



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna | Austria



**Diplomarbeit**

# **Konzeptionierung funktioneller Akzeptanzkriterien für Kontaminationen in einem Hydrauliksystem**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades einer Diplom-  
Ingenieurin (Dipl. Ing. oder DI), eingereicht an der TU Wien, Fakultät für  
Maschinenwesen und Betriebswissenschaften, von

**Miriam Katharina SCHMID**

Matr.Nr.: 12035750

unter der Leitung von

**Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. sc. nat. Philipp J. Thurner**

Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik

und

**Dipl.-Ing. Dr. techn. Harald Sima**

Otto Bock Healthcare Products GmbH

Wien, Mai 2023

---

Miriam Schmid

# Eidesstattliche Erklärung

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

## Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die vorgelegte Arbeit mit geeigneten und dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden Mitteln (Plagiat-Erkennungssoftware) elektronisch-technisch überprüft wird. Dies stellt einerseits sicher, dass bei der Erstellung der vorgelegten Arbeit die hohen Qualitätsvorgaben im Rahmen der geltenden Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis „Code of Conduct“ an der TU Wien eingehalten wurden. Zum anderen werden durch einen Abgleich mit anderen studentischen Abschlussarbeiten Verletzungen meines persönlichen Urheberrechts vermieden.

Wien, Mai 2023

---

Miriam Schmid

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr. Philipp Thurner danke ich für die hilfreichen Kommentare und die Übernahme der Betreuung meiner Diplomarbeit seitens der Technischen Universität Wien.

Ich möchte mich herzlichst bei allen Mitarbeitern der Firma Otto Bock bedanken, die mir bei der Erstellung dieser Arbeit zur Seite gestanden sind und mich in ihre Gemeinschaft aufgenommen haben. Die Zusammenarbeit mit verschiedensten Fachabteilungen innerhalb des Unternehmens war äußerst lehrreich. Ganz besonderer Dank gilt dabei meinen beiden Firmenbetreuern, Michael Ferry Kornfeind und Dr. Harald Sima. Deren langjährige Berufserfahrung sowie ihre volle Unterstützung während des Projekts waren für diese Arbeit ebenso wichtig wie deren Ideen, die in zahlreichen fachspezifischen Diskussionen entstanden sind.

Abschließend will ich all jenen Menschen danken, die mich während meiner Studienzeit begleitet und unterstützt haben. Dazu gehören unter anderem meine Studienkollegen und meine Freunde, sowie nicht zuletzt meine liebe Familie. Insbesondere möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die immer und überall auf meinem bisherigen Lebensweg hinter mir standen und die mir durch ihre Unterstützung das Studium und diese Arbeit überhaupt erst ermöglicht haben.

# Kurzfassung

Die technische Sauberkeit von Bauteilen ist heute nicht mehr Kür, sondern Pflicht. Bereits geringfügige Fremdkontaminationen stellen ein erhöhtes Qualitäts- und Funktionsausfallrisiko für beispielsweise Hydraulikkomponenten und Getriebeelemente dar. Zur Minimierung dieses Risikos ist es notwendig Grenzwerte für Fremdkontaminationen in einer Sauberkeitsspezifikation festzulegen. Unter dem Begriff Fremdkontaminationen werden sämtliche Verunreinigung eines Systems durch fremde Substanzen, wie beispielsweise Partikel oder Fasern, zusammengefasst. Ziel dieser Diplomarbeit ist es, Akzeptanzkriterien für Hydraulikkomponenten und -bauteile eines Mikroprozessor-Prothesenkniegelenks zu erarbeiten. Dazu wird im ersten Schritt eine Sauberkeitsanalyse der Hydraulik-Bauteile durchgeführt. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse über die vorliegende Kontamination im System, werden repräsentative Fremdkontaminationen ausgewählt. Durch gezielte Einbringung dieser Fremdkontaminationen in das vorab gereinigte Hydrauliksystem kann ein definierter Reinheitszustand hergestellt werden. Zur Ermittlung des maximal zulässigen Verschmutzungsgrades werden anschließend Funktionsprüfungen mit mehreren Systemen unterschiedlich starker Kontaminationslevels durchgeführt. Die Ergebnisse der Prüfungen bilden die Grundlage zur Definition einer Sauberkeitsspezifikation.

## Abstract

The importance of technical cleanliness of components has increased significantly over the last years in many sectors of industry. Even minor foreign contamination poses an increased risk of quality and functional failure, for example for hydraulic components or transmission elements. To minimize this risk, it is necessary to define threshold values for foreign contamination in a cleanliness specification. The term foreign contamination covers all contamination of a system by foreign substances, such as fibers or particles. The aim of this diploma thesis is to derive acceptance criteria for parts and components of a hydraulic system of a microprocessor-prosthesis knee joint. For this purpose, a cleanliness analysis of the hydraulic components is performed in the first step. Based on the knowledge gained about the existing contamination in the system, representative contamination particles are chosen. By selectively introducing foreign contaminants into the previously cleaned hydraulic system, a defined cleanliness condition can be generated. To determine the maximum permissible contamination level, functional hydraulic tests are carried out with several systems of different contamination levels. The results of the tests serve as a basis for defining a cleanliness specification.

# Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung .....	I
Danksagung .....	II
Kurzfassung.....	III
Abstract .....	IV
Inhaltsverzeichnis .....	V
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	1
1.2 Problemstellung und Ausgangssituation.....	2
1.3 Ziel und Vorgehensweise .....	3
1.4 Aufbau der Arbeit.....	4
<b>2 Grundlagen der Hydraulik und der technischen Sauberkeit .....</b>	<b>5</b>
2.1 Hydrauliksysteme .....	5
2.2 Kontaminationen.....	9
2.2.1 Definition .....	9
2.2.2 Schädigungspotential von Partikeln .....	10
2.2.3 Hydrauliköl-Kontamination .....	11
2.3 Technische Bauteilsauberkeit.....	13
2.3.1 Definition und Problemstellung .....	13
2.3.2 VDA 19 – Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie .....	13
2.3.2.1 Auswahl der Prüfmethode .....	14
2.3.2.2 Component Cleanliness Code .....	17
<b>3 Praktische Vorgehensweise .....</b>	<b>20</b>
3.1 Sauberkeitsanalyse und Reinigung .....	20
3.1.1 Analysemethode .....	23
3.1.1.1 Extraktionsverfahren.....	23
3.1.1.2 Filtration.....	25
3.1.1.3 Analyseverfahren .....	26
3.1.2 Ergebnisse .....	27
3.1.3 Reinigung der Bauteile.....	33
3.2 Betrachtung mittels Mikro-Computertomographie .....	34
3.3 Montage der Hydrauliksysteme .....	39
3.4 Fremdkontaminationen.....	40
3.4.1 Auswahl der Kontaminationspartikel .....	40
3.4.2 Festlegung der verschiedenen Kontaminationszustände.....	42

3.4.3	Einbringen der Kontaminationspartikel .....	44
3.5	Orientierungsprüfungen .....	49
3.5.1	Hydraulikcharakterisierung, Dichtheits- und Temperaturtest.....	50
3.5.2	Dauertest .....	53
3.5.3	Ergebnisse .....	55
3.5.3.1	Vorbringerkraft.....	55
3.5.3.2	Grundreibung .....	62
3.5.3.3	Dämpfungsverhalten bei Geschwindigkeiten.....	65
3.5.3.4	Test auf innere Dichtheit.....	68
3.5.3.5	Temperaturschranktest.....	70
3.6	Demontage und optische Beurteilung.....	72
3.7	Interpretation .....	75
4	Erstellung einer Sauberkeitsspezifikation.....	76
4.1	Ableitung der funktionskritischen Verunreinigung.....	76
4.1.1	Bewertung konstruktiver Merkmale.....	76
4.1.2	Schadpartikelversuche.....	77
4.1.3	Simulation .....	77
4.2	Betrachtung zum Stand der Technik .....	78
4.3	Sauberkeitsgrenzwerte .....	82
5	Zusammenfassung und Ausblick .....	83
5.1	Zusammenfassung .....	83
5.2	Diskussion und Ausblick.....	85
	Abbildungsverzeichnis.....	X
	Tabellenverzeichnis .....	XII
	Literaturverzeichnis .....	XIII
	Anhang .....	XV

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Jedes Jahr finden in Deutschland 40.000 bis 60.000 Amputationen der unteren Extremität statt. Die Ursachen für eine Amputation können z.B. Traumata, Infektionen, Tumore etc. sein. Der häufigste Grund für Amputationen der unteren Extremität sind arterielle Durchblutungsstörungen. Der Verlust eines Körperteils stellt neben der seelischen Belastung auch eine enorme Mobilitätseinschränkung dar. Individuell angepasste Prothesen dienen als Ersatz für die fehlenden Körperteile und ermöglichen die Wiederherstellung der Mobilität, wodurch eine selbstbestimmte, aktive Gestaltung des Alltags vereinfacht wird. Mit der kontinuierlichen Optimierung und Verfeinerung der Beinprothesen hat sich das Gangbild der Anwender deutlich verbessert. Immer neue Innovationen ermöglichen ein nahezu natürliches Gangbild. [1]

Mikroprozessor-gesteuerte Prothesenkniegelenke verfügen über Sensoren, welche die Geschwindigkeit und die Gangphase des Prothesenträgers erfassen. Elektrisch kontrollierte Hydraulikzylinder ermöglichen die Anpassung des Widerstandsverhaltens des Gelenks an die erfassten Sensorsignale. Mithilfe verstellbarer Ventile wird der Durchfluss des Öls geregelt und somit die Dämpfung an die jeweilige Gangphase und -geschwindigkeit angepasst. Dabei werden die Gangphasen in verschiedene Abschnitte, wie beispielsweise den Fersenauftritt oder dem Erreichen des maximalen Schwungphasenflexionswinkels, untergliedert. Jedem Gangereignis sind spezielle Dämpfungscharakteristika zugeordnet und die Übergänge zwischen den Ereignissen werden durch einen wissensbasierten Algorithmus gesteuert. Dies ermöglicht eine automatische und kontinuierliche Anpassung an verschiedene Bewegungsmodi und Geschwindigkeitsänderungen. Auf diese Weise kann eine höhere Sicherheit und ein geringerer metabolischer Energieverbrauch erreicht werden. [2]

Die Motivation hinter dieser Arbeit liegt in der Gewährleistung der ordnungsgemäßen Funktion eines Mikroprozessor-gesteuerten Prothesenkniegelenks. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Kontamination im verbauten Hydrauliksystem, welche Fehlfunktionen hervorrufen und somit die Performance der Prothese beeinträchtigen kann. Daher ist es wichtig, die Toleranzgrenzen für die Verschmutzung zu ermitteln und einzuhalten.

## 1.2 Problemstellung und Ausgangssituation

Das Produkt „Genium“ der Firma Otto Bock (siehe Abbildung 1) ist ein mikroprozessorgesteuertes Prothesenkniegelenk, welches intuitive Bewegungsabläufe und ein natürliches Gangbild ermöglicht. Die Ausführung verschiedener Bewegungen, wie beispielsweise das Gehen mit wechselnden Geschwindigkeiten, alternierendes Treppensteigen oder Rückwärtsgehen, ist mit dieser Prothese problemlos möglich. Für die situationsgerechte Dämpfung im künstlichen Gelenk ist eine funktionsfähige Hydraulikkomponente essenziell. Die wesentlichen Anforderungen an die technische Bauteilsauberkeit zur Funktionsgewährleistung, gehen über den Detaillierungsgrad der derzeit angewandten Lieferantenvereinbarungen hinaus. Aktuell ist es schwierig die tatsächlich notwendige Sauberkeit zur Gewährleistung der Funktionsfähigkeit in einer genau spezifizierten und validierten Form anzugeben. Der Kennwert über den dies möglich wird ist der sogenannte „Component Cleanliness Code“ (CCC-Wert). Durch die Festlegung von Akzeptanzkriterien in einer Sauberkeitsspezifikation soll eine solide Entscheidungsgrundlage geschaffen werden. Damit kann bestimmt werden, bis zu welchem Grad der Verschmutzung alle Produkt- und Modulanforderungen noch nachweislich erfüllt werden können. Dabei sollen die Systeme „So schmutzig wie möglich, aber so sauber wie nötig“ sein, da eine erhöhte Sauberkeit auch mit einem deutlichen Kostenanstieg einhergeht. Daher ist die Bestimmung dieses maximal zulässigen Verschmutzungsgrads wichtig. Der ermittelte CCC-Wert dient als Basis für die Erstellung einer systemspezifischen Sauberkeitsspezifikation. In dieser müssen Anforderungen, sowie wirtschaftliche und technische Machbarkeit vereint werden.



Abbildung 1: Mikroprozessorgesteuertes Prothesenkniegelenk „Genium“ der Firma Otto Bock mit integriertem Hydrauliksystem [3]

### 1.3 Ziel und Vorgehensweise

Diese Arbeit befasst sich mit der Ermittlung und Definition der Akzeptanzkriterien für Reinheitsanforderungen im Hydrauliksystem des Prothesenkniegelenks „Genium“. Dazu werden Funktionsprüfungen mit künstlich kontaminierten Systemen durchgeführt. Diese Untersuchungen haben zum Ziel, festzustellen, ab welchem Verschmutzungsgrad eine Abweichung der ursprünglichen Parameter auftritt.

Dafür wird zunächst in Sauberkeitsanalysen die vorliegende Kontamination der einzelnen Bauteile untersucht. Basierend auf den identifizierten Verunreinigungen werden „künstliche“ Schmutzpartikel ausgewählt, welche die identifizierten Verschmutzungen repräsentieren sollen. Im nächsten Schritt werden Hydrauliksysteme systematisch und gezielt mit den künstlichen Fremdkontaminationen verunreinigt. Dazu werden unterschiedlich starke Verschmutzungszustände definiert. Zur Orientierung dient die Reinheitsfibel der Firma HYDAC. Die durchgeführten Funktionsprüfungen sind an die Orientierungsprüfungen für Hydrauliksysteme von Otto Bock angelehnt und von offiziellen Verifikationsprüfungen abgeleitet. Durch Kraft-, Weg- oder Zeitmessungen mit definierten Rahmenbedingungen kann überprüft werden, ob die gemessenen Werte innerhalb der Toleranzgrenzen liegen. Werden die Schwellenwerte überschritten so kann eine ordnungsgemäße Funktion des Hydrauliksystems nicht mehr garantiert werden und es muss mit veränderten Eigenschaften, wie beispielsweise Abweichungen im Dämpfungsverhalten, gerechnet werden. Um dies zu vermeiden, werden im Rahmen dieser Arbeit Akzeptanzkriterien definiert, welche als Grundlage für die Ableitung von Bauteilsauberkeitscodes für Hydrauliksysteme dienen. Diese Sauberkeitscodes sind die Basis zur Erstellung einer verbindlichen Design Rule im Zusammenhang mit technischer Bauteilsauberkeit.

