktoren	Wert	FKM-Richtlinie
Referenzoberfläche	A_{Ref}	500 mm ²	4.3.12
Bez. Spannungsgefälle 1.Hauptspannung	G_1	$1.01 \cdot 10^3$ [1/m]	
Bez. Spannungsgefälle 2.Hauptspannung	G_2	$2.5 \cdot 10^3$ [1/m]	
Weibull-Exponent	k_{st}	30	Tab 4.3.3
Beiwert Verformungsmechanische Stützzahl	n	0.15	4.3.14
Dauerfest ertragbare wechselpastische Dehnung	E_{pl}	$2 \cdot 10^{-4}$	4.3.14
Referenzzugfestigkeit Burchmechanische Stützzahl	R_{mbm}	680 MPa	Tab 4.3.4

$$n_{\text{st}} := \left(\frac{A_{\text{ref}}}{A_{\sigma}} \right)^{\frac{1}{k_{\text{st}}}} = 1.143 \quad (4.3.11)$$

$$n_{\text{vm}} := \sqrt{1 + E \cdot \varepsilon_{\text{pl}} \cdot \frac{n_{\text{st}}^{\frac{1}{n-1}}}{\sigma_{\text{Wzd}}}} = 1.072 \quad (4.3.14)$$

$$n_{\text{bm1}} := \frac{(5 + \sqrt{G_1 \cdot \text{mm}})}{5 \cdot n_{\text{vm}} \cdot n_{\text{st}} + \frac{R_{\text{m}}}{R_{\text{mbm}}} \cdot \frac{\sqrt{(7.5 + \sqrt{G_1 \cdot \text{mm}})}}{\sqrt{1 + 0.2 \cdot \sqrt{G_1 \cdot \text{mm}}}}} = 0.721 \quad (4.3.16)$$

$$n_{\text{bm2}} := \frac{(5 + \sqrt{G_2 \cdot \text{mm}})}{5 \cdot n_{\text{vm}} \cdot n_{\text{st}} + \frac{R_{\text{m}}}{R_{\text{mbm}}} \cdot \frac{\sqrt{(7.5 + \sqrt{G_2 \cdot \text{mm}})}}{\sqrt{1 + 0.2 \cdot \sqrt{G_2 \cdot \text{mm}}}}} = 0.793 \quad (4.3.16)$$

Table 36 - Spannungskennwerte für bez. Spannungsgefälle

Spannungskennwerte	Wert [MPa]
σ_{a11}	-99
σ_{a12}	-89
σ_{a21}	16
σ_{a22}	12

$$\Delta s := 0.1 \text{ mm}$$

$$G_1 := \frac{\left(1 - \frac{\sigma_{a12}}{\sigma_{a11}}\right)}{\Delta s} = 1.01 \times 10^3 \frac{1}{\text{m}} \quad (4.3.18)$$

$$G_2 := \frac{\left(1 - \frac{\sigma_{a22}}{\sigma_{a21}}\right)}{\Delta s} = 2.5 \times 10^3 \frac{1}{\text{m}} \quad (4.3.18)$$

Konstruktionskennwerte

$$K_{R\sigma} := 1 - a_{R\sigma} \cdot \log(R_z) \cdot \log\left(2 \cdot \frac{R_m}{R_{\text{mmin}}}\right) = 0.835 \quad (4.3.22)$$

Table 37 - Faktoren Konstruktion

Beschreibung	Faktor	Wert	FKM-Richtlinie
Einflussfaktor Randschicht	K_V	1	4.3.30
Einflussfaktor Schutzschicht	K_S	1	4.3.31
Oberflächenrauigkeit	R_z	64 μm	
Konstante	$a_{R\sigma}$	0.22	Tab 4.3.5
Einflussfaktor Kerbe	$K_{f\sigma}$	1	4.3.2

$$K_{WK1} := \frac{1}{n_{\sigma 1}} \cdot \left[1 + \frac{1}{K_{f\sigma 1}} \cdot \left(\frac{1}{K_{R\sigma}} - 1\right)\right] \cdot \frac{1}{K_V K_S} = 0.951 \quad (4.3.1)$$

$$K_{WK2} := \frac{1}{n_{\sigma 2}} \cdot \left[1 + \frac{1}{K_{f\sigma 1}} \cdot \left(\frac{1}{K_{R\sigma}} - 1 \right) \right] \cdot \frac{1}{K_V K_S} = 0.951$$

$$K_{WK3} := 1$$

Bauteilfestigkeit

$$\sigma_{WK\sigma 1} := \frac{\sigma_{Wzd}}{K_{WK1}} = 2.46 \times 10^8 \text{ Pa} \quad (4.4.1)$$

$$\sigma_{WK\sigma 2} := \frac{\sigma_{Wzd}}{K_{WK2}} = 2.46 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{WK\sigma 3} := \frac{\sigma_{Wzd}}{1} = 2.34 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$M_{\sigma} := a_M \cdot 10^{-3} \cdot \frac{R_m}{\text{MPa}} + b_M = 0.082$$

Table 38 - Faktoren Mittelspannungsempfindlichkeit

Beschreibung	Faktor	Wert	FKM-Richtlinie
Konstante für Mittelspannungsempfindlichkeit	a_M	0.35	Tab 4.4.1
Konstante für Mittelspannungsempfindlichkeit	b_M	-0.1	Tab 4.4.1

$$K_{AK1} := \frac{1}{\left(1 + M_{\sigma} \cdot \frac{\sigma_{1m}}{\sigma_{1a}} \right)} = 1.011 \quad (4.4.9)$$

$$K_{AK2} := \frac{1}{\left(1 + M_{\sigma} \cdot \frac{\sigma_{2m}}{\sigma_{2a}} \right)} = 0.998 \quad (4.4.11)$$

$$\sigma_{aw1} := \frac{\sigma_{1a}}{K_{AK1}} = 8.709 \times 10^7 \text{ Pa} \quad (4.4.5)$$

$$\sigma_{aw2} := \frac{\sigma_{2a}}{K_{AK2}} = -1.733 \times 10^7 \text{ Pa}$$

Betriebsfestigkeitsberechnung

$$\sigma_{\text{äqu}1} := \frac{\sigma_{\text{aw}1}}{K_{\text{BK}}} = 8.709 \times 10^7 \text{ Pa} \quad (4.4.28)$$

$$\sigma_{\text{äqu}2} := \frac{\sigma_{\text{aw}2}}{K_{\text{BK}}} = -1.733 \times 10^7 \text{ Pa}$$

Nachweis

$$a_{\text{BK}\sigma 1} := \frac{\frac{\sigma_{\text{äqu}1}}{\frac{\sigma_{\text{WK}\sigma 1}}{j_d}}}{j_d} = 0.46 \quad (4.6.3)$$

$$a_{\text{BK}\sigma 2} := \frac{\frac{\sigma_{\text{äqu}2}}{\frac{\sigma_{\text{WK}\sigma 2}}{j_d}}}{j_d} = -0.092$$

$$a_{\text{BK}\sigma V} := \sqrt{0.5 \left[\left(a_{\text{BK}\sigma 1} - a_{\text{BK}\sigma 2} \right)^2 + \left(a_{\text{BK}\sigma 2} \right)^2 + a_{\text{BK}\sigma 1}^2 \right]} = 0.512 \quad (4.6.18)$$

Der zyklische Auslastungsgrad beträgt 51.2%.

6.2.4 Nachweis Gabelstück**Statischer Festigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen**Spannungskennwerte

$$\sigma_{\text{Mises}} := 47 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Werkstoffkennwerte

$$R_{\text{mN}} := 520 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad R_{\text{pN}} := 220 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$R_{\text{m}} := K_{\text{dm}} \cdot K_{\text{A}} \cdot R_{\text{mN}} = 520 \text{ MPa} \quad (3.2.1)$$

$$R_{\text{p}} := K_{\text{dp}} \cdot K_{\text{A}} \cdot R_{\text{pN}} = 220 \text{ MPa} \quad (3.2.1)$$

Table 39 - Faktoren Werkstofffestigkeit

Faktor	Wert	FKM-Richtlinie
K_{dm}	1	3.2.6
K_{dp}	1	3.2.6
K_{dA}	1	3.2.6
K_A	1	3.2.6

Bauteilfestigkeit

$$f_R := 0.5 \cdot \left(1 + \frac{R_m}{R_p} \right) = 1.682 \quad (3.3.3)$$

$$n_{p1} := f_R \cdot K_p = 1.682 \quad (3.3.1)$$

$$K_p := 1$$

$$\sigma_{sk} := R_p \cdot n_{p1} = 3.33 \times 10^8 \text{ Pa} \quad (3.4.1)$$

Sicherheitsfaktoren

Table 40 - Faktoren Sicherheit

Faktor	Wert	FKM-Richtlinie
j_p	1.3	3.5.1
j_s	1	3.5.1
j_g	1	3.5.1

$$j_{ges} := j_s \cdot \left(j_g \cdot \frac{j_p}{K_{Ttp}} \right) = \quad (3.5.4)$$

Nachweis

$$a_{sk} := \frac{\sigma_{Mises}}{\frac{\sigma_{sk}}{j_{ges}}} = 0.198 \quad (3.6.1)$$

Der statische Auslastungsgrad beträgt 19.8 % und der statische Nachweis ist somit erbracht!

Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen

Spannungskennwerte

Table 41 - Spannungskennwerte Rohr

Spannungskomponente	Wert
1.Hauptspannung Amplitude	48.5 MPa
1.Hauptspannung Mittelwert	1.923 MPa
2.Hauptspannung Amplitude	4.99 MPa
2.Hauptspannung Mittelwert	0.29 MPa

Die Spannungsverhältnisse lauten:

$$R_1 := \frac{\sigma_{1m} - \sigma_{1a}}{\sigma_{1m} + \sigma_{1a}} = -0.924$$

$$R_2 := \frac{\sigma_{2m} - \sigma_{2a}}{\sigma_{2m} + \sigma_{2a}} = -0.89 \quad (4.1.1)$$

Werkstofffestigkeit

Table 42 - Faktoren Werkstofffestigkeit

Faktor	Wert	FKM-Richtlinie
f_{WSigma}	0.4	Tab 4.2.1

$$\sigma_{Wzd} := f_{W\sigma} \cdot R_m = 1.872 \times 10^8 \text{ Pa} \quad (4.21)$$

Bauteilfestigkeit

$$n_{\sigma 1} := n_{st} \cdot n_{vm} \cdot n_{bm1} = 1.334 \quad (4.3.10)$$

$$n_{\sigma 2} := n_{st} \cdot n_{vm} \cdot n_{bm2} = 1.334 \quad (4.3.10)$$

Table 43 - Faktoren Stützzahl

Beschreibung	Faktoren	Wert	FKM-Richtlinie
Referenzoberfläche	A_{Ref}	500 mm ²	4.3.12
Hochbeanspruchte Fläche	A_{Sigma}	1 mm ²	
Bez. Spannungsgefälle 1.Hauptspannung	G_1	1.01*10 ³ [1/m]	
Bez. Spannungsgefälle 2.Hauptspannung	G_2	2.5*10 ³ [1/m]	
Weibull-Exponent	k_{st}	30	Tab 4.3.3
Beiwert Verformungsmechanische Stützzahl	n	0.15	4.3.14
Dauerfest ertragbare wechselplastische Dehnung	E_{pl}	2*10 ⁻⁴	4.3.14
Referenzzugfestigkeit Burchmechanische Stützzahl	R_{mbm}	680 MPa	Tab 4.3.4

$$n_{\text{st}} := \left(\frac{A_{\text{ref}}}{A_{\sigma}} \right)^{\frac{1}{k_{\text{st}}}} = 1.23 \quad (4.3.11)$$

$$n_{\text{vm}} := \sqrt{1 + E \cdot \varepsilon_{\text{pl}} \cdot \frac{n_{\text{st}}^{\frac{1}{n-1}}}{\sigma_{\text{Wzd}}}} = 1.084 \quad (4.3.14)$$

$$n_{\text{bm1}} := \frac{(5 + \sqrt{G_1 \cdot \text{mm}})}{5 \cdot n_{\text{vm}} \cdot n_{\text{st}} + \frac{R_{\text{m}}}{R_{\text{mbm}}} \cdot \frac{(7.5 + \sqrt{G_1 \cdot \text{mm}})}{1 + 0.2 \cdot \sqrt{G_1 \cdot \text{mm}}}} = 0.656 \quad (4.3.16)$$

$$n_{\text{bm2}} := \frac{(5 + \sqrt{G_2 \cdot \text{mm}})}{5 \cdot n_{\text{vm}} \cdot n_{\text{st}} + \frac{R_{\text{m}}}{R_{\text{mbm}}} \cdot \frac{(7.5 + \sqrt{G_2 \cdot \text{mm}})}{1 + 0.2 \cdot \sqrt{G_2 \cdot \text{mm}}}} = 0.608$$

Table 44 - Spannungskennwerte für bez. Spannungsgefälle

Spannungskennwerte	Wert [MPa]
σ_{a11}	143.41
σ_{a12}	138.44
σ_{a21}	-166.93
σ_{a22}	-166.29

$$\Delta s := 0.1 \text{ mm}$$

$$G_1 := \frac{\left(1 - \frac{\sigma_{a12}}{\sigma_{a11}}\right)}{\Delta s} = 346.559 \frac{1}{\text{m}} \quad (4.3.18)$$

$$G_2 := \frac{\left(1 - \frac{\sigma_{a22}}{\sigma_{a21}}\right)}{\Delta s} = 38.339 \frac{1}{\text{m}} \quad (4.3.18)$$

Konstruktionskennwerte

$$K_{R\sigma} := 1 - a_{R\sigma} \cdot \log(R_z) \cdot \log\left(2 \cdot \frac{R_m}{R_{\text{mmin}}}\right) = 0.835 \quad (4.3.22)$$

Table 45 - Faktoren Konstruktion

Beschreibung	Faktor	Wert	FKM-Richtlinie
Einflussfaktor Randschicht	K_V	1	4.3.30
Einflussfaktor Schutzschicht	K_S	1	4.3.31
Oberflächenrauigkeit	R_z	64 μm	
Konstante	$a_{R\sigma}$	0.22	Tab 4.3.5
Einflussfaktor Kerbe	$K_{f\sigma}$	1	4.3.2

$$K_{WK1} := \frac{1}{n_{\sigma 1}} \cdot \left[1 + \frac{1}{K_{f\sigma 1}} \cdot \left(\frac{1}{K_{R\sigma}} - 1\right)\right] \cdot \frac{1}{K_V K_S} = 0.879 \quad (4.3.1)$$

$$K_{WK2} := \frac{1}{n_{\sigma 2}} \cdot \left[1 + \frac{1}{K_{f\sigma 1}} \cdot \left(\frac{1}{K_{R\sigma}} - 1\right)\right] \cdot \frac{1}{K_V K_S} = 0.879$$

$$K_{WK3} := 1$$

Bauteilfestigkeit

$$\sigma_{WK\sigma 1} := \frac{\sigma_{Wzd}}{K_{WK1}} = 213.079 \text{ MPa} \quad (4.4.1)$$

$$\sigma_{WK\sigma 2} := \frac{\sigma_{Wzd}}{K_{WK2}} = 213.079 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{WK\sigma 3} := \frac{\sigma_{Wzd}}{1} = 1.872 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$M_{\sigma} := a_M \cdot 10^{-3} \cdot \frac{R_m}{\text{MPa}} + b_M = 0.082$$

Table 46 - Faktoren Mittelspannungsempfindlichkeit

Beschreibung	Faktor	Wert	FKM-Richtlinie
Konstante für Mittelspannungsempfindlichkeit	a_M	0.35	Tab 4.4.1
Konstante für Mittelspannungsempfindlichkeit	b_M	-0.1	Tab 4.4.1

$$K_{AK1} := \frac{1}{1 + M_{\sigma} \cdot \frac{\sigma_{1m}}{\sigma_{1a}}} = 0.997 \quad (4.4.9)$$

$$K_{AK2} := \frac{1}{\left(1 + M_{\sigma} \cdot \frac{\sigma_{2m}}{\sigma_{2a}}\right)} = 0.998 \quad (4.4.11)$$

$$\sigma_{aW1} := \frac{\sigma_{1a}}{K_{AK1}} = 4.863 \times 10^7 \text{ Pa} \quad (4.4.5)$$

$$\sigma_{aW2} := \frac{\sigma_{2a}}{K_{AK2}} = 5.009 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Betriebsfestigkeitsberechnung

$$\sigma_{\text{äqu1}} := \frac{\sigma_{\text{aW1}}}{K_{\text{BK}}} = 4.863 \times 10^7 \text{ Pa} \quad (4.4.28)$$

$$\sigma_{\text{äqu2}} := \frac{\sigma_{\text{aW2}}}{K_{\text{BK}}} = 5.009 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Nachweis

$$a_{\text{BK}\sigma 1} := \frac{\sigma_{\text{äqu1}}}{\frac{\sigma_{\text{WK}\sigma 1}}{j_d}} = 0.319 \quad (4.6.3)$$

$$a_{\text{BK}\sigma 2} := \frac{\sigma_{\text{äqu2}}}{\frac{\sigma_{\text{WK}\sigma 2}}{j_d}} = 0.033$$

$$a_{\text{BK}\sigma V} := \sqrt{0.5 \left[\left(a_{\text{BK}\sigma 1} - a_{\text{BK}\sigma 2} \right)^2 + \left(a_{\text{BK}\sigma 2} \right)^2 + a_{\text{BK}\sigma 1}^2 \right]} = 0.304 \quad (4.6.18)$$

Der zyklische Auslastungsgrad beträgt 30.4%.

6.2.5 Nachweis Blech Wischblattaufnehmer**Statischer Festigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen**Spannungskennwerte

$$\sigma_{\text{Mises}} := 50 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Werkstoffkennwerte

$$R_{\text{mN}} := 520 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad R_{\text{pN}} := 220 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$R_{\text{m}} := K_{\text{dm}} \cdot K_{\text{A}} \cdot R_{\text{mN}} = 520 \text{ MPa} \quad (3.2.1)$$

$$R_p := K_{dp} \cdot K_A \cdot R_{pN} = 220 \text{ MPa} \quad (3.2.1)$$

Table 47 - Faktoren Werkstofffestigkeit

Faktor	Wert	FKM-Richtlinie
K_{dm}	1	3.2.6
K_{dp}	1	3.2.6
K_{dA}	1	3.2.6
K_A	1	3.2.6

Bauteilfestigkeit

$$f_R := 0.5 \left(1 + \frac{R_m}{R_p} \right) = 1.682 \quad (3.3.3)$$

$$n_{pl} := f_R \cdot K_p = 1.682 \quad (3.3.1)$$

$$K_p := 1$$

Die statische Bauteilfestigkeit ergibt sich für nichtgeschweißte Bauteile zu:

$$\sigma_{sk} := R_p \cdot n_{pl} = 3.7 \times 10^8 \text{ Pa} \quad (3.4.1)$$

Sicherheitsfaktoren

Table 48 - Faktoren Sicherheit

Faktor	Wert	FKM-Richtlinie
j_p	1.3	3.5.1
j_s	1	3.5.1
j_g	1	3.5.1

$$j_{ges} := j_s \cdot \left(j_g \cdot \frac{j_p}{K_{Ttp}} \right) = 1.3 \quad (3.5.4)$$

Nachweis

$$a_{sk} := \frac{\sigma_{Mises}}{\frac{\sigma_{sk}}{j_{ges}}} = 0.176 \quad (3.6.1)$$

Der statische Auslastungsgrad beträgt 36.4% und der statische Nachweis ist somit erbracht!

Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen

Spannungskennwerte

Table 49 - Spannungskennwerte Rohr

Spannungskomponente	Wert
1.Hauptspannung Amplitude	-46.185 MPa
1.Hauptspannung Mittelwert	9.285 MPa
2.Hauptspannung Amplitude	-14.5 MPa
2.Hauptspannung Mittelwert	2.999 MPa

Die Spannungsverhältnisse lauten:

$$R_1 := \frac{\sigma_{1m} - \sigma_{1a}}{\sigma_{1m} + \sigma_{1a}} = -1.503$$

$$R_2 := \frac{\sigma_{2m} - \sigma_{2a}}{\sigma_{2m} + \sigma_{2a}} = -0.89 \quad (4.1.1)$$

Werkstofffestigkeit

Table 50 - Faktoren Werkstofffestigkeit

Faktor	Wert	FKM-Richtlinie
$f_{W\Sigma}$	0.4	Tab 4.2.1

$$\sigma_{Wzd} := f_{W\Sigma} \cdot R_m = 2.34 \times 10^8 \text{ Pa} \quad (4.21)$$

Bauteilfestigkeit

$$n_{\sigma 1} := n_{st} \cdot n_{vm} \cdot n_{bm1} = 1.19 \quad (4.3.10)$$

$$n_{\sigma 2} := n_{st} \cdot n_{vm} \cdot n_{bm2} = 1.19 \quad (4.3.10)$$

Table 51 - Faktoren Stützzahl

Beschreibung	Faktoren	Wert	FKM-Richtlinie
Referenzoberfläche	A_{Ref}	500 mm ²	4.3.12
Hochbeanspruchte Fläche	A_{Sigma}	1 mm ²	
Bez. Spannungsgefälle 1.Hauptspannung	G_1	1.01*10 ³ [1/m]	
Bez. Spannungsgefälle 2.Hauptspannung	G_2	2.5*10 ³ [1/m]	
Weibull-Exponent	k_{st}	30	Tab 4.3.3
Beiwert Verformungsmechanische Stützzahl	n	0.15	4.3.14
Dauerfest ertragbare wechselplastische Dehnung	E_{pl}	2*10 ⁻⁴	4.3.14
Referenzzugfestigkeit Burchmechanische Stützzahl	R_{mbm}	680 MPa	Tab 4.3.4

$$n_{\text{st}} := \left(\frac{A_{\text{ref}}}{A_{\sigma}} \right)^{\frac{1}{k_{\text{st}}}} = 1.105 \quad (4.3.11)$$

$$n_{\text{vm}} := \sqrt{1 + E \cdot \varepsilon_{\text{pl}} \cdot \frac{n_{\text{st}}^{\frac{1}{n-1}}}{\sigma_{\text{Wzd}}}} = 1.077 \quad (4.3.14)$$

$$n_{\text{bm1}} := \frac{(5 + \sqrt{G_1 \cdot \text{mm}})}{5 \cdot n_{\text{vm}} \cdot n_{\text{st}} + \frac{R_{\text{m}}}{R_{\text{mbm}}} \cdot \frac{\sqrt{(7.5 + \sqrt{G_1 \cdot \text{mm}})}}{1 + 0.2 \cdot \sqrt{G_1 \cdot \text{mm}}}} = 0.656 \quad (4.3.16)$$

$$n_{\text{bm2}} := \frac{(5 + \sqrt{G_2 \cdot \text{mm}})}{5 \cdot n_{\text{vm}} \cdot n_{\text{st}} + \frac{R_{\text{m}}}{R_{\text{mbm}}} \cdot \frac{\sqrt{(7.5 + \sqrt{G_2 \cdot \text{mm}})}}{1 + 0.2 \cdot \sqrt{G_2 \cdot \text{mm}}}} = 0.608$$

Table 52 - Spannungskennwerte für bez. Spannungsgefälle

Spannungskennwerte	Wert [MPa]
Sigma_{a11}	143.41
Sigma_{a12}	138.44
Sigma_{a21}	-166.93
Sigma_{a22}	-166.29

$$\Delta s := 0.1 \text{ mm}$$

$$G_1 := \frac{\left(1 - \frac{\sigma_{a12}}{\sigma_{a11}}\right)}{\Delta s} = -3.5 \times 10^3 \frac{1}{\text{m}} \quad (4.3.18)$$

$$G_2 := \frac{\left(1 - \frac{\sigma_{a22}}{\sigma_{a21}}\right)}{\Delta s} = 5.645 \times 10^3 \frac{1}{\text{m}} \quad (4.3.18)$$

Konstruktionskennwerte

$$K_{R\sigma} := 1 - a_{R\sigma} \cdot \log(R_z) \cdot \log\left(2 \cdot \frac{R_m}{R_{mmin}}\right) = 0.835 \quad (4.3.22)$$

Table 53 - Faktoren Konstruktion

Beschreibung	Faktor	Wert	FKM-Richtlinie
Einflussfaktor Randschicht	K_V	1	4.3.30
Einflussfaktor Schutzschicht	K_S	1	4.3.31
Oberflächenrauigkeit	R_z	64 μm	
Konstante	$a_{R\sigma}$	0.22	Tab 4.3.5
Einflussfaktor Kerbe	$K_{f\sigma}$	1	4.3.2

(4.3.1)

$$K_{WK1} := \frac{1}{n_{\sigma 1}} \cdot \left[1 + \frac{1}{K_{f\sigma 1}} \cdot \left(\frac{1}{K_{R\sigma}} - 1\right)\right] \cdot \frac{1}{K_V K_S} = 1.006$$

$$K_{WK2} := \frac{1}{n_{\sigma 2}} \cdot \left[1 + \frac{1}{K_{f\sigma 1}} \cdot \left(\frac{1}{K_{R\sigma}} - 1\right)\right] \cdot \frac{1}{K_V K_S} = 1.006$$

$$K_{WK3} := 1$$

Bauteilfestigkeit

(4.4.1)

$$\sigma_{WK\sigma 1} := \frac{\sigma_{Wzd}}{K_{WK1}} = 2.325 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{WK\sigma 2} := \frac{\sigma_{Wzd}}{K_{WK2}} = 2.325 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{WK\sigma 3} := \frac{\sigma_{Wzd}}{1} = 2.34 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$M_{\sigma} := a_M \cdot 10^{-3} \cdot \frac{R_m}{\text{MPa}} + b_M = 0.082$$

Table 54 - Faktoren Mittelspannungsempfindlichkeit

Beschreibung	Faktor	Wert	FKM-Richtlinie
Konstante für Mittelspannungsempfindlichkeit	a_M	0.35	Tab 4.4.1
Konstante für Mittelspannungsempfindlichkeit	b_M	-0.1	Tab 4.4.1

$$K_{AK1} := \frac{1}{\left(1 + M_{\sigma} \cdot \frac{\sigma_{1m}}{\sigma_{1a}}\right)} = 1.017 \quad (4.4.9)$$

(4.4.11)

$$K_{AK2} := \frac{1}{\left(1 + M_{\sigma} \cdot \frac{\sigma_{2m}}{\sigma_{2a}}\right)} = 1.017$$

$$\sigma_{aw1} := \frac{\sigma_{1a}}{K_{AK1}} = -4.542 \times 10^7 \text{ Pa} \quad (4.4.5)$$

$$\sigma_{aw2} := \frac{\sigma_{2a}}{K_{AK2}} = -1.426 \times 10^7 \text{ Pa}$$

Betriebsfestigkeitsberechnung

$$\sigma_{\ddot{a}qu1} := \frac{\sigma_{aw1}}{K_{BK}} = -4.542 \times 10^7 \text{ Pa} \quad (4.4.28)$$

$$\sigma_{\text{äqu}2} := \frac{\sigma_{\text{aw}2}}{K_{\text{BK}}} = -1.426 \times 10^7 \text{ Pa}$$

Nachweis

Für ebene Spannungszustände ergibt sich der zyklische Auslastungsgrad zu:

$$a_{\text{BK}\sigma 1} := \frac{\frac{\sigma_{\text{äqu}1}}{\sigma_{\text{WK}\sigma 1}}}{j_d} = -0.254 \quad (4.6.3)$$

$$a_{\text{BK}\sigma 2} := \frac{\frac{\sigma_{\text{äqu}2}}{\sigma_{\text{WK}\sigma 2}}}{j_d} = -0.08$$

$$a_{\text{BK}\sigma V} := \sqrt{0.5 \left[\left(a_{\text{BK}\sigma 1} - a_{\text{BK}\sigma 2} \right)^2 + \left(a_{\text{BK}\sigma 2} \right)^2 + a_{\text{BK}\sigma 1}^2 \right]} = 0.225 \quad (4.6.18)$$

Der zyklische Auslastungsgrad beträgt 22.5 %.

6.3 Ergebnisse

Table 55 - Auslastungsgrade der Bauteile

Bauteil	Statischer Auslastungsgrad	Zyklischer Auslastungsgrad (Dauerfestigkeit)
Halblech	58.3 %	103.2 %
Rohr	50.2 %	102.9 %
Verbindungsstück	49.9 %	51.2 %
Gabelstück	19.8 %	30.4 %
Blech Wischblattaufnehmer	17.6 %	22.5 %

In Table 55 sind die statischen und zyklischen Auslastungsgrade der Bauteile zusammengefasst. Sowohl beim Rohr als auch bei dem Halblech betragen die zyklischen Auslastungsgrade knapp über 100 Prozent. Die tatsächliche Auslastung liegt aus den folgenden Gründen wahrscheinlich unter der hier errechneten Auslastung:

1) Konservative Wahl der Faktoren

Manche Faktoren wurden sehr konservativ gewählt, um zum Beispiel nicht lineare Vergleichsrechnungen zu vermeiden.