## 1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in fünf Kapitel gegliedert, deren Inhalt hier kurz erläutert wird. Im ersten Kapitel wird eine Einführung gegeben, in der das Thema und die Motivation der Arbeit erklärt und der Kontext dargestellt wird. Zusätzlich wird das Ziel der Arbeit und die Vorgehensweise dargelegt.

Das zweite Kapitel befasst sich mit den Grundlagen der Hydraulik und der technischen Sauberkeit. Hierbei wird zunächst die Funktionsweise von Hydrauliksystemen erläutert. Anschließend wird die Verschmutzung von Hydraulikbauteilen und -öl thematisiert. Dabei wird insbesondere auf das Schädigungspotential von Partikeln eingegangen. Des Weiteren wird die technische Bauteilsauberkeit behandelt und es werden die Inhalte der entsprechenden Norm für das Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie erklärt.

Das dritte Kapitel beschreibt die praktische Vorgehensweise und gliedert sich in mehrere Unterkapitel. Zunächst wird die Sauberkeitsanalyse und Reinigung der Bauteile erläutert, wobei die verwendeten Methoden genauer erklärt werden. Danach werden einige Partikel mittels Mikro-Computertomographie untersucht. Es folgt die Montage der Hydrauliksysteme, sowie deren gezielte Verunreinigung. Der Einfluss der Fremdkontamination wird anschließend in hydraulischen Orientierungsprüfungen untersucht. Zuletzt werden die Systeme demontiert und optisch begutachtet.

Im vierten Kapitel wird die Erstellung einer Sauberkeitsspezifikation behandelt. Dabei wird die Ableitung der funktionskritischen Verunreinigung erläutert und der Stand der Technik betrachtet. Im Anschluss wird, basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen, ein Sauberkeitsgrenzwert festgelegt.

Das letzte Kapitel beinhaltet die Zusammenfassung und den Ausblick der Arbeit. Es werden die wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse der Arbeit vorgestellt und diskutiert. Weiterhin werden mögliche Punkte für die zukünftige Fortführung der Arbeit aufgezeigt.

## 2 Grundlagen der Hydraulik und der technischen Sauberkeit

Im folgenden Kapitel werden die theoretischen Grundlagen erläutert, die dem besseren Verständnis der Arbeit dienen sollen. Dazu wird zunächst der Aufbau der untersuchten Hydraulik, sowie der Fluidstrom im System erklärt und es werden Arten von Kontaminationen und deren Folgen, erläutert und kategorisiert. Anschließend wird auf die technische Bauteilsauberkeit und die damit verbundene Norm VDA 19 eingegangen.

### 2.1 Hydrauliksysteme

Der Begriff Hydraulik stammt vom griechischen Wort „hydor“ ab, was übersetzt Wasser bedeutet. Dies lässt Rückschlüsse auf das Fluid der ersten hydraulischen Pressen zu, die zu Beginn des 19. Jahrhunderts zum Einsatz kamen und mit Wasser betrieben wurden. Heutzutage kommt meist Öl als Betriebsmittel zum Einsatz, da dadurch die Gleitflächen automatisch geschmiert werden und somit das Korrosionsrisiko abnimmt. [4]

Hydraulische Systeme basieren auf dem Strömungsverhalten von Flüssigkeiten. Wird ein geschlossenes, mit Flüssigkeit gefülltes System unter Druck gesetzt, so verteilt dieser sich gleichmäßig und durch die Strömungsbewegung der Hydraulikflüssigkeit kommt es zur Energie- und Kraftübertragung. Das verwendete Fluid kann bei den auftretenden Drücken als inkompressibel betrachtet werden. Bewegungen können gedämpft werden in dem der Durchfluss verringert wird, ohne dass es zu einer rückfedernden Bewegung kommt. Durch ein Hydrauliksystem können große Kräfte und Leistungen bei nur geringem Platzbedarf der Komponenten übertragen werden, was sie zu einem sehr vielseitig einsetzbaren Technologieinstrument macht. Um die Funktionalität der Hydraulik zu erhalten, müssen allerdings einige Aspekte beachtet werden. Es kann beispielsweise bei höheren Temperaturen zur Alterung des Hydrauliköls kommen. Bei der Fertigung von Hydraulik-Bauteilen sind außerdem hohe Herstellgenauigkeiten und feine Passungstoleranzen von Bedeutung, um Undichtigkeiten, Verklemmungen und Schwingungserscheinungen vorzubeugen.

Leckölverluste, aufgrund von Undichtigkeiten, führen zu Verschlechterungen der Funktion und Reklamationen. Um diese negativen Effekte zu vermeiden und alle Vorteile, die ein hydraulisches Element mit sich bringt, ausschöpfen zu können,

werden hohe Anforderungen an die Reinheit des Systems und der Komponenten gestellt. [5]

Hydraulikzylinder dienen der Transformation von hydraulischer in mechanische Leistung. Bei der Umwandlung der potenziellen und kinetischen Energie des Fluids in mechanische Energie entsteht eine translatorische Bewegung. Daher werden die Hydraulikzylinder auch häufig als Linearantrieb bezeichnet. Stellventile ermöglichen die variable Einstellung des Volumenstroms. Kolbenfläche, Kraft, Volumenstrom und das Zylindervolumen beeinflussen die Arbeitsgeschwindigkeit und ermöglichen adaptierbare Dämpfungsparameter.

Die Hauptkomponenten eines Hydraulikzylinders sind das Zylindergehäuse und die Kolbeneinheit, welche aus Kolbenstange und Kolben besteht. Der Arbeitskolben teilt den Zylinder in zwei voneinander abgetrennte Zylinderräume. Er bewegt sich, wie in Abbildung 2 veranschaulicht, entsprechend der Bewegung des Hydrauliköls. Fließt das Öl in die stangenseitige Kammer des Zylinders, so fährt der Kolben in das Gehäuse. Dies ist in der rechten Grafik von Abbildung 2 dargestellt. Dabei wird die Strömung des Arbeitsmedium mit orangen und die Bewegung des Kolbens mit weißen Pfeilen veranschaulicht. Ein Ausfahren des Kolbens wird erreicht, wenn das Fluid in die gegenüberliegende Kammer, auf der Unterseite der Kolbenfläche strömt (siehe linke Grafik der Abbildung). Das verdrängte Volumen fließt gewöhnlich über einen Vorrats- bzw. Ausgleichsbehälter und wird dann in den anderen Zylinderraum geleitet. Dichtungen und Führungsbänder am Kolben dienen zur Vermeidung innerer Leckagen. An den beiden Enden wird das Zylindergehäuse durch Verschrauben, Verschweißen oder Verspannen geschlossen. [4]

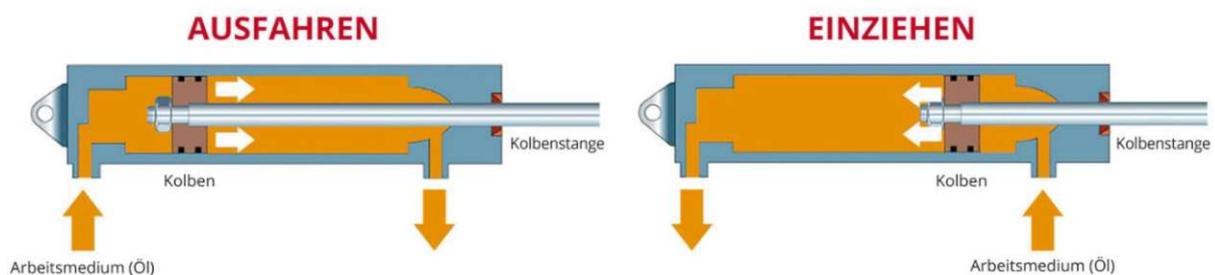


Abbildung 2: Arbeitsweise eines doppelwirkenden Zylinders. Schematische Darstellung [6]

Das Hydrauliksystem des Prothesenkniegelenks „Genium“ besteht aus einem doppelwirkenden Zylinder-System. Der Kolben trennt zwei Kammern voneinander, folglich sind beide Kolbenflächen mit Hydraulikfluid beaufschlagt. Bei der Bewegung

des Kolbens strömt jeweils gleichzeitig in eine Kammer Öl, während es aus der anderen Kammer herausfließt. Das bringt den Vorteil mit sich, dass eine Kraftübertragung in zwei Richtungen möglich ist und somit Hubarbeit in beide Richtungen ausgeführt werden kann. [5] Wird das Kniegelenk gebeugt, so wird der Kolben tiefer in den Hydraulikzylinder hineingedrückt (Flexion), bei einer Extension des Kniegelenks wird der Kolben hinausgeschoben. Der Ventilblock besteht aus zwei elektronisch steuerbaren Drehschieberventilen und zwei Rückschlagventilen, welche unidirektionalen Fluss garantieren. Die Anpassung des mechanischen Widerstands der Gelenkbewegung erfolgt mithilfe der Drehschieberventile. Da diese Ventile elektrisch ansteuerbar sind, kann ihre Position entsprechend der jeweiligen Gangphase adaptiert werden. Durch die variable Ventilöffnung wird der Durchfluss des Öls zwischen den Kammern reguliert und so der Gelenkwiderstand eingestellt. In Abbildung 3 ist die Grundschtung des im Genium verbauten hydraulischen Dämpfers und der Fluss des Hydrauliköls während Flexion und Extension dargestellt. Die roten Pfeile und Umrahmungen verdeutlichen den Ölfluss im Fall einer Flexion des Kniegelenks. Durch den zunehmenden Druck wird das Hydrauliköl aus der unteren Zylinderkammer gedrückt. Das Rückschlagventil sperrt, wobei der Durchfluss über das Stellventil elektrisch reguliert werden kann.

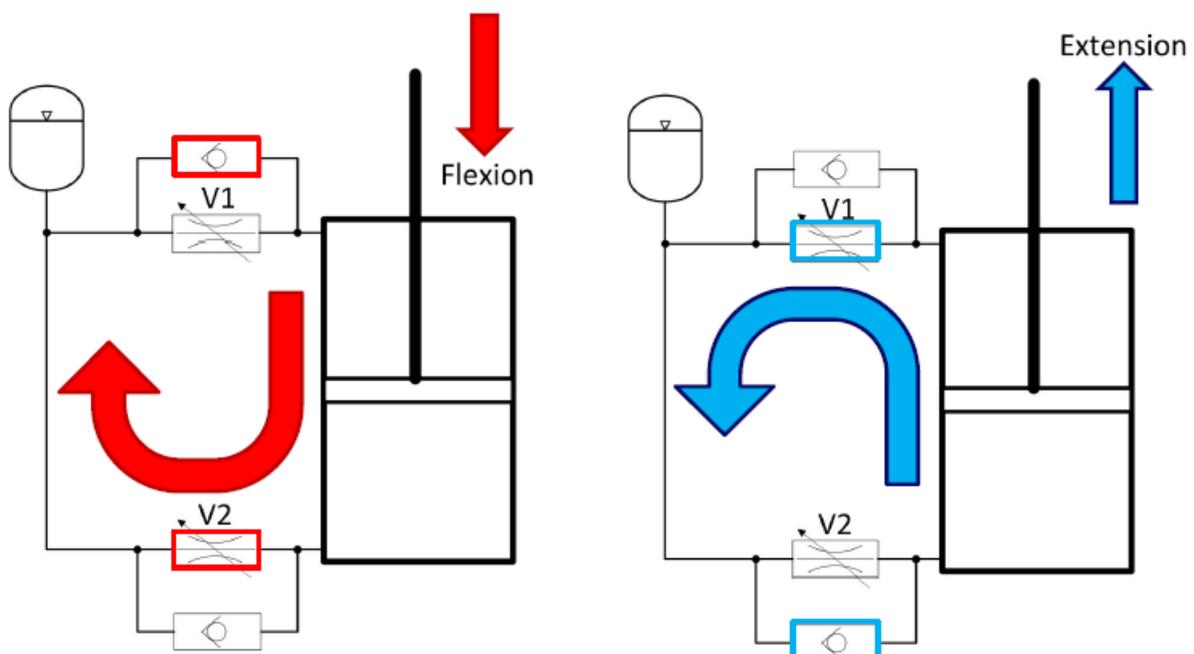


Abbildung 3: Hydraulikschaltbild: Hydraulikzylinder mit Ausgleichsvolumen, sowie Rückschlag- und Stellventilen. Ölfluss während Flexion (rot) und Extension (blau) [7]

Da bei der Flexion die Kolbeneinheit in den Zylinder hineingedrückt wird, kommt es durch das Volumen der Kolbenstange zu einer zusätzlichen Verdrängung von Öl. Mit zunehmendem Eindringen der Kolbeneinheit kann in Summe also immer weniger Hydraulikfluid von den beiden Kammern gefasst werden. Zur Kompensation dieser entstehenden Differenz an Ölvolumen wird ein Ausgleichsvolumen verwendet. Wird der Kolben also in den Zylinder gedrückt, so gelangt ein Teil des verdrängten Öls über das Stellventil in den Ausgleichsbehälter und ein Teil strömt direkt in die obere Zylinderkammer. Das Ausgleichsvolumen besteht aus zwei Kammern, welche durch eine flexible Membran voneinander getrennt werden. Eine der beiden Kammern ist mit einem definierten Druck beaufschlagt, die andere Kammer dient zur Aufnahme des überschüssigen Ölvolumens. Strömt das Hydrauliköl über die radial angeordneten Kanäle in die Ölkammer des Ausgleichsbehälters ein, so wird die Membran zunehmend in Richtung der Gaskammer eingedrückt. Dadurch können weiterhin auch Volumendifferenzen des Arbeitsmediums, aufgrund von Wärmeausdehnung, ausgeglichen werden. Nach dem Passieren des Ausgleichsbehälters gelangt das restliche Öl über das zweite Rückschlagventil in die obere Zylinderkammer. Bei der Extension kommt es zur Umkehr der Arbeitsrichtung und zum Druckanstieg in der oberen Kammer (siehe blaue Markierungen). Das Öl strömt aus der Kammer über das Stellventil, passiert den Ausgleichsbehälter und gelangt schließlich über das Rückschlagventil in die untere Zylinderkammer.

Das Hydrauliksystem verfügt zudem über ein Überdruckventil, welches in die Kolbeneinheit integriert ist. Es ist als Rückschlagventil von der unteren in die obere Kammer eingebaut. Überschreitet der Druck in der unteren Zylinderkammer einen Schwellenwert, so öffnet das Ventil und das Hydrauliköl kann direkt von der unteren in die obere Kammer strömen. Zum Auslösen dieses Ventils kann es bei Bewegungen mit sehr hohen Kniebeugemomenten, wie beispielsweise dem Springen, kommen. Durch die Bypass-Funktion des Überdruckventils zwischen den Kammern, wird der Überdruck in der unteren Zylinderkammer schnell wieder abgebaut und die Bauteile sind vor zu hoher Belastung geschützt.

## 2.2 Kontaminationen

### 2.2.1 Definition

Die Sauberkeit der Bauteile des Systems und des verwendeten Hydrauliköls sind für die störungsfreie Funktion des Systems maßgeblich. Jegliche Art von Verschmutzungen können die Eigenschaften des gesamten Hydrauliksystems beeinflussen und sich so negativ auf die Lebensdauer und die Funktionssicherheit der Hydraulikelemente auswirken. Prinzipiell können Verunreinigungen ihren Aggregatzuständen entsprechend in drei Arten untergliedert werden: Flüssig, fest und gasförmig.

Flüssige Verunreinigungen können beim Befüllen und Entlüften des Systems oder über undichte Stellen in den Hydraulikkreislauf gelangen. Weiterhin kann Wassereintrag über die Kondensation von feuchter Luft an den Wänden des Behälters erfolgen. [8] Hydrauliköle beinhalten prinzipiell einen gewissen Anteil gelöster Luft. In örtlich begrenzten Niederdruckbereichen kann durch Druckschwankungen im System der statische Druck unter den Dampfdruck fallen. Ist dies der Fall, so kommt es zur Bildung von Dampfblasen, welche in Bereichen höheren Druckes wieder implodieren. Dieses Phänomen wird als Kavitation bezeichnet. Kavitation ist jedoch nur eine mögliche Ursache für Gasbläschen im Hydrauliköl. So können beispielsweise auch Undichtigkeiten des Gehäuses das Eindringen von Gas ins System nach sich ziehen. [9] Mit bis zu 70% der Ausfälle in Hydrauliksystemen durch Ölverschmutzung, ist der Großteil der Ausfallursachen auf feste Partikel zurückzuführen. In Abschnitt 2.2.2 wird genauer auf das Schädigungspotential von partikulären Verunreinigungen eingegangen. [10]

Die technische Sauberkeit ist ein temporärer Zustand, welcher durch äußere Einflüsse veränderlich ist. Ein System das gewissen Reinheitsgrenzwerten entspricht, kann also jederzeit wieder verunreinigt werden. Im Wesentlichen können in drei verschiedenen Stadien Verunreinigungen in das Hydrauliksystem gelangen: Vor dem Befüllen des Systems, während der Montage und beim Betrieb. Bauteile und Hydrauliköl können schon im Anlieferungszustand kritische Verschmutzungen enthalten. Um zu vermeiden, diese Kontaminationen in das System einzubringen, sollte vorab deren Sauberkeit überprüft werden. Die ordnungsgemäße Lagerung, der Transport und gesäuberte Aufbewahrungsbehältnisse sind ebenso bedeutend. Wird Hydrauliköl beispielsweise bei hohen Temperaturschwankungen oder feuchten

Umgebungsbedingungen gelagert, so kann durch Feuchtigkeit und Kondensation, Wasser ins Öl gelangen. Außerdem ist die Montage ein sauberkeitskritischer Prozess. Sowohl während Auf- und Zusammenbau als auch beim Befüllen der Systeme, entstehen zwangsläufig Verunreinigungen, welche sich in den Bauteilen oder an Verbindungsstellen festsetzen können.

Sogar wenn das System den Reinheitsanforderungen entsprechend montiert und befüllt wurde, besteht noch Kontaminationsgefahr. Beim Betrieb der Hydraulik können durch Verschleiß von beweglichen Teilen wie Ventilen, Zylindern oder Pumpen Verunreinigungen entstehen. Zusätzlich kann abhängig vom Betriebsstandort Staub oder Luftfeuchtigkeit eindringen. Fremdstoffe, hohe Betriebstemperaturen und Beanspruchungen können zur Ausscheidung von unlöslichen Polymerisationsprodukten aus dem Öl führen. Durch diese Alterungsprozesse wiederum steigt die Ölviskosität an, was zu einer Veränderung des Systemverhaltens führt. [11]

### 2.2.2 Schädigungspotential von Partikeln

Da partikuläre Verunreinigungen den häufigsten Grund für Ausfälle von Hydrauliksystemen darstellen, sind Kenntnisse über deren Schädigungspotential relevant, um das Funktionsausfallrisiko zu minimieren. Dabei können die Ursachen des Versagens in drei Kategorien unterteilt werden: Totalversagen, kurzzeitige Ausfälle und Degradationsausfälle.

Größere Kontaminationspartikel können zu schlagartig auftretenden Funktionsstörungen, wie beispielsweise dem Verklemmen von Ventilen oder anderen bewegten Elementen, führen. Außerdem können Partikel Rotorschlitze oder Schaufeln von Motoren oder Pumpen blockieren und so einen Systemausfall hervorrufen. Dadurch kann die Strömung des Arbeitsmediums verringert oder ganz gestoppt werden, was im schlimmsten Fall ein Totalversagen des Systems bedeutet. Gelangt ein Partikel auf den Sitz eines Ventils, so dichtet dieses beim Verschließen möglicherweise nicht mehr richtig ab und es kommt zu kurzzeitigen Ausfällen durch Leckströme. Degradationsausfälle werden häufig durch kleinere Partikel, mit Abmessungen im einstelligen Mikrometer-Bereich verursacht. Über lange Zeiträume begünstigen diese Teilchen Verschleiß, Korrosion und Erosionserscheinungen. Dies wiederum führt vermehrt zu inneren Undichtigkeiten und Leckagen, was die Effizienz und Genauigkeit des Systems verringert. Werden Verschleißpartikel im System nicht

aus dem Kreislauf entfernt, so erzeugen diese zunehmend weitere Partikel. Diese Kettenreaktion des Verschleißes führt dazu, dass das Hydraulikfluid mit der Zeit immer stärker degradiert und verschmutzt. [8], [12]

### 2.2.3 Hydrauliköl-Kontamination

Um Kontaminationen im System zu vermeiden, muss neben den Bauteilen auch das Hydrauliköl gewisse Reinheitsanforderungen erfüllen. Durch die Weiterentwicklung der Hydrauliken, zu immer kompakteren und leistungsstärkeren Systemen steigen auch die Anforderungen an das verwendete Öl. Zunehmende Strömungsgeschwindigkeiten durch kleinere Ölfüllmengen, höhere Temperaturen und Drücke im System, sowie geringe Spalttoleranzen und Ventilgrößen stellen eine Herausforderung dar. Die sorgfältige Auswahl des Hydrauliköls ist demnach ausschlaggebend für den langfristigen, störungsarmen Betrieb eines hydraulischen Systems. Jede Art der Verunreinigung stellt ein potenzielles Ausfallrisiko dar. Mit steigendem Verschmutzungsgrad ist mit vermehrtem Verschleiß der Systembestandteile, Blockaden von Ventilen, Leckagen oder Ablagerungen zu rechnen.

Mithilfe der Norm ISO 4406 „Hydraulic fluid power: Fluids - Method for coding the level of contamination by solid particles“ [13], kann aus der ermittelten Anzahl der Feststoffpartikel eine Reinheitsklasse definiert werden. Diese Klasse wird mit drei Zahlenwerten angegeben, beispielsweise 19/17/14. Dabei bezieht sich der erste Wert auf Partikel  $> 4\mu\text{m}$ , der mittlere auf Partikel  $> 6\mu\text{m}$  und die letzte Zahl gibt die Ordnungszahl für Partikel  $> 14\mu\text{m}$ . Betrachtet man die Ordnungszahlen, so kann aus Tabelle 1 die zulässige Partikelanzahl pro 100 ml Fluid ermittelt werden.

Tabelle 1: Reinheitsklassen und zulässige Partikelanzahl pro 100 ml Hydrauliköl [14]

Anzahl Partikel pro 100 ml		Ordnungs- zahl
Mehr als	bis einschließlich	
250.000.000		> 28
130.000.000	250.000.000	28
64.000.000	130.000.000	27
32.000.000	64.000.000	26
16.000.000	32.000.000	25
8.000.000	16.000.000	24
4.000.000	8.000.000	23
2.000.000	4.000.000	22
1.000.000	2.000.000	21
500.000	1.000.000	20
250.000	500.000	19
130.000	250.000	18
64.000	130.000	17
32.000	64.000	16
16.000	32.000	15
8.000	16.000	14
4.000	8.000	13
2.000	4.000	12
1.000	2.000	11
500	1.000	10
250	500	9
130	250	8
64	130	7
32	64	6
16	32	5
8	16	4
4	8	3
2	4	2
1	2	1
0	1	0

## 2.3 Technische Bauteilsauberkeit

### 2.3.1 Definition und Problemstellung

Die technische Sauberkeit von Bauteilen ist ein temporärer Zustand, welcher jederzeit durch äußere Faktoren beeinflusst werden kann. Kontamination von Werkstücken während deren Herstellung und Bearbeitung ist unvermeidbar. Verunreinigungen wie Späne oder Ölrückstände, können die Funktionalität der Endprodukte beeinflussen. Daher zählt die Sauberkeit von Bauteilen heutzutage zu den wichtigen Qualitätsmerkmalen und es werden zunehmend detaillierte Spezifikationen erstellt, um diese zu Gewährleisten. [15]

Zur Feststellung der technischen Reinheit ist die Sichtprüfung auch heute noch die häufigste Methode, um die Qualität zu prüfen. Fluoreszenzanalytik und andere Testverfahren, beispielsweise mit Hilfe von Testtinte oder Schütteln, kommen nur selten zum Einsatz. Allerdings geht der Qualitätsprüfung meist noch ein anderes Problem voraus: Sauberkeitsgrenzwerte sind häufig überhaupt nicht vorhanden. Um die Fertigungs-, Montage- und Lieferprozesse transparent und vergleichbar zu gestalten müssen daher zunächst Akzeptanzkriterien und Richtlinien definiert werden. Restschmutzanalysen können dabei helfen die Vergleichbarkeit von Prüfergebnissen zu vereinfachen und dienen als Basis für die Evaluierung der technischen Reinheit. Bei der Festlegung der Sauberkeitsgrenzwerte ist ein Kompromiss aus Prozesssicherheit und Wirtschaftlichkeit erforderlich. Dabei besteht bei zahlreichen Unternehmen noch Optimierungspotenzial. Getroffene Vereinbarungen sind weiterhin häufig nur für einzelne Systeme oder Unternehmen festgelegt, was den branchenübergreifenden Vergleich erschwert. [16], [17]

### 2.3.2 VDA 19 – Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie

Die Norm VDA 19 „Prüfung der Technischen Sauberkeit – Partikelverunreinigung funktionsrelevanter Automobilteile“ [18] stellt das deutsche Pendant zur internationalen Norm ISO 16232 „Road vehicles – cleanliness of components of fluid circuits“ [19] dar. Ziel dieser Richtlinien ist es, die Bedingungen für Anwendung und Dokumentation von Methoden zur Bestimmung der Partikelkontamination an Bauteilen festzulegen. Die hier beschriebenen Reinheitsprüfungen sind die Grundlage zur Evaluierung der technischen Bauteilsauberkeit in der Erstbemusterung, der Ein- und

Ausgangskontrolle sowie in der Qualitätskontrolle. Weiterhin dienen sie zur Überwachung der Herstellprozesse.

Die Richtlinie VDA 19 dient der Vereinheitlichung von Sauberkeitsspezifikationen, vereinfacht die Vergleichbarkeit und erhöht die Aussagekraft von Prüfergebnissen. Standardisierte Vorgehensweisen können bei der Ermittlung von Sauberkeitsgrenzwerten helfen, müssen jedoch auch bauteil- und firmenspezifisch adaptiert werden. [18]

Die Anforderungen an die Sauberkeitsprüfungen richten sich jeweils an der zulässigen Restschmutzmenge des zu prüfenden Bauteils aus. Wenn partikuläre Verunreinigungen ein erhebliches Risiko für Funktionsausfälle des Bauteils oder des Systems darstellen, sollte ein Sauberkeitsgrenzwert erstellt werden. Die Bauteile müssen dabei nur „so sauber wie nötig“ und nicht „so sauber wie möglich“ sein, da erhöhte Sauberkeitsanforderungen auch einen erheblichen Kosten-Mehraufwand mit sich bringen.

Zwischen der technischen und ökonomischen Umsetzbarkeit und den Reinheitsanforderungen kam es in der Vergangenheit oft zu Diskrepanzen. Dabei stellt häufig nicht die eigentlich für ein System zugelassene Menge an Restschmutz, sondern deren Verteilung auf die einzelnen Bauteile ein Problem dar. Zur Berechnung der Bauteilgrenzwerte wurde in den vergangenen Jahren die Gesamtschmutzmenge anteilig zur benetzten Fläche berechnet. Dies hat zur Folge, dass für kleine Bauteile nur sehr geringe Mengen an Restschmutz zulässig sind. Allerdings werden Kleinteile häufig kostengünstig produziert, sodass kaum finanzieller Spielraum für die Umsetzung von Optimierungen in Bezug auf Sauberkeit des Produktionsprozesses besteht. Hinzu kommt, dass Verbesserungen der Reinheit sehr kleiner Bauteile, auf den Nutzen für das Gesamtsystem bezogen, unbedeutend sind. Wesentlich effektiver ist es hingegen die Gesamtsauberkeit des Systems zu verbessern, indem geringfügige Optimierungen an den großen Bauteilen vorgenommen werden. [20]

### 2.3.2.1 Auswahl der Prüfmethode

Die Auswahl der Prüfmethode kann in drei Teile untergliedert werden: Extraktion, Filtration und Analyse der Partikel. Im ersten Schritt der Sauberkeitsanalyse müssen die Kontaminationspartikel zunächst von der Bauteiloberfläche abgelöst werden. Dabei handelt es sich vereinfacht ausgedrückt, um eine Reinigungsaufgabe mit dem

Ziel, möglichst alle Partikel vom Bauteil zu entfernen. Für jedes Prüfobjekt muss, je nach geometrischen Abmessungen, Material, Lage der Kontrollflächen und Art der Kontamination, das passende Extraktionsverfahren gewählt werden. Einflussgrößen wie das verwendete Prüfmedium, die Temperatur, die Wirkzeit und die Reinigungsmechanik, beeinflussen das Extraktionsergebnis maßgeblich. Die optimale Auswahl dieser Parameter ist demnach wichtig, um eine repräsentative Partikelablösung zu erzielen.

Die im Prüfmedium befindlichen Partikel müssen anschließend zur Analyse auf einen Filter abgeschieden werden. Eine Voraussetzung für die Eignung eines Analysefilters, ist dessen Verträglichkeit mit dem Prüfmedium. Weiterhin müssen Größe und Menge der relevanten Verunreinigungen definiert werden, um im nächsten Schritt die Porenweite des Filters zu wählen, mit der das gewünschte Partikelrückhaltevermögen erreicht werden kann.