2) Einstufenkollektiv

Der Nachweis erfolgt unter der Annahme, dass der Wischerarm dauerhaft mit maximaler Belastung durch den Antriebsmotor, also 80 Nm, betrieben wird. Tatsächlich werden im realen Betrieb auch teilweise niedrigere Antriebsmomente herrschen.

Im später folgenden Prototypentest muss überprüft werden, ob das Rohr und das Halteblech den Belastungen wirklich standhalten oder ob die Konstruktion in einem nächsten Schritt weiter optimiert werden muss. Bei allen weiteren Bauteilen liegen die Belastungen deutlich unter der Auslastungsgrenze.

7 Prototypentest

Neuentwickelte Wischerarme werden, zusätzlich zu den Festigkeitsberechnungen, auf Prüfständen getestet. Dabei sind Prüfungen auf einem *Drehmomentprüfstand* (siehe Kapitel 7.1) sowie ein Testlauf auf einem *Scheibenprüfstand* vorgesehen. Während der Test auf dem Drehmomentprüfstand vorrangig die Dauerfestigkeit nachweisen soll, bekommt man auf dem Scheibenprüfstand (Dauer circa 6 Monate) durch weitere Einflüsse (Wischen auf trockener Scheibe, Wischen auf nasser Scheibe, Wischen auf gekrümmter Scheibe, Interaktion Wischerblatt – Scheibe), wichtige Erkenntnisse für den praktischen Einsatz. Etwaige negative Einflüsse durch Wind werden in einer Testfahrt auf einem Schienenfahrzeug individuell überprüft. Nach erfolgreicher Absolvierung des Drehmomentprüfstands erfolgt der Test auf der Scheibe. Da ein voller Test auf dem Drehmomentprüfstand rund 60 Tage dauert sowie aus Gründen der Testkapazitäten, wird nur der Drehmomentprüfstand in dieser Arbeit mit aufgenommen.

7.1 Drehmomentprüfstand

7.1.1 Zweck der Prüfung

Auf dem Drehmomentprüfstand wird der Hauptarm des Wischerarmes einer Biegewechsellast ausgesetzt. Auf diese Weise wird der Wischerarm mit dem festgelegten maximalen Antriebsmoment laut Pflichtenheft auf Dauerfestigkeit getestet. Da im tatsächlichen Betrieb das Moment meist geringer ausfallen wird, liegt die Konstruktion auf der sicheren Seite und gewährleistet somit die Erfüllung aller Festigkeitsanforderungen. Die Wöhlerlinie, welche die Abhängigkeit der Anzahl der ertragbaren Schwingspiele eines Materials, in Abhängigkeit der Spannungsamplituden beschreibt, knickt bei zwei Millionen Schwingspielen ab [14]. Somit gilt ein Bauteil nach unbeschädigten zwei Millionen Schwingspielen als dauerhaft. Natürlich können dennoch weiterhin Verschleiß, wie zum Beispiel das Ausschlagen einer Verbindung, auftreten. Aus diesen Gründen soll der Wischerarm mindestens fünf Millionen Schwingspiele ohne erkennbare Schäden ausführen können. In Figure 39 ist das qualitative Verhalten von metallischen Werkstoffen anhand der Wöhlerlinie dargestellt.

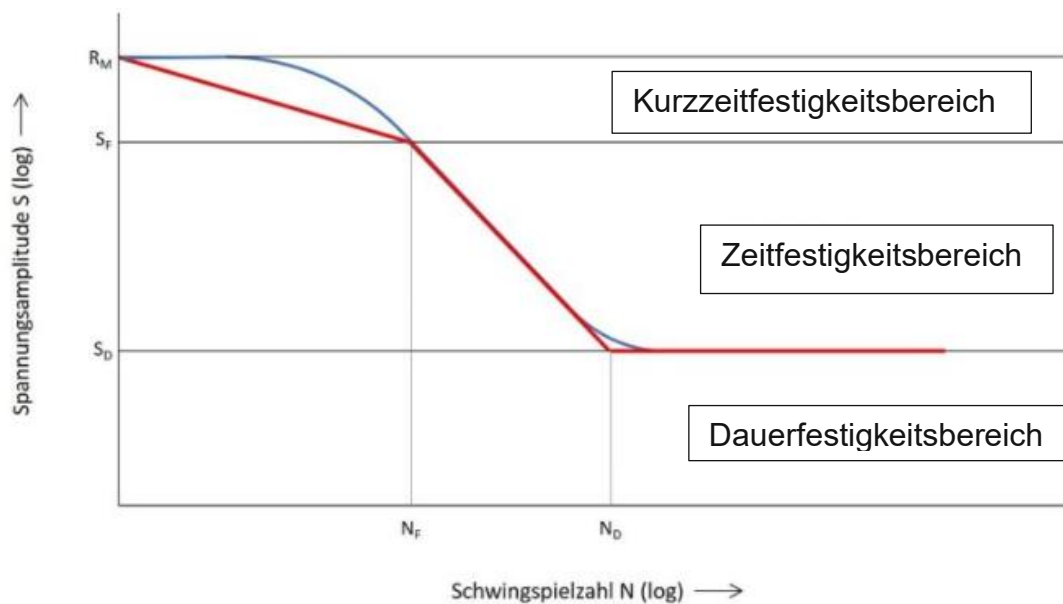


Figure 39 – Wohlerlinie qualitativ für metallische Werkstoffe [14]

7.1.2 Testaufbau

Über eine Antriebswelle wird ein Moment von 80 Nm auf den Arm aufgebracht. Der Klemmbock wird mit der Antriebswelle eines Elektromotors verbunden. Am anderen Ende des Armes wird das Gabelstück, das sonst als Aufnahme für das Wischerblatt dient, mit einer Linearführung verbunden, sodass lediglich eine Bewegung in Richtung der Achse des Armes möglich ist. Auf diese Weise erfährt der Wischerarm eine Biegung. In Figure 40 ist der auf dem Prüfstand eingespannte Arm dargestellt. In Figure 41, Figure 42 und Figure 43 sind die beiden Enden des Armes genauer zu erkennen, wobei in Figure 43 zu erkennen ist, dass aus Verfügbarkeitsgründen anstelle der Nietverbindung vorübergehend eine Schraubverbindung eingesetzt wird.