Das Analyseverfahren wird anhand den in der Sauberkeitsspezifikation definierten relevanten Merkmalen und dem Zweck der Analyse gewählt. Zur Überprüfung von Reinheitsanforderungen im Kunden-Lieferanten-Verhältnis ist eine Standardanalyse ausreichend. Weitergehende, detailliertere Analysen kommen beispielsweise in der Prozessoptimierung oder der Ursachensuche zum Einsatz. Zur Prozessüberwachung ist eine verkürzte Analyse, welche schnelle Ergebnisse liefern kann, ausreichend.

Im Rahmen der Standardanalyse kommen zwei Analyseverfahren zum Einsatz: Die Gravimetrie und die lichtoptische Analyse. Die gravimetrische Analyse dient zur Ermittlung der Masse der gesamten extrahierten Partikelfracht. Durch Abwiegen des Analysefilters vor und nach der Partikelextraktion und der Filtration des Prüfmediums, kann das sogenannte Rückstandsgewicht ermittelt werden. Dabei ist die sorgfältige Vorbereitung, Trocknung und Abkühlung des Filterpads essenziell, um eine Gewichtskonstanz des Analysefilters zu erreichen und abschließend sinnvolle Messergebnisse zu erzielen. Während die Gravimetrie keine Informationen über die Größe, Anzahl oder Art der Verunreinigungen liefert, können durch lichtoptische Analysen genauere Informationen gewonnen werden. Dabei werden die Kontaminationen mit Hilfe von Mikroskopen oder Flachbett-Scannern vermessen. Die erfassten Partikel werden in der VDA 19 entsprechend ihrer längsten Ausdehnung verschiedenen Größenklassen zugeordnet. Um eine repräsentative Größenverteilung zu erhalten ist die Auszählung der kompletten effektiven Filterfläche des Analysefilters wichtig. In der Standardanalyse werden Teilchen ab der Größenklasse E

( $50 \mu\text{m} \leq x < 100 \mu\text{m}$ ) betrachtet, größere Partikel sind mit im Alphabet aufsteigenden Buchstaben bis hin zur Klasse N ( $3000 \mu\text{m} < x$ ) festgelegt. Die Zuordnung von Partikeln in den festgeschriebenen Größenklassen dient der Vereinheitlichung. So bieten beispielsweise Anbieter von Partikelzählmikroskopen entsprechende Vermessung und Klassifizierung von Partikeln an. [18]

Abbildung 4 veranschaulicht die Ermittlung der Partikellänge, welche als größtmöglicher senkrechter Abstand zweier den Partikel berührenden Parallelen definiert ist. Diese Abmessung wird auch als  $Feret_{\text{max}}$  bezeichnet und entspricht dem im schlimmsten Fall eintretenden Schädigungspotential des Partikels.

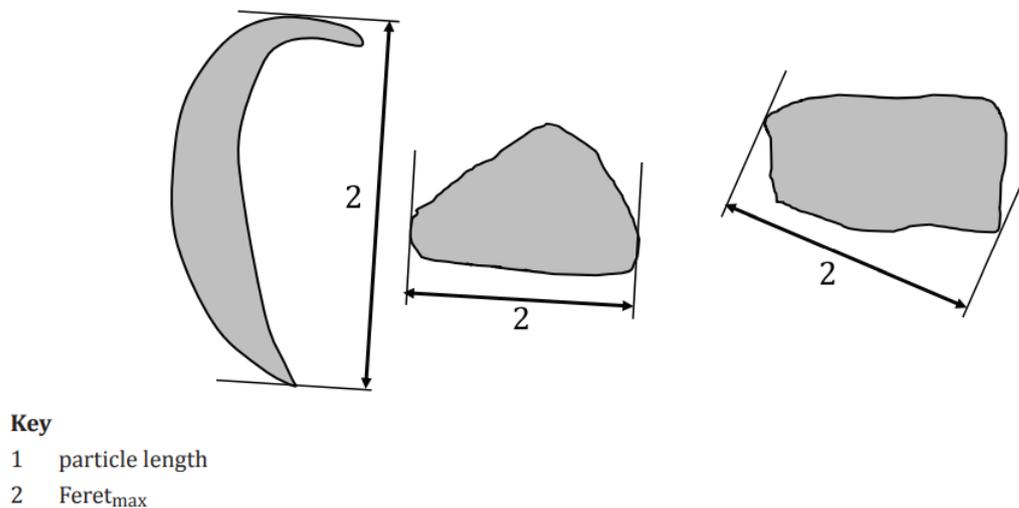


Abbildung 4: Definition der Partikellänge nach ISO 16232 [19]

Die Partikelbreite ist hinsichtlich des Schädigungspotenzials ebenso relevant, da sie angibt in welche Spaltbreite Partikel eindringen können oder welche Breite eines Kanals das Partikel gerade noch passieren kann. Die Ermittlung der Breite  $Feret_{\text{min}}$  erfolgt analog zur Partikellänge.

Zusätzlich zur Vermessung werden die Partikel im Rahmen einer lichtoptischen Analyse hinsichtlich Faserform und metallischem Glanz typisiert. Fasern gelten im Vergleich zu Partikeln als potenziell weniger schädliche Verunreinigungen. Deren Charakterisierung erfolgt über die Messung der gestreckten Faserlänge und der Breite. In der Regel sind Textilfasern zwar sehr lang, anders als Partikel jedoch keine starren Gebilde, sondern sehr flexibel. Dadurch sind sie für technische Systeme weniger funktionskritisch. Im Gegensatz dazu bringen metallisch glänzende Partikel ein erhebliches Funktionsausfallrisiko mit sich. Durch ihre elektrische Leitfähigkeit stellen

metallische Partikel besonders für elektronische Baugruppen eine Gefährdung dar. Werden die elektrischen Kontakte überbrückt, kommt es zum Kurzschluss. Auch ein mechanisches Risiko tritt durch die Härte metallischer Werkstoffe auf. Sie können beispielsweise verschleißfördernd wirken, sich verklemmen oder Komponenten blockieren und somit zum Leitungsabfall im System führen. Hinzu kommt, dass das Vorkommen von metallischen Kontaminationspartikeln keineswegs selten ist, da metallische Werkstoffe bei der Fertigung von Systemen eine zentrale Rolle spielen. Durch Bearbeitungs- und Montageprozesse entstehen häufig metallische Verunreinigungspartikel, die anschließend auf der Bauteiloberfläche zu finden sind. Eine eindeutige Bestimmung metallischer Partikel ist zwar nur mit einer weiterführenden Analyse möglich, jedoch ist das Auftreten von metallischen Reflexionen eine bedeutende Hilfestellung für die Typisierung der vorgefundenen Kontamination und somit zur Einordnung des Funktionsausfallrisikos. [19]

### 2.3.2.2 Component Cleanliness Code

Der Component Cleanliness Code ist eine numerische Aufschlüsselung der erforderlichen Sauberkeit eines Systems, welche auf der Partikelanzahl und nicht auf der Masse der Verunreinigungen basiert. Die Aussage des Codes soll an dem folgenden Beispiel verdeutlicht werden:

$$CCC = A (B20/C16/D18/...)$$

Als erstes wird eine Bezugsgröße definiert, welche durch den Buchstaben vor der Klammer ausgedrückt wird. Die Kennzeichnung A bedeutet, dass sich die Werte in Klammern auf  $1000 \text{ cm}^2$  benetzte Oberfläche des Prüfobjekts beziehen. Der Buchstabe V würde den Bezug zu  $100 \text{ cm}^3$  benetztem Volumen herstellen. Steht ein N vor der Klammer, so beziehen sich die Werte jeweils auf das ganze Bauteil. Die Zahlen und Buchstaben in der Klammer geben an, wie viele Partikel je Größenklasse zulässig sind. Dabei beschreiben die Buchstaben die Größenklassen, welche aus Tabelle 2 entnommen werden können: B ( $5\mu\text{m} \leq x < 15\mu\text{m}$ ), C ( $15\mu\text{m} \leq x < 25\mu\text{m}$ ) und D ( $25\mu\text{m} \leq x < 50\mu\text{m}$ ).

Tabelle 2: Alphabetische Größenklassen und zugehörige Partikelgrößen [19]

**Nach ISO 16232 / TECSA / VDA 19**

According to ISO 16232 / TECSA / VDA 19

Selon ISO 16232 / TECSA / VDA 19

<b>Größenklasse</b> Size class <i>Classe de taille</i>	<b>Größe x [<math>\mu\text{m}</math>]</b> Size x [ $\mu\text{m}$ ] <i>Taille x [<math>\mu\text{m}</math>]</i>
B	$5 \cdot x < 15$
C	$15 \cdot x < 25$
D	$25 \cdot x < 50$
E	$50 \cdot x < 100$
F	$100 \cdot x < 150$
G	$150 \cdot x < 200$
H	$200 \cdot x < 400$
I	$400 \cdot x < 600$
J	$600 \cdot x < 1000$
K	$1000 \cdot x$

Die zulässigen Partikelanzahlen sind in Tabelle 3 als Konzentrationsklassen kodiert.

Tabelle 3: Numerische Konzentrationsklassen und zulässige Partikelanzahl pro 1000 cm<sup>2</sup> Oberfläche (O) oder 100 cm<sup>3</sup> Volumen (V) [19]

**Nach ISO 16232 / TECSA / VDA 19**

According to ISO 16232 / TECSA / VDA 19

Selon ISO 16232 / TECSA / VDA 19

Konzentrationsklasse Concentration class Classe de concentration	Anzahl der Partikel pro 1.000 cm <sup>2</sup> (A) oder pro 100 cm <sup>3</sup> (V) Number of particles per 1,000 cm <sup>2</sup> (A) or per 100 cm <sup>3</sup> (V) Nombre de particules par 1.000 cm <sup>2</sup> (A) ou par 100 cm <sup>3</sup> (V)	
	Mehr als More than / Plus de	bis einschließlich up to / jusqu'à
00	–	0
0	0	1
1	1	2
2	2	4
3	4	8
4	8	16
5	16	32
6	32	64
7	64	130
8	130	250
9	250	500
10	500	1 x 10 <sup>3</sup>
11	1 x 10 <sup>3</sup>	2 x 10 <sup>3</sup>
12	2 x 10 <sup>3</sup>	4 x 10 <sup>3</sup>
13	4 x 10 <sup>3</sup>	8 x 10 <sup>3</sup>
14	8 x 10 <sup>3</sup>	16 x 10 <sup>3</sup>
15	16 x 10 <sup>3</sup>	32 x 10 <sup>3</sup>
16	32 x 10 <sup>3</sup>	64 x 10 <sup>3</sup>
17	64 x 10 <sup>3</sup>	130 x 10 <sup>3</sup>
18	130 x 10 <sup>3</sup>	250 x 10 <sup>3</sup>
19	250 x 10 <sup>3</sup>	500 x 10 <sup>3</sup>
20	500 x 10 <sup>3</sup>	1 x 10 <sup>6</sup>
21	1 x 10 <sup>6</sup>	2 x 10 <sup>6</sup>
22	2 x 10 <sup>6</sup>	4 x 10 <sup>6</sup>
23	4 x 10 <sup>6</sup>	8 x 10 <sup>6</sup>
24	8 x 10 <sup>6</sup>	16 x 10 <sup>6</sup>

Somit sind laut dem oben beispielhaft angegebenen Code folgende Partikel zulässig:

- mehr als 500.000 bis 1.000.000 Partikel ≥ 5µm und <15µm (B20)
- mehr als 32.000 bis 64.000 Partikel ≥ 15µm und < 25µm (C16)
- mehr als 130.000 bis 250.000 Partikel ≥ 25µm und < 50µm (D18). [18]

### 3 Praktische Vorgehensweise

Im folgenden Kapitel wird die Vorbereitung und Durchführung der Schadpartikelversuche erläutert. Das Vorgehen in diesem Kapitel wird in Abbildung 5: Flowchart zum Vorgehen in Kapitel 3 veranschaulicht. Als erstes werden die Sauberkeitsanalysen und die Bauteilreinigung beschrieben, welche extern von der Firma HYDAC durchgeführt wurden. Einige der vorgefundenen Partikel werden zusätzlich mikrotomographisch untersucht. Anschließend wird der Montageprozess erklärt, der Auswahlprozess der künstlichen Kontaminationspartikel und deren Einbringung ins System erläutert. Abschließend werden die durchgeführten Hydraulikprüfungen beschrieben und die Ergebnisse aufgezeigt und analysiert.

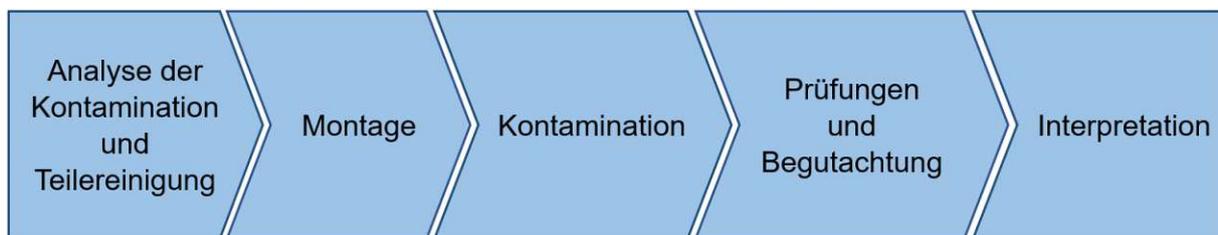


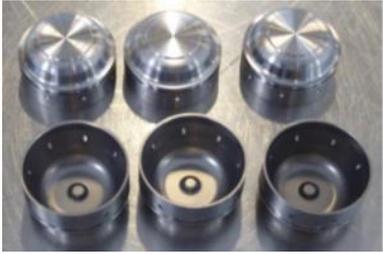
Abbildung 5: Flowchart zum Vorgehen in Kapitel 3

#### 3.1 Sauberkeitsanalyse und Reinigung

Für die Sauberkeitsanalyse wurden Bauteile des Systems untersucht, die jeweils direkt mit dem Hydrauliköl in Kontakt stehen und somit Fremdkontaminationen einbringen könnten. Außerdem wurden Teile, die potenziell sensibel auf Verunreinigungen reagieren, gewählt. Da es sich beim untersuchten System um die Hydraulik eines Prothesenkniegelenks der Initialserie handelt, standen nicht alle gewünschten Teile zur Verfügung. Es musste ein Kompromiss gefunden werden, welche Komponenten analysiert werden. Tabelle 4 zeigt die neun verschiedenen Bauteile, die schließlich zur Sauberkeitsanalyse eingeschickt wurden.

Tabelle 4: Übersicht der für die Sauberkeitsanalyse bei der Firma HYDAC ausgewählten Hydraulikbauteile

Bezeichnung	Abbildung
Anbindungsteil	
Hydraulikgehäuse	
Kolben	
Kolbenstange	

<p>Membran Ausgleichsbehälter</p>	
<p>Obere Verschlusschraube</p>	
<p>Oberteil</p>	
<p>Ventil</p>	
<p>Ventilblock</p>	

### 3.1.1 Analysemethode

Zur Bestimmung der geeigneten Beprobungsbedingungen werden sogenannte Abklingmessungen durchgeführt. Durch wiederholte Beprobung desselben Bauteils kann festgestellt werden, ob die abgelöste Partikelfracht mit zunehmender Anzahl der Beprobungen abnimmt und somit ein geeignetes Extraktionsverfahren angewendet wird. Zusätzlich wird der Blindwert bestimmt, welcher alle nicht vom Bauteil stammenden Verunreinigungen umfasst. Dabei handelt es sich um Verschmutzungen, die während der Sauberkeitsprüfung eingebracht werden. Mögliche Ursachen dafür können das Personal, die Umgebung oder die Analyseflüssigkeit sein. Zur Ermittlung des Blindwerts wird der Prozess der Beprobung ohne ein Bauteil durchlaufen. Um zu gewährleisten, dass die Prüfungen unter hinreichenden Sauberkeitsbedingungen durchgeführt werden und somit das Analyseergebnis nicht unzulässig beeinflussen, darf der Blindwert maximal 10 % des Sauberkeitswerts betragen.

#### 3.1.1.1 Extraktionsverfahren

Abbildung 6 gibt einen Überblick über das Vorgehen zur Auswahl eines Extraktionsverfahrens. Zunächst wird das Prüfmedium gewählt. In den weiteren Schritten werden die geeignete Temperatur, Reinigungsmechanik und Dauer des Prozesses definiert.

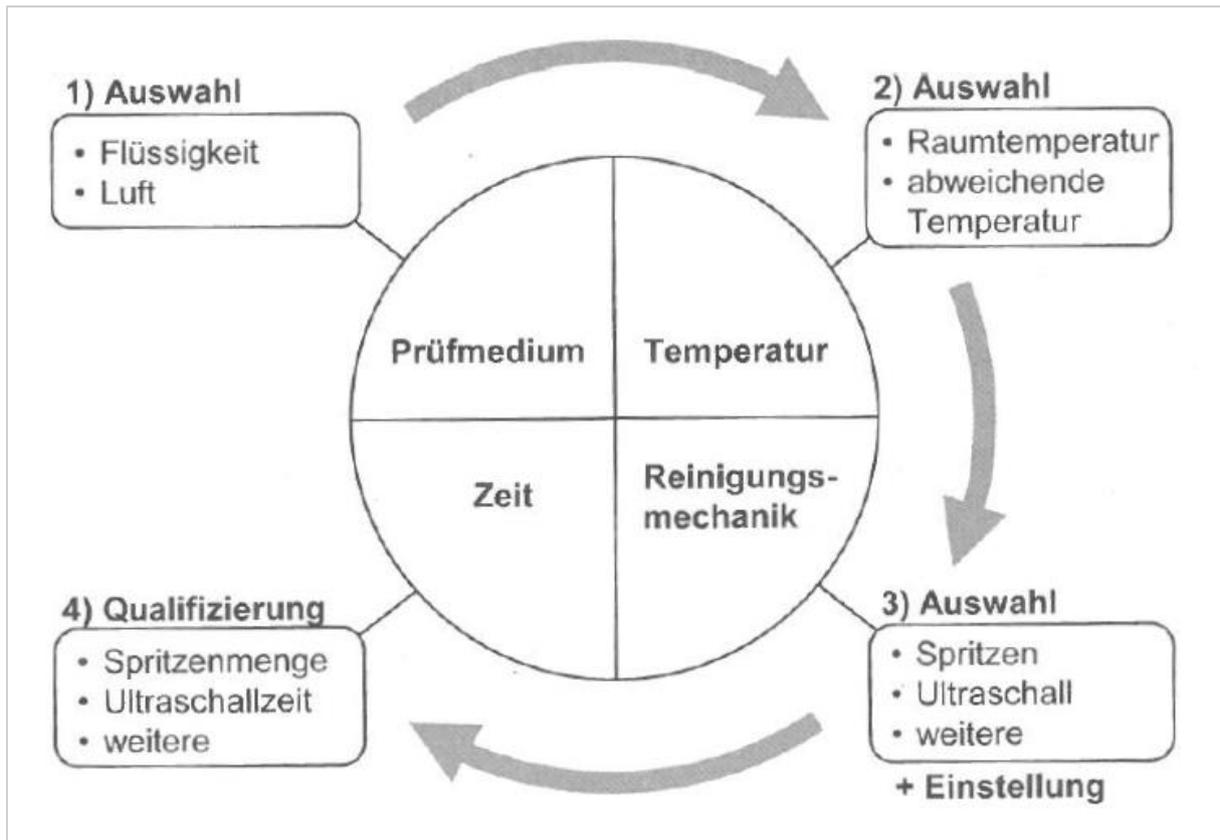


Abbildung 6: Vorgehensweise bei der Auswahl des für die Sauberkeitsanalyse geeigneten Extraktionsverfahrens [18]

Das Ziel der Extraktion ist es, lösbare Partikel vollständig vom Bauteil zu entfernen und abzutransportieren. Für die vorliegenden Analysen wurde eine Flüssigextraktion durchgeführt, dabei kommt eine Prüfliquidität als Reinigungsmedium zum Einsatz. Tabelle 5 gibt einen Überblick über die vorliegenden Extraktionsbedingungen.

Tabelle 5: Extraktionsbedingungen der von der Firma HYDAC durchgeführten Sauberkeitsanalysen

Extraktion	Spritzen
Gerät	HYDAC CTU 1000
Medium	G60 Spezial
Druck	2 bar
Düse	Stahl, rund
Temperatur	22,9°C

Die Anforderung an die Extraktionsflüssigkeit ist, die adhäsiven Kräfte zwischen Bauteil und Schmutzpartikel zu lösen, ohne dabei die Oberfläche des Bauteils

anzugreifen. Dazu wurde der Industrieentfetter G 60 Spezial verwendet, welcher auf Lösemittelbasis basiert. Dieses Reinigungsmedium ist mit Metallen und Kunststoffen kompatibel und besitzt eine hohe Schmutzaufnahmefähigkeit. Die Entfernung von festen, partikulären Verunreinigungen und das sehr gute Lösevermögen bei Ölen und Fetten machen G 60 Spezial für die Analyse der Hydraulikteile zur idealen Extraktionsflüssigkeit.

Mechanische Krafteinwirkung unterstützt die Prüfflüssigkeit sowohl beim Ablösen als auch beim Abtransport der Verschmutzungen. Das mechanische Verfahren richtet sich sowohl nach Geometrie und Größe des Bauteils, als auch nach der Zugänglichkeit der Kontrollflächen. In diesem Fall wurde das Spritzen als Extraktionsverfahren gewählt. Die Prüfflüssigkeit wird über einen Freistrahler mit runder Düse appliziert. Dabei wird die mechanische Reinigungswirkung vor allem durch den Impuls beim Auftreffen des Strahles auf das Prüfobjekt erzielt. Verschiedene Parameter, wie wirkende Kräfte, Extraktionszeit und Menge der Prüfflüssigkeit, können adaptiert werden, um die Stärke der Extraktionswirkung zu beeinflussen. Für die vorliegenden Sauberkeitsanalysen wurde ein Applikationsdruck von 2 bar gewählt. Handelt es sich um kleine Bauteile, so sollten mehrere zu einem Prüflös zusammengefasst werden, um eine zu beprobende Oberfläche von mindestens 200 cm<sup>2</sup> zu erzielen. Aufgrund der individuellen Abmessungen der Teile wurden demzufolge unterschiedlich viele Bauteile analysiert. Mit einer Bauteiloberfläche von 227,96 cm<sup>2</sup> war ein Hydraulikgehäuse ausreichend für die Sauberkeitsanalyse, wohingegen beispielsweise drei Ventilblöcke nötig waren um eine Oberfläche von mehr als 200 cm<sup>2</sup> zu erreichen.

### 3.1.1.2 Filtration

Bei der Auswahl des passenden Analysefilters muss dessen Verträglichkeit mit der Prüfflüssigkeit sowie das Rückhaltevermögen berücksichtigt werden. Dabei sind die Anforderungen in der Sauberkeitsspezifikation wegweisend, welche Partikelgrößen vom Filter erfasst und anschließend analysiert werden sollen. Es muss beachtet werden, dass die Partikel unterschiedlich ausgerichtet sind, wenn sie auf den Filter auftreffen. Deshalb muss die gewählte Porenweite des Analysefilters deutlich kleiner sein als die Abmessungen der kleinsten zu untersuchenden Größenklasse. Im vorliegenden Fall wurde ein Nylon-Filterpad mit einer Porenweite von 5 µm verwendet.

### 3.1.1.3 Analyseverfahren

Wie bereits in Kapitel 2.3.2.1 erläutert, ist die Standardanalyse für eine Sauberkeitsspezifikation im Kunden-Lieferanten-Verhältnis ausreichend und wurde daher als Analyseverfahren gewählt. Im Rahmen einer Standardanalyse ist eine gravimetrische und eine lichtoptische Untersuchung notwendig. Die Gravimetrie dient der Erfassung der Gesamtmasse der extrahierten Partikelfracht. Zur Ermittlung des Rückstandsgewicht wurde das Filterpad für 30 Minuten bei 110°C getrocknet und anschließend mit der Analysenwaage ABT 100-5m der Firma Kern gewogen. Für die lichtoptischen Untersuchungen kam das Auflichtmikroskop HFD4 der Firma Jomesa zum Einsatz. Der Maßstab der mikroskopischen Aufnahmen beträgt 4,7 µm pro Pixel.

### 3.1.2 Ergebnisse

In den Analyseberichten der Hydraulik-Bauteile wurden Verschmutzungen ab einer Größe von 50  $\mu\text{m}$  aufgeführt. Außerdem wurden die Partikel in zwei Gruppen unterteilt: metallisch glänzende und nicht metallisch glänzende Partikel. Für jede Größenklasse wurde die Anzahl der vorgefundenen Partikel aufgelistet und basierend darauf der Component Cleanliness Code der Bauteile berechnet. In den drei folgenden Abbildungen (Abbildung 7, Abbildung 8 und Abbildung 9) sind zur Veranschaulichung Ausschnitte eines Analyseberichts gegeben. Hierbei handelt es sich um den Bericht des Hydraulikgehäuses. Zunächst werden die Analysebedingungen aufgelistet und die Messinstrumente spezifiziert. Anschließend werden die Ergebnisse der Blindwertermittlung aufgelistet. Wie in Abbildung 7 zu erkennen, wurden während der Beprobung 19 Partikel der Klasse E eingebracht.

Extraktion					
Anzahl Teile:	1	Spülflüssigkeit	G60 Spezial		
Extr. Verfahren:	Spritzen	Menge [ml]	3400		
Filter:	Nylon 5 µm	Nachspülen [ml]	5000		
		Volumenstrom [ml/min]	1500		
Trocknen					
Name/ Type / Nr.:	Pt100/3 + S002131		Kalibriert bis: Nov 23		
Temperatur:	110 C°		Trockendauer: 30 Minuten		
Gravimetrische Analyse					
Name:	Analysewaage	Type / Nr.:	Kern ABT 100-5m		
Kalibriert bis:	Sep 23	Wäge Auflösung:	0,01mg		
Messunsicherheit U (mg):	0,071	Gewicht pro Bauteil (mg):	0,07		
Gewicht (mg):	0,07				
Mikroskopie					
Name/ Typ / Nr.:	Jomesa SST-V12.56	Kalibriert bis:	Okt 23		
Messunsicherheit U (µm):	8				
Blindwert: 98 µm x 61 µm größter Partikel					
Länge [µm]	Code	auf Filtermembran		pro Bauteil	
		Insgesamt <sup>2</sup>	Metallisch	Insgesamt <sup>2</sup>	Metallisch
Zusammenfassung:					
> 600	J-N	0	0	0,0	0,0
100...600	F-I	0	0	0,0	0,0
50...100	E	19	2	19,0	2,0
Ausführliche Statistik:					
> 3000	N	0	0	0,0	0,0
2000...3000	M	0	0	0,0	0,0
1500...2000	L	0	0	0,0	0,0
1000...1500	KL	0	0	0,0	0,0
600...1000	J	0	0	0,0	0,0
400...600	I	0	0	0,0	0,0
200...400	H	0	0	0,0	0,0
150...200	G	0	0	0,0	0,0
100...150	F	0	0	0,0	0,0
50...100	E	19	2	19,0	2,0

Abbildung 7: Ausschnitt aus dem Analysebericht des Hydraulikgehäuses. Auflistung der Prüfbedingungen, Ergebnisse der Gravimetrie und Blindwert-Ermittlung

Abbildung 8 zeigt einen weiteren Ausschnitt des zugehörigen Analyseberichts. Hierbei sind die bei der mikroskopischen Analyse vorgefundenen Verschmutzungen aufgeführt und den einzelnen Größenklassen zugeordnet. Werden die Partikelzahlen nach Konzentrationsklassen codiert, kann der CCC-Wert des Bauteils bestimmt werden, welcher im unteren Teil der Abbildung gegeben ist.

Mit der mikroskopischen Analyse kann außerdem überprüft werden, ob der Blindwert 10 % des Sauberkeitswerts nicht überschreitet. Bei der Blindwertmessung (siehe Abbildung 7) wurden lediglich 19 Partikel der Größenklasse E vorgefunden, größere Schmutzteilchen wurden nicht identifiziert. Die mikroskopische Analyse des Filterpads des Hydraulikgehäuses zeigt 206 Partikel der Klasse E und zusätzlich Verunreinigungen größerer Klassen. Somit wird das Akzeptanzkriterium für den

Blindwert eingehalten, was gewährleistet, dass das Ergebnis von der Analyse nicht unzulässig beeinflusst wird.