Figure 40 – Drehmomentprüfstand

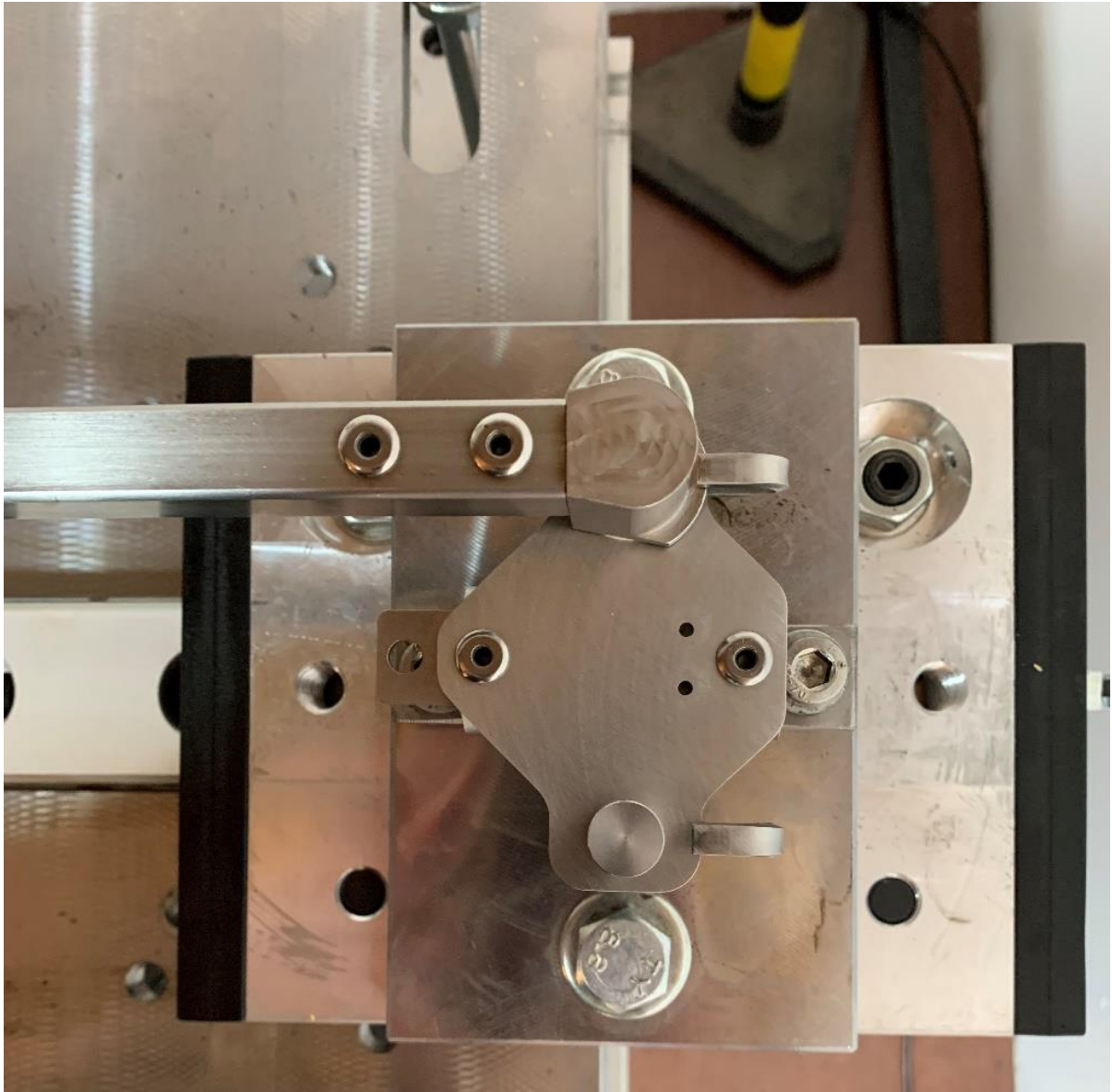


Figure 41 - Gabelstück verschraubt mit Linearführung



Figure 42 - Baugruppe Wischblattaufnehmer

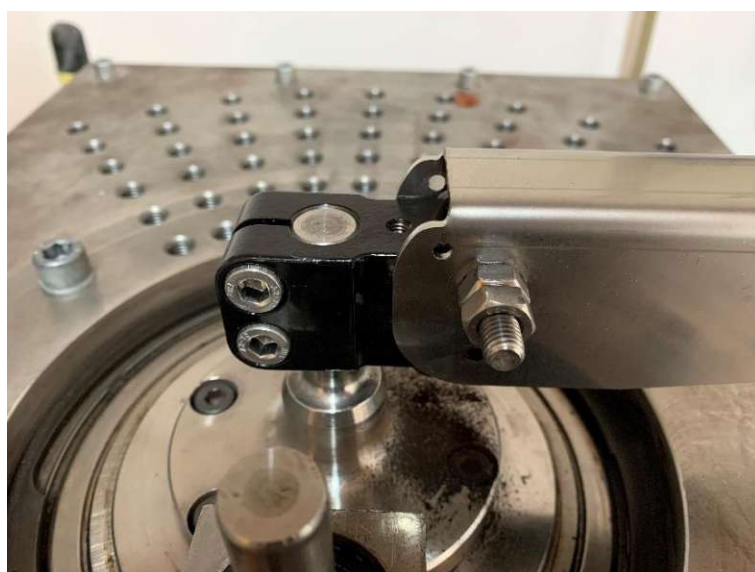


Figure 43 - Klemmbock mit Antriebswelle verbunden

Mit einer Frequenz von zwei Hertz wird die Welle ausgelenkt. In Table 56 sind die Daten der Prüfung zusammengefasst. Ziel ist es, 5 Millionen Doppelhübe ohne Schäden zu ertragen.

Table 56 - Prüfungsdaten

Testlauf 1	
Doppelhübe geplant	5000000
Frequenz	2 Hz
Amplitude	80 Nm
Grenzwert Drehwinkel	20 °
Prüfung Start	26.5.2022
Prüfung Ende (wegen Versagen)	30.5.2022
Erreichte Doppelhübe	425922

7.1.3 Ergebnis Testlauf 1

Nach rund 420000 Doppelhüben, das entspricht einer Laufzeit von 58.3 Stunden, ist das Rohr gebrochen. Das Versagen ist im Bereich des ersten Nietloches am Rohr aufgetreten. In Figure 44 ist die Bruchstelle abgebildet. Das Versagen an dieser Stelle stimmt mit den kritischen Auslastungsgraden, welcher der FKM-Nachweis ergeben hat, überein. Aus Kostengründen sollte dennoch überprüft werden, ob die Konstruktion mit geradem Blech den Belastungen standhält. Durch das gerade Halteblech erhalten das Rohr und die Niete keine seitliche Unterstützung. Somit wird die gesamte Belastung des Antriebsmoments von den Niete aufgenommen werden, was wiederum zu hohen Spannungen rund um die Nietbohrungen führt. Mögliche Konstruktionsoptimierungen, in denen das Rohr seitlich unterstützt wird, müssen daher in Betracht gezogen werden und werden Kapitel 7.4 dargelegt.

Die restlichen neuen Komponenten zeigen bis zum Zeitpunkt des Versagens des Rohres keine erkennbaren Ermüdungserscheinungen.



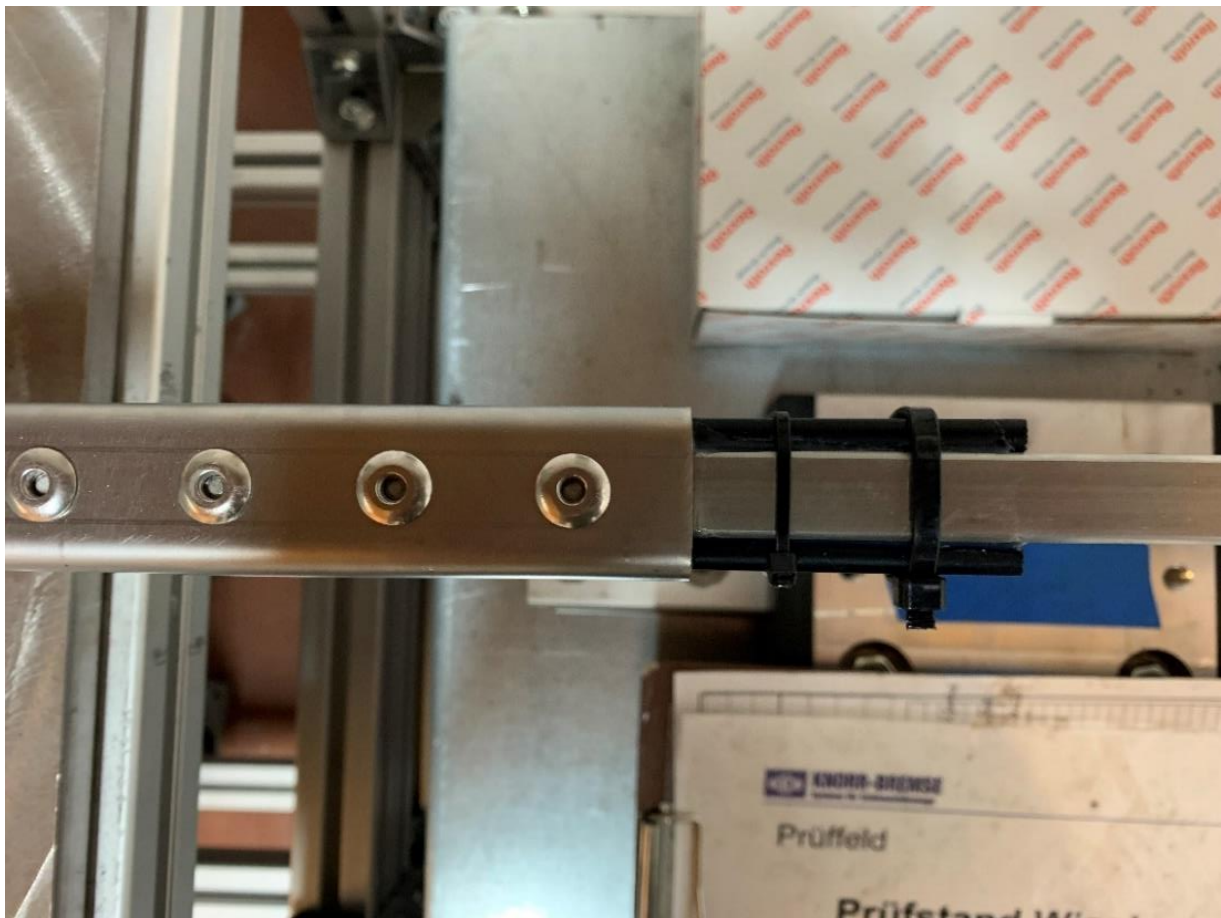
Figure 44 - Bruchstelle

7.1.4 Test mit provisorischer seitlicher Unterstützung

In Kapitel 7.2.1 wird eine Optimierung des Halteblechs vorgeschlagen. Auf diese Weise soll die kritische Versagensstelle entschärft werden. Diese Optimierung stellt eine Änderung des Fertigungsverfahrens und des Lieferanten dar. Bis zur Anlieferung des neuen Bauteiles können mehrere Monate vergehen und daher wird für einen weiteren Test auf dem Drehmomentprüfstand eine provisorische seitliche Unterstützung geschaffen. Zu diesem Zweck werden zwei Edelstahl-Bleche mit einer Breite von 5 mm und Länge von jeweils 14 cm seitlich eingepresst. Um ein komplettes Loslösen der Bleche während der Prüfung zu verhindern, werden diese mit zwei Kabelbindern gesichert. Dadurch soll eine seitliche Unterstützung des vorderen Nietes, und somit eine Entlastung der Bruchstelle, simuliert werden. Zudem kann die gleiche Wischblattaufnehmer-Baugruppe wie beim ersten Test verwendet werden und dessen Bauteile somit fortgesetzt überprüft werden. In Figure 45 ist die provisorische Unterstützung dargestellt.

Table 57 - Prüfungsdaten Rohr mit provisorischer Unterstützung

Testlauf 2	
Doppelhübe geplant	10000000
Frequenz	3 Hz
Amplitude	80 Nm
Grenzwert Drehwinkel	20 °
Prüfung Start	7.6.2022
Prüfung Ende	4.8.2022
Erreichte Doppelhübe	10000000


Figure 45 – provisorische seitliche Unterstützung

7.2 Ergebnisse / Konstruktionsoptimierungen

7.2.1 Unterstützung des Rohres durch das Halteblech

Damit das Halteblech als möglichst einfaches Biegeteil gefertigt werden kann, wurde es als gerades Biegeblech konstruiert (siehe Kapitel 3.4). Da allerdings die Berechnungen eine kritische Auslastung gezeigt haben und das Rohr während der

Prüfung auf dem Drehmomentprüfstand gebrochen ist, muss die Konstruktion in diesem Bereich optimiert werden. Eine deutliche Entlastung der kritischen Stelle soll durch eine seitliche Unterstützung des Rohres durch das Halteblech erfolgen. Durch die seitliche Unterstützung wird die Belastung durch das Drehmoment nicht mehr allein von den Nieten aufgenommen und der kritische Bereich um die Nietbohrung wäre somit entschärft. Der Nachteil davon ist, dass das Halteblech eine kompliziertere Geometrie erhalten würde und dadurch teurer in der Fertigung sein würde. Ein unterstützendes Halteblech würde zuerst gerade mit der Breite des Klemmbocks beginnen, sich anschließend auf die Breite des Rohres verjüngen und dieses somit seitlich unterstützen. Durch die zweifache Winkeländerung der Seitenflächen müsste vom Fertigungsverfahren „Biegen“ auf das Verfahren „Tiefziehen“ umgestellt werden.