### Technische Sauberkeit nach VDA Bd.19.1 / März 2015

#### Mikroskopische Analyse

Maßstab:	4,7 µm/Pxl	Auswerte-Ø [mm]:	44
Filterbelegung [%]:	0,033483	zulässige Belegung:	1,5 % (Cellulose), 3 % (Nylon)

Größter metallisch glänzender Partikel	Länge [µm]:	180	Breite <sup>1</sup> [µm]:	19
Größter nichtmetallisch glänzender Partikel	Länge [µm]:	228	Breite <sup>1</sup> [µm]:	113

Gestreckte Länge der längsten Faser	L <sub>str</sub> [µm]:	1219	Insg. [mm]:	1552
-------------------------------------	------------------------	------	-------------	------

Länge [µm]	Code	auf Filtermembran		pro Bauteil		pro 1000 cm <sup>2</sup>	
		Insgesamt <sup>2</sup>	Metallisch	Insgesamt <sup>2</sup>	Metallisch	Insgesamt <sup>2</sup>	Metallisch

#### Zusammenfassung:

> 600	J-N	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
100...600	F-I	50	7	50,0	7,0	219,3	30,7
50...100	E	206	5	206,0	5,0	903,7	21,9

#### Ausführliche Statistik:

> 3000	N	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
2000...3000	M	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
1500...2000	L	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
1000...1500	KL	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
600...1000	J	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
400...600	I	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
200...400	H	1	0	1,0	0,0	4,4	0,0
150...200	G	7	3	7,0	3,0	30,7	13,2
100...150	F	42	4	42,0	4,0	184,2	17,5
50...100	E	206	5	206,0	5,0	903,7	21,9

#### CCC (Component Cleanliness Code):

Insgesamt<sup>2</sup> = A(E10/F8/G5/H3/I00/J00/K-N00)

Abbildung 8: Ausschnitt aus dem Analysebericht des Hydraulikgehäuses. Ergebnisse der mikroskopischen Analyse

Der größte, im Rahmen dieser Analysen, vorgefundenen Partikel wurde bei der Sauberkeitsanalyse des Ventilblocks gesichtet. Das Bildmaterial aus dem zugehörigen Bericht ist in Abbildung 9 dargestellt. Es wurden jeweils der größte und der zweitgrößte metallisch glänzende bzw. nicht metallisch glänzende Partikel, und die längste Faser abgebildet. Zusätzlich ist ein Bild der Filterübersicht beigefügt, um die Belegung des Filterpads zu veranschaulichen. Der größte nicht metallisch glänzende Partikel, der hier mittig links dargestellt ist, misst eine Länge von 974 µm.

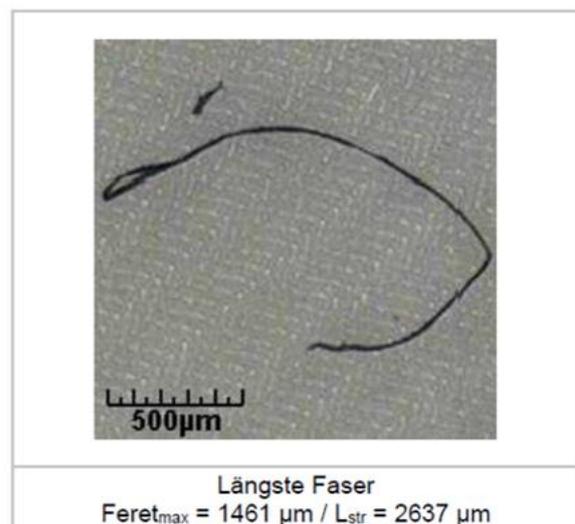
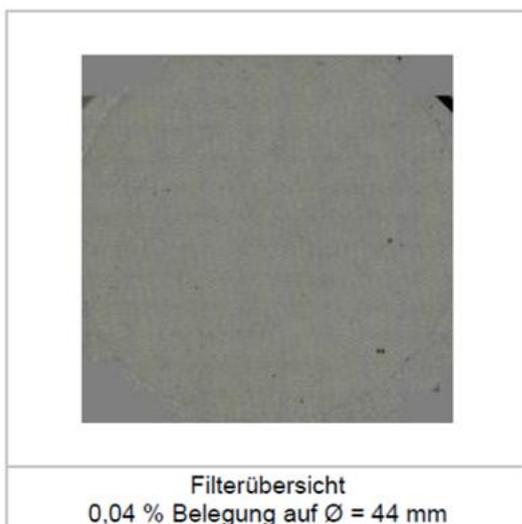
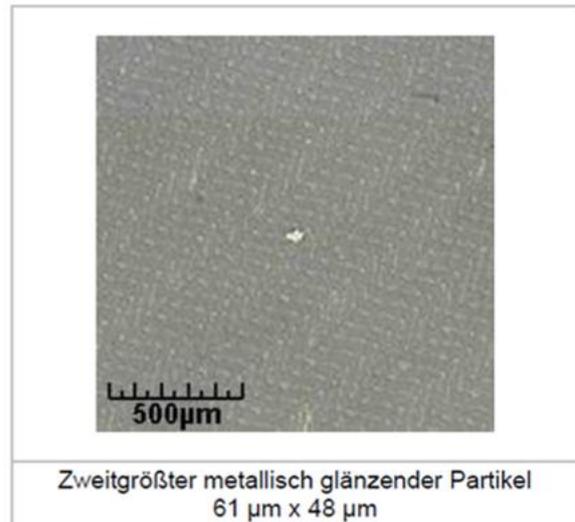


Abbildung 9: Ausschnitt aus dem Analysebericht des Hydraulikgehäuses.  
Bildmaterial der größten vorgefundenen Verunreinigungen

Die berechneten CCC-Werte aller untersuchten Bauteile sind in Tabelle 6 aufgelistet. Dabei ist zu erkennen, dass bei keinem der Teile Partikel größer 1000 µm gefunden

wurden (K-N00). Bei der Analyse des Kolbens wurden am wenigsten Verunreinigungen gefunden.

*Tabelle 6: Ermittelte CCC-Werte der Bauteile*

Bezeichnung	CCC-Wert
Anbindungsteil	A (E10/F7/G3/H3/I00/J00/K-N00)
Hydraulikgehäuse	A (E10/F8/G5/H3/I00/J00/K-N00)
Kolben	A (E8/F6/G00/H00/I00/J00/K-N00)
Kolbenstange	A (E11/F8/G00/H3/I00/J00/K-N00)
Membran Ausgleichsbehälter	A (E11/F9/G3/H00/I00/J00/K-N00)
Obere Verschlusschraube	A (E11/F7/G3/H00/I00/J00/K-N00)
Oberteil	A (E10/F7/G00/H00/I00/J00/K-N00)
Ventil	A (E11/F6/G00/H00/I00/J00/K-N00)
Ventilblock	A (E9/F8/G00/H4/I00/J3/K-N00)

Tabelle 7 zeigt, analog zu den Prüfberichten der Analyseteile, die Partikelverteilung über die Größenklassen E bis N. Dabei wurde die Partikelanzahl anteilig zur beprobten Oberfläche auf eine Fläche von 1000 cm<sup>2</sup> hochgerechnet. Die Partikel wurden anhand ihres metallischen Glanzes in zwei Gruppen unterteilt. Auffällig war dabei, dass mit durchschnittlich 79 % aller Partikel, überwiegend nicht metallisch glänzende Partikel vorgefunden wurden.

*Tabelle 7: Vergleich der vorgefundenen Partikelarten. Auflistung der nichtmetallischen und metallischen Partikel je Größenklasse*

Größenklasse [µm]	Partikelanzahl (Ø über alle Teile; je A = 1000 cm <sup>2</sup> )		
	Summe	n. met.	met.
E / 50-100	851,8	838,5	13,3
F / 100-150	132,6	128,3	4,3
G / 150-200	4,9	2,9	2,0
H / 200-400	2,5	2,0	0,5
I / 400-600	0,0	0,0	0,0
J / 600-1000	0,5	0,5	0,0

K / 1000-1500	0,0	0,0	0,0
L / 1500-2000	0,0	0,0	0,0
M / 2000-3000	0,0	0,0	0,0
N > 3000	0,0	0,0	0,0

Die Ergebnisse aus Tabelle 7 sind grafisch in Abbildung 10 veranschaulicht. Dabei sind die vorgefundenen Partikel von je 1000 cm<sup>2</sup> beprobter Bauteiloberfläche über die untersuchten Größenklassen aufgetragen. Da der größte im Rahmen der Analysen vorgefundene Partikel in der Größenklasse J liegt, werden bei der Grafik die Klassen K bis N vernachlässigt. Zur besseren Veranschaulichung ist die vertikale Achse logarithmisch mit einer Basis von 10 skaliert.

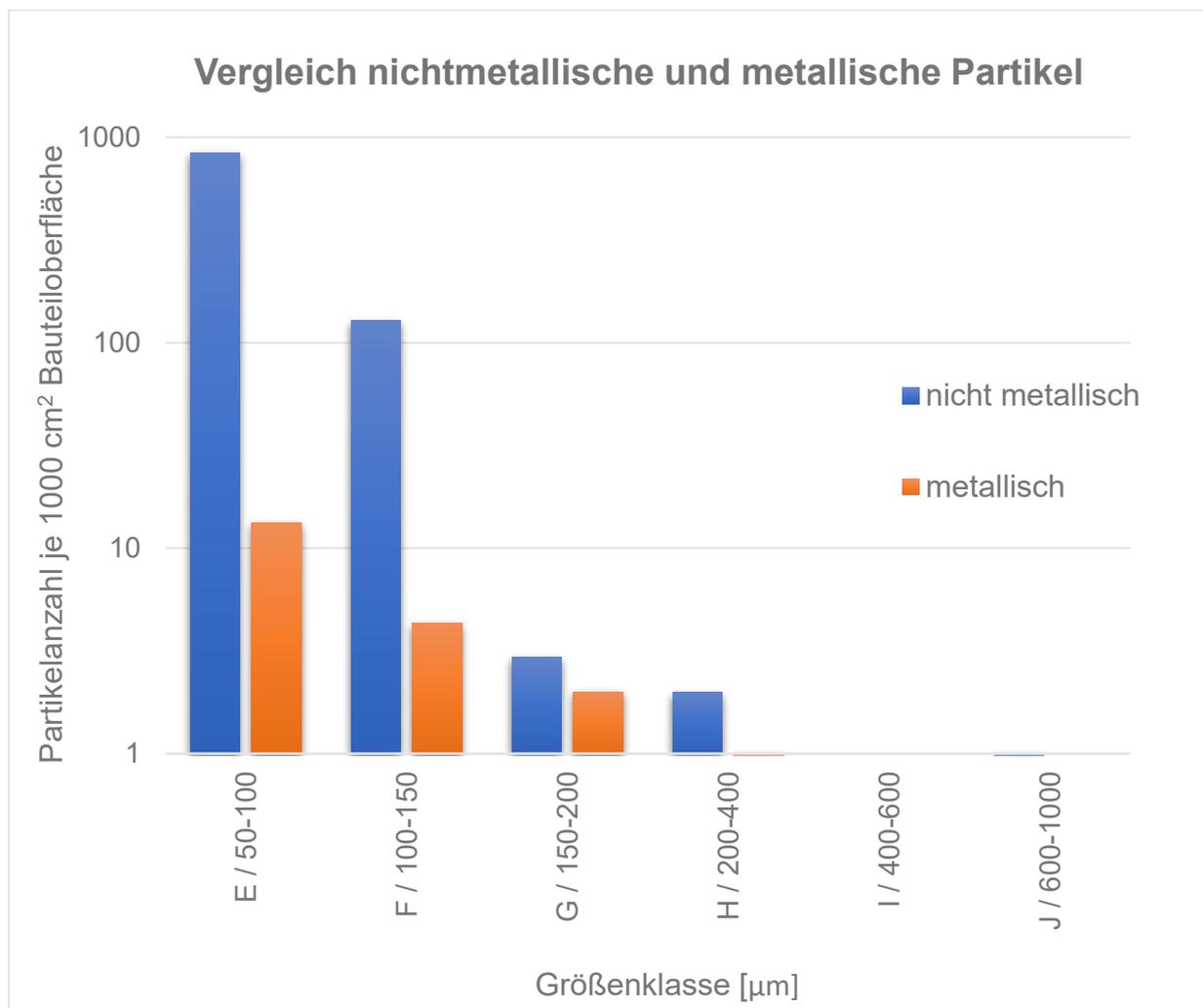


Abbildung 10: Vorgefundene nichtmetallische und metallische Partikel pro 1000 cm<sup>2</sup> Bauteiloberfläche

### 3.1.3 Reinigung der Bauteile

Die Hydraulik-Komponenten wurden nur stichprobenartig zur Sauberkeitsanalyse eingesendet. Um alle Bauteile der sieben verwendeten Testsysteme in einen definiert sauberen Zustand zu bringen, wurden die verbliebenen Teile gereinigt. Die Bauteilreinigung wurde ebenfalls von der Firma HYDAC übernommen. Dabei kam eine Reinigungsanlage der Firma Karl Roll zum Einsatz, welche unter Vakuum betrieben wird. Als Reinigungsfluid wurde das Industrielle Lösemittel Dowclene 1601 verwendet, das aufgrund seiner unpolaren und polaren Eigenschaften für eine Vielzahl von Reinigungsaufgaben sehr gut geeignet ist. Für die Reinigung der vorliegenden Hydraulikteile kam ein Beutelfilter mit einer Maschenweite von 10 µm zum Einsatz.

### 3.2 Betrachtung mittels Mikro-Computertomographie

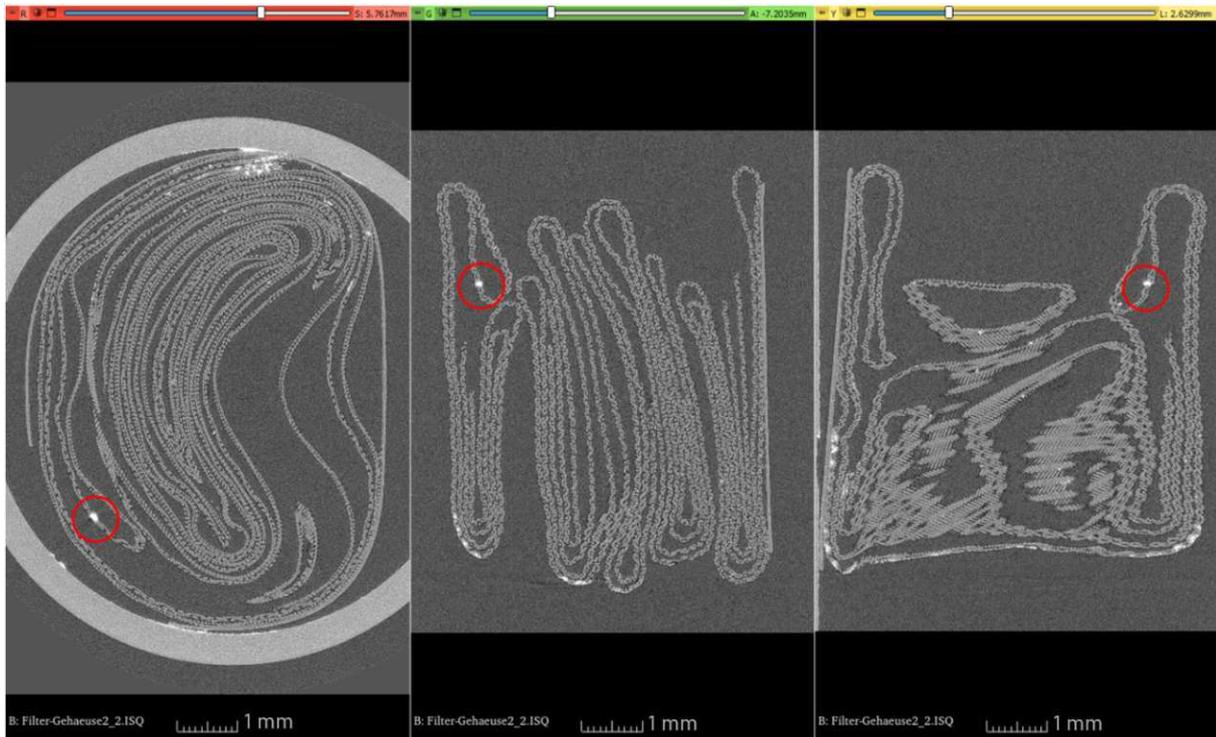
Im Rahmen der von der Firma HYDAC durchgeführten Sauberkeitsanalysen wurden die Filterpads mittels Lichtmikroskop analysiert. Eine 2D-Partikelanalyse bestimmt lediglich die Projektion der Partikel in der Ebene, die Tomographie hingegen ermöglicht eine präzise Analyse der Länge, Breite und Dicke der Partikel. Zur Beurteilung der Schädigungswirkung ist die Form und daher eine dreidimensionale Betrachtung von großer Bedeutung, denn die Dicke eines Teilchens kann ausschlaggebend dafür sein, ob es in einen Spalt oder eine Passung eindringen kann. Um eine Information über die 3D Geometrie der Verunreinigungen zu erhalten, wurde exemplarisch eines der für die Sauberkeitsanalyse verwendeten Filterpads analysiert. Da die Abmaße der Partikel im  $\mu\text{m}$ -Bereich liegen, wurde das Filterpad in einem Mikro-Computertomograph ( $\mu\text{CT}$  100, Scanco Medical AG, Schweiz) untersucht. Betrachtet wurde das Filterpad, das für die Sauberkeitsanalyse des Hydraulikgehäuses verwendet wurde. Das Pad wurde zusammengerollt in einen Probenbehälter mit 9 mm Durchmesser gegeben und gescannt. Der Scan wurde mit einer maximalen Röhrenspannung von 40 kVp und einem Röhrenstrom von 200  $\mu\text{A}$  aufgenommen. Dabei kam ein Aluminiumfilter mit einer Dicke von 0,5 mm zum Einsatz und eine Voxelgröße von 3,3  $\mu\text{m}$  wurde erzielt. Die Integrationszeit der Aufnahme wurde auf 200 ms festgesetzt und es wurden die gemittelten Werte aus drei Scanvorgängen verwendet (average data 3).

Zur Auswertung der Daten wurde die Software 3D Slicer ([slicer.org](http://slicer.org)) verwendet. Mithilfe von Segmentierungs-Werkzeugen konnten aus den CT-Bildern dreidimensionale Modelle der Partikel erstellt werden. Dafür wurden zunächst quaderförmige, die Partikel umschließende Bereiche ausgeschnitten. Anschließend wurden Farbmarkierungen im Partikel und im Hintergrund platziert. Ausgehend von diesen Markierungen konnten die Konturen der abgebildeten Strukturen identifiziert und die Partikel vollständig eingefärbt werden. Die so generierte Segmentierung kann, falls erforderlich, korrigiert und anschließend als Modell exportiert werden.

Im Folgenden soll anhand eines segmentierten Partikels veranschaulicht werden, wie aufschlussreich eine präzise Analyse mittels Mikrotomographie im Vergleich zur Projektion eines Partikels in der Ebene ist.

Abbildung 11 zeigt das Filterpad, welches in den drei verschiedenen Ebenen des tomographischen Scans dargestellt wird. Links ist die Draufsicht auf den

Probenbehälter abgebildet, in der Mitte die Vorderansicht und das rechte Bild zeigt die Seitenansicht. Die roten Kreise markieren ein im Filterpad gefundenes Partikel.



*Abbildung 11: Mikrotomographie-Scan eines aufgerollten Filterpads. Draufsicht, Vorder- und Seitenansicht eines Partikels im Filterpad*

Nachdem das Partikel in allen drei Ansichten identifiziert wurde, kann die Datei auf den gewünschten Bereich zugeschnitten und mit der Segmentierung der Bilder begonnen werden. Dabei werden die Bilder in Bereiche zerlegt, welche dem Partikel oder dem Hintergrund zugeordnet werden. Zusätzlich kann ein 3D-Modell des Partikels generiert werden. Die segmentierten Partikel-Modelle können direkt vermessen werden. Dieser Schritt ist in Abbildung 12 veranschaulicht. Das Partikel ist hier grün dargestellt. Mithilfe der verschiedenen Ansichten wurde ein Quader erstellt, der das Teilchen exakt umschließt. Folgende Abmaße wurden ermittelt: Länge 70,7  $\mu\text{m}$ ; Breite 103,5  $\mu\text{m}$ ; Tiefe 137,0  $\mu\text{m}$ .

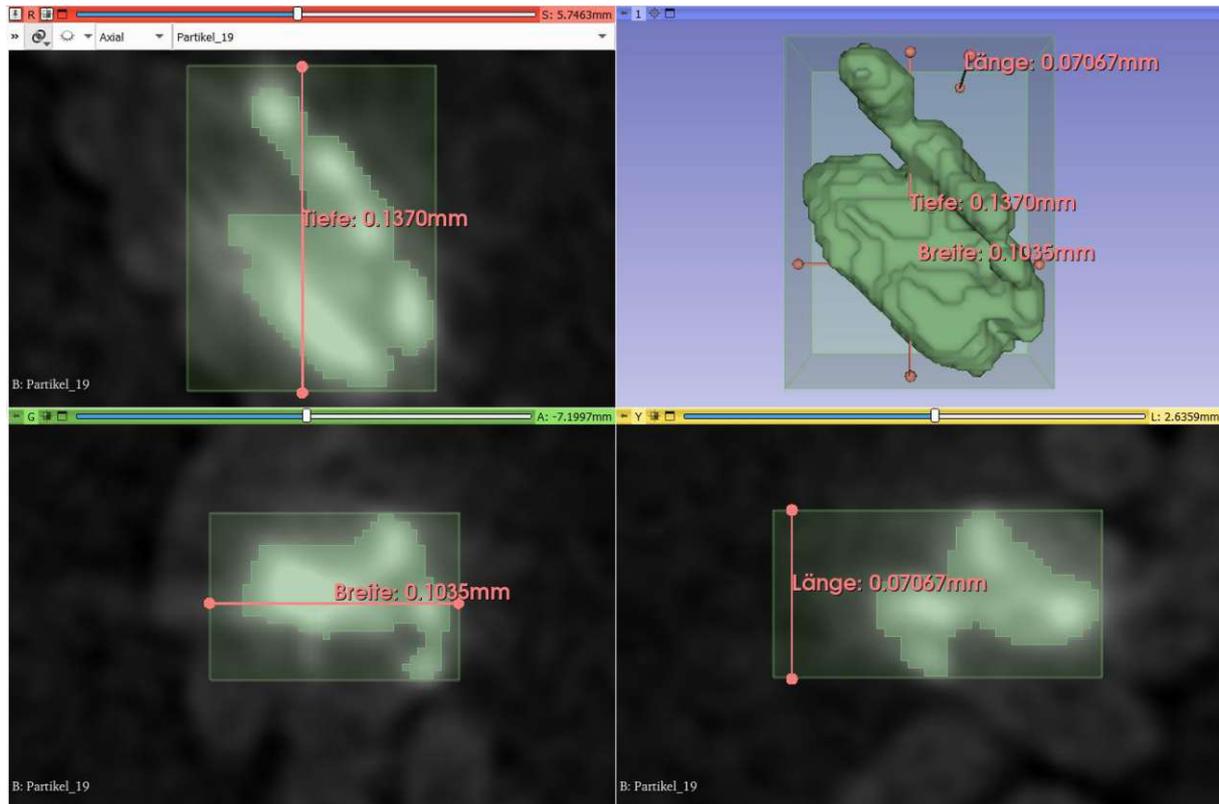


Abbildung 12: Segmentierung eines Partikels aus CT-Daten und Messung der Partikeldimensionen

Abbildung 13 zeigt das erarbeitete Partikel-Modell aus verschiedenen Perspektiven.

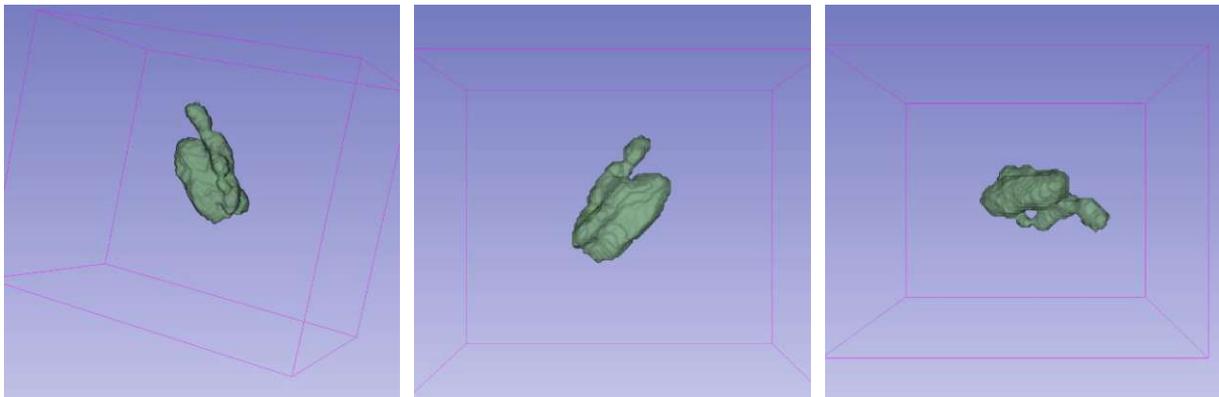
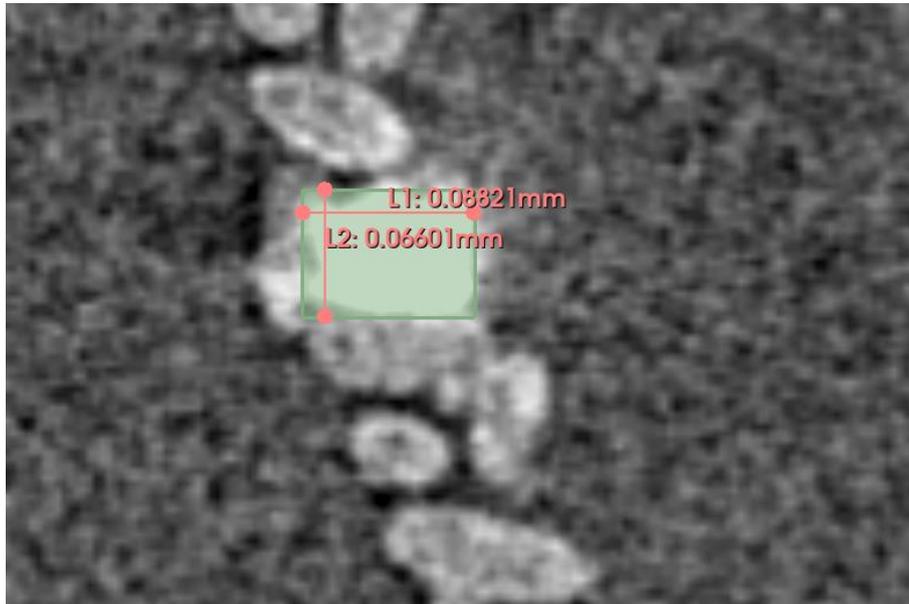


Abbildung 13: 3D-Modell des Partikels aus verschiedenen Perspektiven

Verglichen mit der 2D Ansicht der Ebenen des CT-Datensatzes, konnten durch die Analyse des mikrotomographischen Scans zusätzlich wichtige Informationen gewonnen werden. Betrachtet man beispielsweise nur die Vorderansicht des CT-Scans, als zweidimensionales Abbild des Partikels (siehe Abbildung 14), so kann die Längen- und Breiteninformation des Bildes in einer Schnittebene erfasst werden.

Allerdings liegt weder eine Tiefeninformation noch eine Information über die Form des Partikels vor.



*Abbildung 14: Ausschnitt aus der Vorderansicht eines mikrotomographischen Scans eines Filterpads mit Partikel*

Aus Abbildung 14 können die Abmaße des vorliegenden Partikels entnommen werden, es wurde eine Breite von 88,2  $\mu\text{m}$  (L1) und eine Länge von 66,0  $\mu\text{m}$  (L2) ermittelt. Vergleicht man diese Maße mit der Vermessung des segmentierten Partikels aus Abbildung 12, ist zu erkennen, dass das Partikel mit 103,5  $\mu\text{m}$  Breite und 70,7  $\mu\text{m}$  Länge in Wirklichkeit deutlich größer ist, als die Vorderansicht vermuten lässt. Das zeigt, dass ein zweidimensionales Bild nur eingeschränkt Rückschlüsse auf das tatsächliche Teilchen und die damit verbundene Schädigungswirkung zulässt. Wird nur die Projektion in einer Ebene betrachtet, so kann das Partikel aufgrund seiner Ausrichtung oder des Blickwinkels kleiner wirken als es tatsächlich ist.

Aus den CT-Scans des Filterpads wurden beispielhaft 28 Partikel segmentiert und vermessen. Das dabei größte vorgefundene Partikel war 144,3  $\mu\text{m}$  lang, 132,5  $\mu\text{m}$  breit und 70,8  $\mu\text{m}$  dick. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass die hier verwendete Messmethode sich von der Methode zur Partikelvermessung in den Prüfberichten der Firma HYDAC unterscheidet. Für die im Rahmen der Sauberkeitsanalysen durchgeführten Partikelvermessungen von HYDAC wurde die Länge als größtmöglicher senkrechter Abstand zweier den Partikel berührenden Parallelen gewählt (siehe Abschnitt 2.3.2.1). Dies ist links in Abbildung 15

veranschaulicht, für  $L_{max}$  wird eine Länge von 160  $\mu\text{m}$  ermittelt. In der hier vorliegenden Auswertung der CT-Daten wurden die Dimensionen des Teilchens in den Ebenen der tomographischen Scans gemessen (siehe rechtes Bild, Abbildung 15). Aufgrund der unterschiedlichen Messmethoden wurden bei Analyse des Filterpads durch die Firma HYDAC größere Längenmaße ermittelt als bei der Untersuchung der CT-Scans.