Konstruktionsveränderungen Halteblech

Das optimierte Halteblech verjüngt sich von der Klemmbockbreite auf die Breite des Rohres und läuft dem Rohr entlang weiter. Zudem wird das Halteblech verlängert, um eine bessere Unterstützung zu erlangen. Es erfolgt eine Umfaltung der Seitenwände des Halteblechs um das Rohr, so dass die Zugbelastung im Nietbereich minimiert wird.

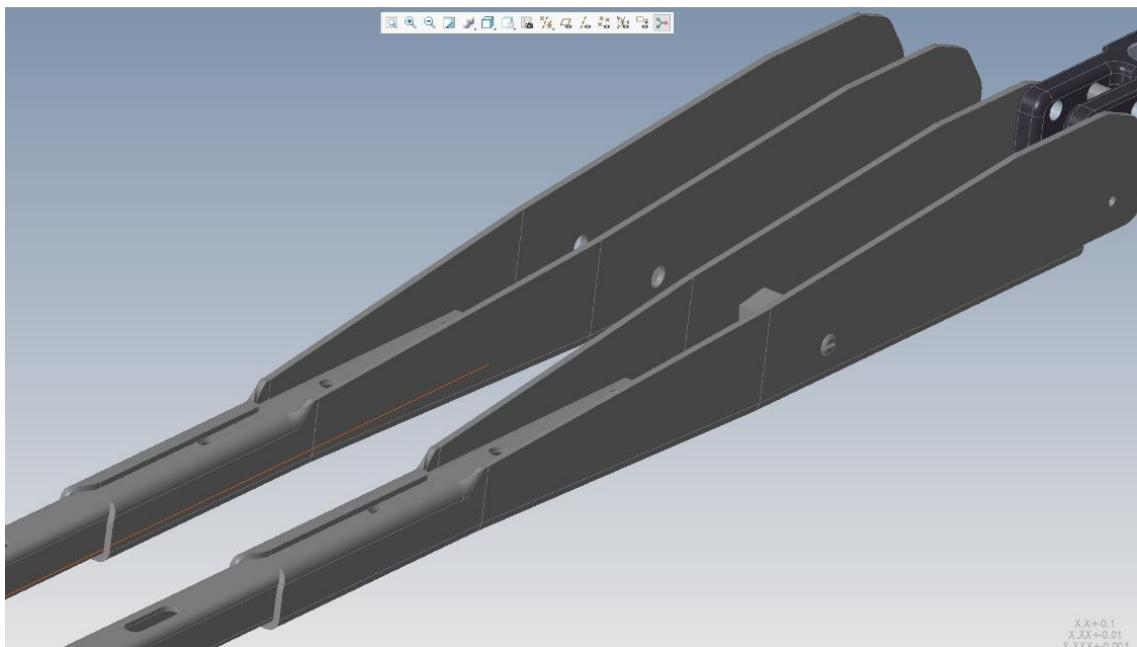


Figure 46 - Halteblech optimiert

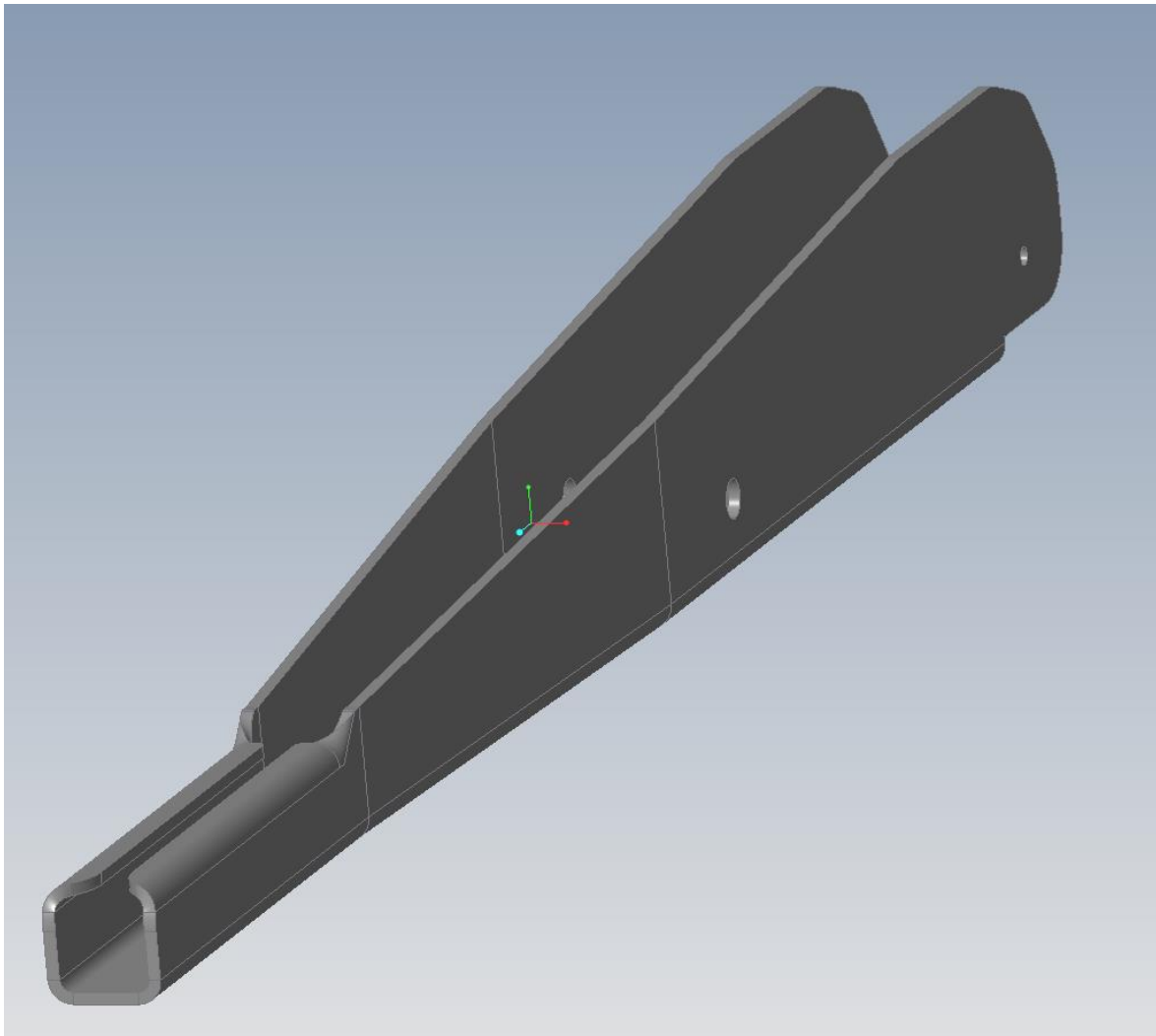


Figure 47 - Halteblech optimiert (Darstellung ohne Rohr)

In Figure 46 und in Figure 47 ist ein Modell der geplanten Optimierungen dargestellt, wobei in Figure 47 zur besseren Erkennbarkeit das Rohr ausgeblendet wurde.

In weiterer Folge soll diese Option genauer untersucht werden. Dazu wird das Halteblech angepasst. Anschließend soll in einer FE-Analyse verifiziert werden, dass die kritischen Stellen des Rohres entschärft wurden und im Halteblech keine neuen kritischen Stellen entstanden sind. Danach kann erneut ein Test auf dem Drehmomentprüfstand durchgeführt werden. Da die Vorgehensweise bei FE-Analyse und FKM-Nachweis analog zu Kapitel 4 und Kapitel 5 ist, werden lediglich die Ergebnisse nachfolgend zusammengefasst.

Ergebnisse der Analyse der Optimierung

Die FE-Analyse hat ergeben, dass die seitliche Unterstützung eine gute Entlastung der Nietbohrungen gewährleistet. Rund um die Bohrungen sind keine Spannungsspitzen

mehr zu erkennen. Die kritische Stelle des Rohres hat sich von der Bohrung zu der Übergangsstelle Rohr – Halteblech hin verschoben.

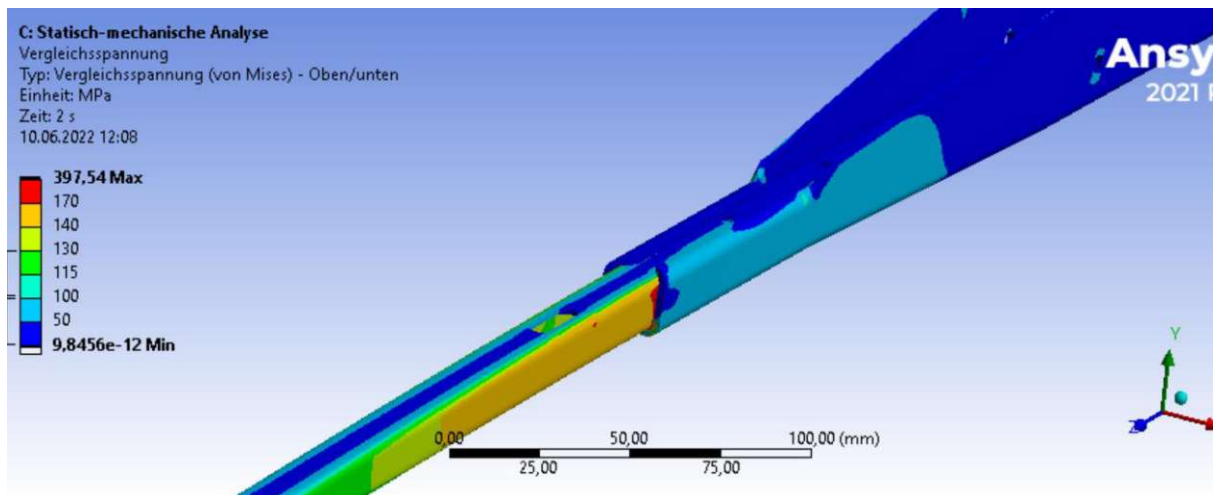


Figure 48 – Vergleichsspannung

In Figure 48 ist die Stelle, rot eingefärbt, zu erkennen. Die dort auftretenden Spannungskennwerte sind in Table 58 aufgelistet. Die in Figure 48 erkennbare maximale Vergleichsspannung tritt allerdings an der singulären Einspannstelle auf. Der FKM-Nachweis, mit konservativ gewählten Faktoren, hat eine zyklische Auslastung von 1 ergeben. Dies zeigt immer noch eine starke Belastung des Rohres, gilt allerdings als Nachweis für Dauerfestigkeit mit einem Sicherheitsfaktor von 1.3. Zudem wurden diese Spannungskennwerte an der Kontaktstelle Halteblech-Rohr ermittelt, an der große Spannungsspitzen zu erwarten sind.

Ergebnisse Testlauf 2 (provisorische Unterstützung)

Der Testlauf mit seitlicher Unterstützung, und damit entlasteter Nietbohrungen, ist erfolgreich verlaufen. Der Arm hat 10000000 Schwingspiele ohne Schäden überstanden und weist keine erkennbaren Ermüdungserscheinungen auf. Alle Verbindungen sind intakt und weisen nur geringe Verschleißerscheinungen auf. In weiterer Folge wird, ein Test mit dem optimierten, unterstützenden Halteblech durchgeführt. Aus zeitlichen Gründen kann dieser Test nicht mehr in dieser Arbeit behandelt werden.

Table 58 - Spannungskennwerte Rohr mit optimiertem Blech

Rohr	Spannungskennwerte [MPa]
Vergleichsspannung max.	150
Amplitude 1.Hauptspannung	153.5
Mittelwert 1. Hauptspannung	-0.5
Amplitude 2.Hauptspannung	2.2
Mittelwert 2.Hauptspannung	-4.6

Table 59 - Ergebnisse FKM

	Statischer Auslastungsgrad	Zyklischer Auslastungsgrad
Rohr	0.79	1.0

In Table 58 und 59 sind die Ergebnisse der FE-Analyse und des FKM-Nachweises zusammengefasst.

8 Kostenanalyse

In diesem Kapitel wird eine Kostenanalyse durchgeführt und ein Überblick über mögliche benötigte Investitionen gegeben. Zweck dieser Kostenanalyse ist es, zu überprüfen, ob die internen Kostenvorgaben erreicht wurden. Die Kostenberechnung umfasst die Materialkosten-, Kosten für die Montage sowie Kosten für die Lackierung. In den folgenden Absätzen wird dargelegt, welche Faktoren in die interne Kostenberechnung einfließen. Für neues Werkzeug, welches für die Fertigung angeschafft werden muss, wird intern eine Investitionsrechnung durchgeführt.

8.1 Kostenanalyse

8.1.1 Material

Für die Berechnung der Materialkosten wird die Stückliste des Wischerarmes herangezogen. Die Preise für die einzelnen Posten wurden durch Anfragen an Lieferanten sowie durch unternehmensinterne Datenbanken ermittelt. Zu einem späteren Zeitpunkt wird durch die Einkaufsabteilung ein genauerer Preis ermittelt. Es wird der Materialpreis für einen kompletten Wischerarm, bestehend aus zwei Armen, berechnet. Um Mengeneffekte miteinzubeziehen, werden die Kosten sowohl für 1 als auch für 250 Stück analysiert. Die Preise wurden im Zeitraum Mai – Juli 2022 ermittelt. Pro Jahr sollen in Zukunft rund 1000 Stück hergestellt werden.

8.1.2 Montage

Für die Ermittlung der Montagekosten wird die Arbeitszeit herangezogen und mit dem Stundensatz multipliziert, wobei der Zeitaufwand für die Montage vorerst konservativ geschätzt wird. Aufwände für benötigtes Werkzeug werden in Kapitel 8.2 berücksichtigt. Die Montagezeit wird vorerst auf 0.7 Stunden festgesetzt.

8.1.3 Lackierung

Der Wischerarm erhält eine Lackierung die als Blendschutz dient. Ohne diese könnte der Triebfahrzeugführer/Lokführer vom blanken Edelstahl geblendet werden. Es ist noch nicht festgelegt, in welchem Montagezustand die Lackierung erfolgen wird. Daher können aktuell keine genauen Kosten für die Lackierung angefragt werden. Aktuell wird ein Pauschalbetrag für diesen Posten aufgerechnet.

8.1.4 variable Kosten je Stück

Durch Addierung der Posten Material, Montage und Lackierung erhält man die variablen Kosten je Parallelwischerarm, gerechnet auf eine Bestellmenge von 250 Stück. Die variablen Kosten je Stück befinden sich im vorgegebenen Rahmen.

8.2 Investitionsausgaben

Für Neuanschaffungen, insbesondere Werkzeug, werden die Investitionsausgaben analysiert. Dabei müssen für drei Produktionsschritte neues Werkzeug gekauft werden. Für das Setzen der Blindnieten, ein passender Stempel für das Kragenziehen sowie eine Vorrichtung für das Umfalzen des neuen Halteblechs müssen Neuanschaffungen getätigt werden. Die Kosten für diese Werkzeuge werden von der Einkaufsabteilung ermittelt, sobald der Wischerarm in die Serienproduktion übergeht.

Nietpistole

Für das Setzen der Blindnieten wird eine zusätzliche Druckluft-Nietzange benötigt.

Stempel Kragenziehen

Der Kragen entsteht durch das Einpressen eines Stempels in das Halteblech in die Hülse innerhalb des Klemmbocks. Angeschafft werden muss ein passender Stempel für die Presse.

Vorrichtung Umfalzung

Das Umfalzen des Blechs geschieht in einer eigenen Vorrichtung.

8.3 Überlegungen zur Kostenoptimierung

8.3.1 Übergang zu Gussteil

Bewährt sich das Konzept und die Bauweise eines Bauteiles, kann die Umstellung auf Guss anstelle von Fräsen, in der Serienproduktion kostentechnisch vorteilhaft sein. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass keine weiteren Optimierungsschritte nötig werden. Daher sollen die Bauteile erst unter realen Bedingungen erprobt und neue Erkenntnisse eventuell in einem weiteren Optimierungsschritt eingearbeitet werden. Im Falle des Wischerarmes kommt das Verbindungsstück für die Fertigung als Gussteil in Frage.

9 Diskussion und Ausblick

An dieser Stelle werden die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst und kritisch beleuchtet. Zudem wird aufgezeigt, welche weiteren Schritte bis zum fertigen Produkt erfolgen müssen, die aus verschiedenen Gründen in dieser Arbeit nicht durchgeführt wurden.

9.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

In der vorliegenden Arbeit wurde auf Basis vorhandener Konstruktionen und dem Pflichtenheft ein neuer Wischerarm entwickelt. Zuerst wurde aufbauend auf das Pflichtenheft ein Konzept erstellt und ein Wischerarm in einem 3D-CAD Programm modelliert und ausgelegt. Im Anschluss wurden numerische und analytische Berechnungen durchgeführt, in welchen die Konstruktion auf kritische Stellen hin untersucht wurde. Parallel dazu fand ein Prototypentest auf einem Drehmomentprüfstand statt um die Berechnungen zu verifizieren und Problemstellen aufzudecken. In diesem Prototypentest wurde klar, dass die erste Iteration des Halblechs optimiert werden musste. Aus Gründen der Zeit und des Aufwandes sind nicht alle Schritte bis zum fertigen Produkt in dieser Arbeit enthalten. Weitere nötige Schritte werden in Kapitel 10.3 besprochen.

9.2 Diskussion der Ergebnisse

Hauptziel der Weiterentwicklung war es, die Komplexität der Montage zu reduzieren. Durch den Einsatz von anderen Verbindungstechnologien (Blindnieten, Kragenziehen) und Fertigungstechnologien (Tiefziehen) konnte dieses Ziel erreicht werden. Vor allem die Verwendung von Blindnieten anstelle einer Schweißverbindung vereinfacht die Montage des Armes deutlich. Zudem erfüllt der Wischerarm die festgelegten Vorgaben bezüglich Lebensdauer und Kosten. Der Wischerarm ist für verschieden große Scheiben einsetzbar, wobei lediglich die Länge des Rohres variiert. Auf diese Weise können Stückzahleneffekte ausgenutzt werden.

Ein wichtiger Schritt in der Validierung der neuen Konstruktion wurde in dieser Arbeit nicht durchgeführt und kann bisher unbekannte Problemstellen aufzeigen: ein Test auf einem Scheibenprüfstand, welcher circa 6 Monate in Anspruch nimmt. Durch einen

solchen Test kann durch die Interaktion mit der Scheibe weiteres Optimierungspotential, abseits von Festigkeitsaspekten, aufgezeigt werden.

9.3 Weitere Schritte zur Weiterentwicklung

Wie bereits erwähnt, soll als nächster Schritt, außerhalb dieser Arbeit, ein Test auf einer Scheibe durchgeführt werden. Ebenso muss zu einem späteren Zeitpunkt in Betracht gezogen werden, das Verbindungsstück als Gussteil zu fertigen und somit in der Serienproduktion die Kosten damit zu senken. Des Weiteren kann bei verschiedenen Bauteilen, wie etwa dem Blech Wischblattaufnehmer, dem Gabelstück und dem Rohr weitere Gewichtsoptimierungen, etwa mittels Topologieoptimierung, durchgeführt werden.

10 Literaturverzeichnis

- [1] D.-N. F. u. S. (FSF), „DIN 5566 - 2 Schienenfahrzeuge - Führerräume - Teil 2: Zusatzanforderungen an Schienenfahrzeuge“, DIN - Normenausschuss, 2020.
- [2] K.-B. AG, „Systeme für Schienenfahrzeuge“, 2022. [Online]. Available: <https://rail.knorr-bremse.com/de/fr/produkte/wisch-waschsysteme/>. [Zugriff am 14.06.2022].
- [3] T. Nacsá, Optimierung eines Wischerarmes für Schienenfahrzeuge, Wien, 2020.
- [4] „Ansys“, 17.5.2022. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/de-de/news-center/press-releases/ansys-2021-r2-accelerates-engineering-exploration-collaboration-automation>.
- [5] P. Fröhlich, FEM-Anwendungspraxis, Wiesbaden: Vieweg, 2005, p. 45.
- [6] A. Inc., „Ansys Help“, 2022. [Online]. Available: ansyshelp.ansys.com. [Zugriff am 22.5.2022].
- [7] M. Miesgang, Automatisierte FE-Berechnung von Sandkästen, Wien, 2018.
- [8] M. Miesgang, Automatisierte FE-Berechnung von Sandkästen, Wien, 2018, p. 111.
- [9] C. Schulz und A. Goedeke, „Finite Elemente Methode Praktikum“, 17.5.2019. [Online]. Available: https://www.hs-anhalt.de/fileadmin/Dateien/FB6/personen/goedeke_a/FEM_I/FEM-Praktikum-03-Biegebalken_2.pdf. [Zugriff am 2022].
- [10] M. Wächter, C. Müller und A. Esderts, Angewandter Festigkeitsnachweis nach FKM-Richtlinie, Springer Vieweg, 2021.
- [11] P. Fröhlich, FEM-Anwendungspraxis, Wiesbaden: Vieweg, 2005, p. 83.
- [12] H. Wittel, C. Spura und D. Jannasch, Maschinenelemente, Springer Vieweg, 2021.
- [13] F. M. e. (FKM), Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile, Frankfurt/Main: VDMA, 2020, pp. 3-5.

- [14] M. Lork und A. Hanke, „Ingenieurbüro Andreas Hanke,“ 24. 1. 2020. [Online]. Available: <https://www.ing-hanke.de/know-how/woehlerkurve/>. [Zugriff am 30. 06. 2022].

11 Abbildungsverzeichnis

Figure 1 – Scheibenwischanlage [2].....	2
Figure 2 - Baugruppe Halteblech.....	3
Figure 3 - Baugruppe Arm	4
Figure 4 - Baugruppe Wischblattaufnehmer	4
Figure 5 – Parallelwischerarm [2]	5
Figure 6 – Rundrohrwischerarm	6
Figure 7 – Gelenksverbindung.....	12
Figure 8 - fertige Gelenksverbindung.....	12
Figure 9 - Verbindung Verbindungsstück - Blech Wischblattaufnehmer	13
Figure 10 - Halteblech	15
Figure 11 - Verbindungsstück mit eingepresster Lagerbuchse.....	16
Figure 12 - Blech Wischblattaufnehmer.....	17
Figure 13 - Baugruppe Wischblattaufnehmer	19
Figure 14 - Geometrievorbereitung Nietverbindung am Halteblech.....	20
Figure 15 - Kontakt Bolzen-Blech Wischblattaufnehmer und Kontakt Lagerbuchse Bolzen.....	21
Figure 16 - Kontakt Buchsenbund-Blech Wischblattaufnehmer.....	21
Figure 17 - Externe Kraft (mittig am Gabelstück) und Nietmodellierungen	24
Figure 18 - Baugruppe Wischblattaufnehmer mit Koordinatensystem.....	24
Figure 19 - Fixierte Lagerung	25
Figure 20 - Vernetzung Halteblech	26
Figure 21 - Koordinatensystem SP1 (KS an linker Seitenfläche des rechten Halteblechs).....	27
Figure 22 - Koordinatensystem SP2 (im Bereich der Nietverbindung im Rohrinne- ren).....	27
Figure 23 - Koordinatensystem SP3 (im Bereich der Nietverbindung am Verbindungsstück).....	27
Figure 24 - Vergleichsspannung Halteblech.....	31
Figure 25 - Detailausschnitt Vergleichsspannung Halteblech.....	31
Figure 26 - Vergleichsspannung Rohr	32
Figure 27 - Detailausschnitt Vergleichsspannung Rohr.....	32
Figure 28 - Vergleichsspannungen Verbindungsstück.....	33
Figure 29 - Vergleichsspannung Blech Wischblattaufnehmer	33
Figure 30 - Vergleichsspannung Gabelstück.....	34
Figure 31 - Bezogenes Spannungsgefälle [10].....	35
Figure 32 - hochbeanspruchte Fläche Halteblech	36
Figure 33 - hochbeanspruchte Fläche - Rohr	37

Figure 34 - hochbeanspruchte Fläche Verbindungsstück.....	38
Figure 35 - hochbeanspruchte Fläche Blech Wischblattaufnehmer.....	38
Figure 36 - hochbeanspruchte Fläche Gabelstück	39
Figure 37 - Von-Mises Vergleichsspannung Rohr	44
Figure 38 - Bezogenes Spannungsgefälle [13].....	49
Figure 39 – Wöhlerlinie qualitativ für metallische Werkstoffe [14].....	80
Figure 40 – Drehmomentprüfstand	80
Figure 41 - Gabelstück verschraubt mit Linearführung	81
Figure 42 - Baugruppe Wischblattaufnehmer	82
Figure 43 - Klemmbock mit Antriebswelle verbunden.....	82
Figure 44 - Bruchstelle.....	84
Figure 45 – provisorische seitliche Unterstützung	85
Figure 46 - Halteblech optimiert.....	86
Figure 47 - Halteblech optimiert (Darstellung ohne Rohr).....	87
Figure 48 – Vergleichsspannung	88

12 Tabellenverzeichnis

Table 1 - allgemeine Anforderungen	7
Table 2 - Umgebungsanforderungen	9
Table 3 - Übersicht Verbindungen	11
Table 4 – definierte Kontakte	20
Table 5 - Verbindungen	22
Table 6 - Aufgebrachte Lasten	24
Table 7 - Netzeinstellungen	28
Table 8 - Konvergenzstudie	29
Table 9 - Konvergenzstudie	29
Table 10 - Kennwerte für FKM - Halteblech	36
Table 11 - Kennwerte für FKM - Rohr	37
Table 12 - Kennwerte für FKM Verbindungsstück	37
Table 13 - Kennwerte für FKM Blech Wischblattaufnehmer	38
Table 14 - Kennwerte für FKM Gabelstück	39
Table 15 - Faktoren Bauteil-Normwerte	45
Table 16 - Faktoren Sicherheit	46
Table 17 - Spannungskennwerte Rohr	47
Table 18 - Faktoren Werkstofffestigkeit	48
Table 19 - Faktoren Stützzahl	48
Table 20 - Spannungskennwerte für bez. Spannungsgefälle	50
Table 21 - Faktoren Konstruktion	50
Table 22 - Faktoren Mittelspannungsempfindlichkeit	51
Table 23 - Faktoren Werkstofffestigkeit	54
Table 24 - Faktoren Sicherheit	54
Table 25 - Spannungskennwerte Rohr	55
Table 26 - Faktoren Werkstofffestigkeit	55
Table 27 - Faktoren Stützzahl	56
Table 28 - Spannungskennwerte für bez. Spannungsgefälle	57
Table 29 - Faktoren Konstruktion	57
Table 30 - Faktoren Mittelspannungsempfindlichkeit	58
Table 31 - Faktoren Werkstofffestigkeit	60
Table 32 - Faktoren Sicherheit	60
Table 33 - Spannungskennwerte Rohr	61
Table 34 - Faktoren Werkstofffestigkeit	61
Table 35 - Faktoren Stützzahl	62
Table 36 - Spannungskennwerte für bez. Spannungsgefälle	63
Table 37 - Faktoren Konstruktion	63
Table 38 - Faktoren Mittelspannungsempfindlichkeit	64
Table 39 - Faktoren Werkstofffestigkeit	66

Table 40 - Faktoren Sicherheit	66
Table 41 - Spannungskennwerte Rohr	67
Table 42 - Faktoren Werkstofffestigkeit	67
Table 43 - Faktoren Stützzahl.....	68
Table 44 - Spannungskennwerte für bez. Spannungsgefälle	69
Table 45 - Faktoren Konstruktion	69
Table 46 - Faktoren Mittelspannungsempfindlichkeit.....	70
Table 47 - Faktoren Werkstofffestigkeit	72
Table 48 - Faktoren Sicherheit	72
Table 49 - Spannungskennwerte Rohr	73
Table 50 - Faktoren Werkstofffestigkeit	73
Table 51 - Faktoren Stützzahl.....	74
Table 52 - Spannungskennwerte für bez. Spannungsgefälle	74
Table 53 - Faktoren Konstruktion	75
Table 54 - Faktoren Mittelspannungsempfindlichkeit.....	76
Table 55 - Auslastungsgrade der Bauteile.....	77
Table 56 - Prüfungsdaten	83
Table 57 - Prüfungsdaten Rohr mit provisorischer Unterstützung	85
Table 58 - Spannungskennwerte Rohr mit optimiertem Blech.....	89
Table 59 - Ergebnisse FKM.....	89

13 Abkürzungsverzeichnis

bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer Aided Design
€	Euro
DIN	Deutsches Institut für Normung
FE	Finite Elemente
FKM	Forschungskuratorium Maschinenbau
etc.	et cetera
h	Stunde
ISO	International Organization for Standardization
max.	maximal
z.B.	zum Beispiel