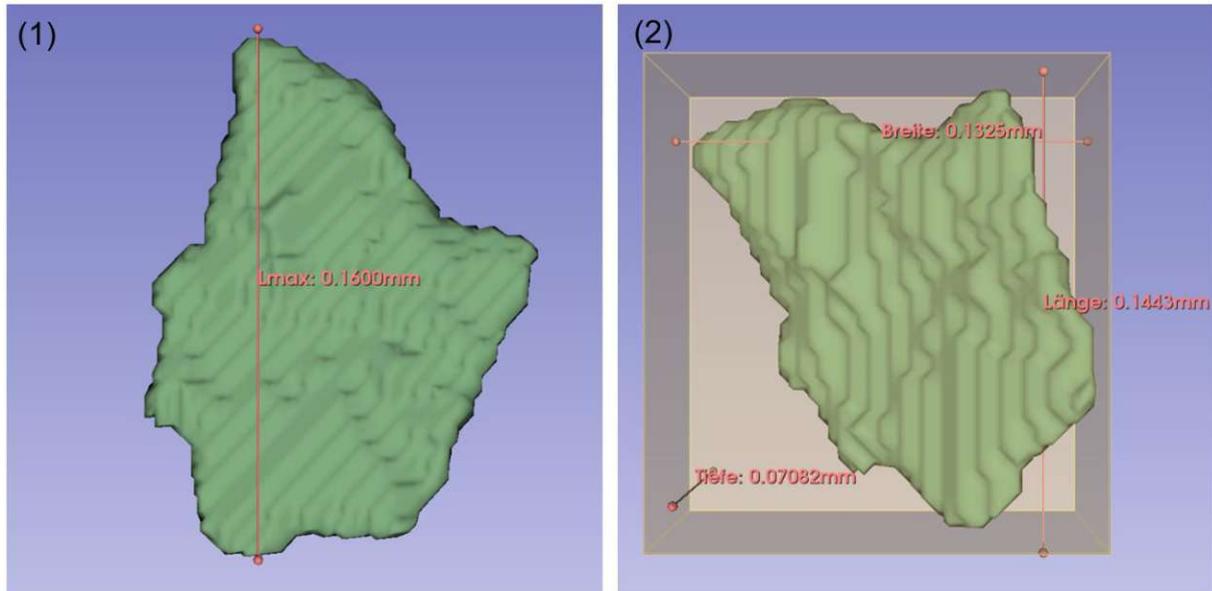


Abbildung 15: Vergleich der Methoden zur Partikelvermessung. (1)  $L_{max}$ , (2) Vermessung in den Ebenen der CT-Scans

Die Maße aller untersuchten Partikel und einige zugehörige Abbildungen sind im Anhang A der Arbeit zu finden.

### 3.3 Montage der Hydrauliksysteme

Um die gereinigten Hydraulik-Bauteile nicht wieder zu verunreinigen bzw. ungewollt Partikel ins System einzubringen, muss während der Montage besonders sorgfältig vorgegangen werden. Vor Beginn der Montagearbeiten wurden jeweils der Arbeitsplatz und die benötigten Werkzeuge mit fusselfreien Tüchern gereinigt. Besonders sauberkeitskritische Vorrichtungen, wie beispielsweise ein Zylinder, der zum Befüllen des Systems mit Öl erforderlich ist, wurden im Ultraschallbad gesäubert. Es wurde ein neuer Tiegel Schmierfett und frisch abgefülltes Schmieröl verwendet. Montiert wurden die Hydrauliksysteme von einem Monteur der einen Reinraum-Overall und Handschuhe trug. Abbildung 16 zeigt ein Foto, das während der Montage des Anbindungsteils aufgenommen wurde. Die benötigten Bauteile wurden sauber anreichert. Dafür wurden die Tütchen von einer zweiten Person geöffnet und der Monteur konnte die Teile direkt entnehmen, ohne in Kontakt mit potenziell verunreinigten Verpackungen zu kommen (siehe Abbildung 17).

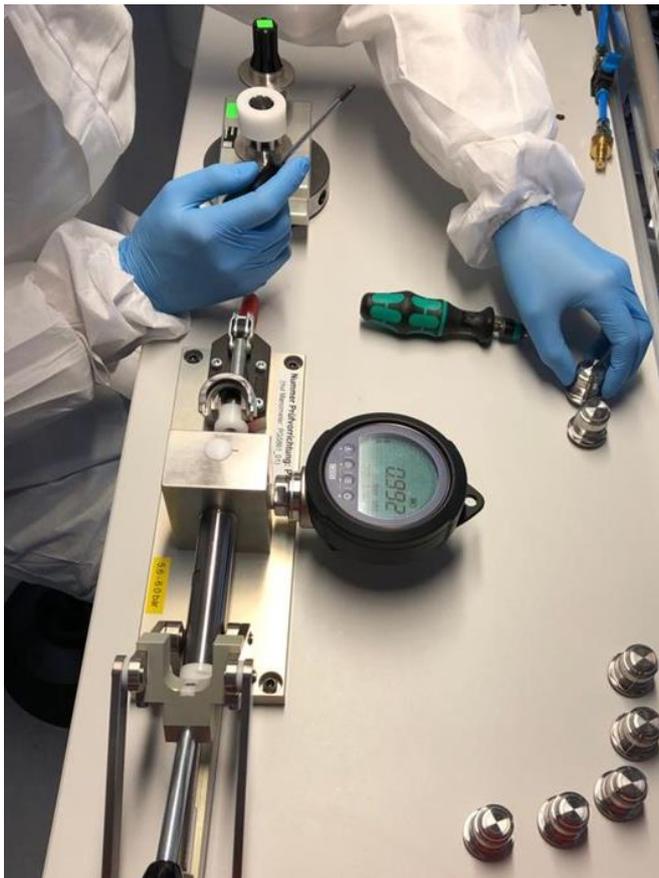


Abbildung 16: Montage der Unterbaugruppe „Anbindungsteil“

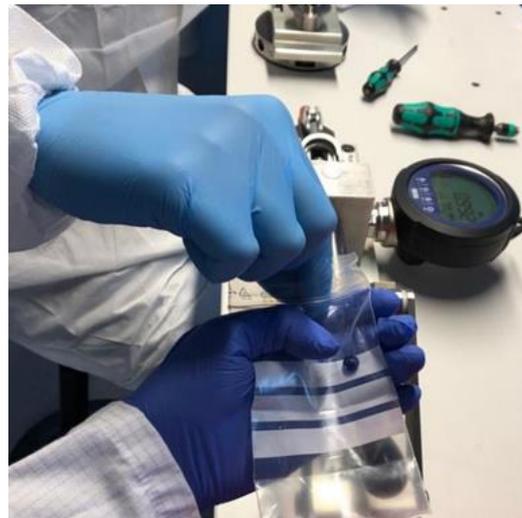


Abbildung 17: Anreichen der gereinigten Teile bei der Montage

### 3.4 Fremdkontaminationen

Anhand der vorgefundenen Verunreinigungen wurden Partikel ausgewählt, welche den Kontaminationszustand möglichst originalgetreu repräsentieren sollen. Verschmutzungszustände unterschiedlicher Partikelanzahl und -dimensionierung wurden festgelegt.

#### 3.4.1 Auswahl der Kontaminationspartikel

Die künstlichen Schmutzpartikel wurden anhand der Ergebnisse der Sauberkeitsanalysen ausgewählt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass nicht nur die Größe der Partikel einen Einfluss auf das Schädigungspotenzial hat, sondern auch das Material. Zusätzlich weisen die gefundenen Partikel unterschiedliche geometrische Formen auf. Um die bestehende Kontamination möglichst originalgetreu darzustellen, muss demnach ein Kompromiss aus Größe, Material und Form der Partikel gefunden werden.

Bei der Auswahl der Fremdkontaminationen sollte zunächst ein Augenmerk auf die genaue Abgrenzbarkeit in verschiedene Größenklassen gelegt werden, da nur so nachvollziehbare Rückschlüsse von Partikelgröße auf eine Schädigungswirkung gemacht werden können. Die in den Prüfberichten erfassten Partikel lagen in einer Größenordnung von 50  $\mu\text{m}$  bis 974  $\mu\text{m}$ , was den Klasse E (50 - 100  $\mu\text{m}$ ) bis J (600 - 1000  $\mu\text{m}$ ) entspricht. Dementsprechend wurden auch die Größenklassen der Kontaminationspartikel ausgewählt.

Das Material sollte anhand der Werkstoffe des Hydrauliksystems bestimmt werden, da Partikel zum Beispiel während der Fertigung oder durch Füge- oder Montageprozesse entstehen können. Auch Abriebpartikel werden so am besten repräsentiert. Zusätzlich können Substanzen, die während des Produktionsprozesses mit dem System in Kontakt kommen oder Verpackungsmaterialien, bedeutend sein. Für die vorliegenden Versuche wurden zwei Werkstoffe gewählt. Um die metallisch glänzenden Partikel darzustellen, wurde der Werkstoff EN AW-6082 T6 verwendet, eine Aluminiumlegierung, die einer T6-Wärmebehandlung unterzogen wurde. Dabei handelt es sich um den Werkstoff des Hydraulikgehäuses. Zur Repräsentation der aus Kunststoff bestehenden Systembestandteile, wie den Isolationselementen, den Führungsbändern oder der Membran des Ausgleichsbehälters, wurde Polypropylen gewählt.

Betrachtet man die Geometrie, so ist zu erkennen, dass der Großteil der Partikel eine längliche Form besitzt. Die Verhältnisse von Länge zu Breite sind variabel.

Für die Testungen wurden Normpartikel der Firma BIDAG gewählt, welche in fest definierten Längenabmessungen und in den gewünschten Materialien erhältlich sind. Auch die längliche Form der Normpartikel spiegelt die reale Kontamination wider. Die ausgewählten Kontaminationspartikel sind in Tabelle 8 aufgelistet. Aufgrund der abnehmenden Anzahl an vorgefundenen Kontaminationen bei zunehmender Partikelgröße, in Kombination mit einer Mindestabnahmemenge, wurden einige Größenklassen vernachlässigt. Die Polypropylen-Partikel wurden mit UV-Indikatoren in den Farben rot, blau, gelb und schwarz bestellt.

*Tabelle 8: Übersicht der für die Fremdkontamination verwendeten Normpartikel*

Werkstoff	Größenklasse
Aluminium AW-6082 T6	E / 50-100 $\mu\text{m}$ F / 100-150 $\mu\text{m}$ G / 150-200 $\mu\text{m}$ I / 400-600 $\mu\text{m}$
Polypropylen	E / 50-100 $\mu\text{m}$ F / 100-150 $\mu\text{m}$ G / 150-200 $\mu\text{m}$ H / 200-400 $\mu\text{m}$ J / 600-1000 $\mu\text{m}$

In Abbildung 18 ist ein Foto der bei der Firma BIDAG geordneten Normpartikel im Anlieferungszustand zu sehen.



*Abbildung 18: Normpartikel der Firma BIDAG. Polypropylen-Partikel mit bunten UV-Indikatoren (oben) und Aluminiumpartikel (unten)*

### 3.4.2 Festlegung der verschiedenen Kontaminationszustände

Um verschiedenen Kontaminationszuständen unterschiedliche Kennwerte zuordnen zu können, wurden die Hydrauliksysteme vor den Testungen unterschiedlich stark verschmutzt. Dazu wurden die sieben zu testenden Hydrauliken in vier Gruppen unterteilt. Als Anhaltspunkt für die Definition der einzelnen Zustände dient eine Sauberkeitsfibel der Firma HYDAC, in der Bauteilsauberkeitscodes für verschiedene Flüssigkeitskreisläufe gegeben sind. Basierend auf dem festgelegten Wert  $CCC = A(F8/G7/H5/I4)$  für den Kreislauf einer Arbeitshydraulik [21] wurden die folgenden Verschmutzungszustände gewählt:

1. „sauber“ – ohne künstliche Kontamination
2. Unterhalb des CCC-Grenzwertes
3. Auf dem CCC-Grenzwert – gerade noch zulässige Kontamination
4. Oberhalb des CCC-Grenzwertes

Da der definierte CCC-Wert nur Partikelzahlen von Größenklasse F bis I vorgibt, wurden zusätzlich Partikel der Klasse E hinzugefügt, um die vorgefundene Kontamination möglichst originalgetreu zu repräsentieren. Ausgehend von Gruppe 3 „auf dem CCC-Grenzwert“, wurden die Partikelanzahlen halbiert bzw. verdreifacht, um die Partikelfracht der Gruppe 2 bzw. 4 zu erhalten. Außerdem wurden für die am stärksten verschmutzte Gruppe 4, Partikel der Klasse J zugegeben. Die vorgenommenen Sauberkeitsanalysen zeigen, dass ca.  $\frac{3}{4}$  der vorgefundenen Kontaminationspartikel nichtmetallisch sind. Allerdings wird die Anzahl der metallischen Partikel bei der lichtmikroskopischen Analyse unterschätzt, da diese Methode voraussetzt, dass die Teilchen reflektieren. Die Oberfläche der Restschmutzpartikel ist durch mechanische und thermische Beanspruchung jedoch häufig nicht glänzend, sondern korrodiert oder matt und wird daher als nichtmetallisch klassifiziert. [22] Zusätzlich wird derzeit von einer hohen Fremdkontamination durch Verpackung und Handling ausgegangen, welche durch eine Anpassung der Verpackungsempfindlichkeitsklassen eingegrenzt werden soll. Aufgrund dieser beiden Aspekte wurde das Verhältnis von nichtmetallischen zu metallischen Partikel 50:50 gewählt. Tabelle 9 zeigt die rechnerisch ermittelte Anzahl der Kontaminationspartikel je Größenklasse und Material für die verschiedenen Zustände. Die rote Linie zeigt die maximal zulässige Partikelgröße des Sauberkeitsgrenzwertes an. Für die

Größenklassen H und I standen jeweils nur Partikel eines Materials zur Verfügung, weshalb die gesamte Partikelanzahl aus diesem besteht. Die in Tabelle 9 aufgelisteten Werte wurden gerundet, um die Anzahl der einzubringenden Partikel zu erhalten.

*Tabelle 9: Definition der Verschmutzungszustände für die Fremdkontamination, angelehnt an den Bauteilsauberkeitscode für den Kreislauf einer Arbeitshydraulik [21]. Getroffene Veränderungen sind mit roten Zahlenwerten markiert. Kennzeichnung der maximal zulässigen Partikelgröße durch eine rote Linie. Ableitung der Kontamination der Prüfgruppen 1,2 und 4 ausgehend von der auf dem CCC-Wert basierenden Gruppe 3. Auflistung der verwendeten Partikel pro Hydrauliksystem, nach Prüfgruppen aufgegliedert*

Partikelanzahl pro Hydrauliksystem (Oberfläche ca. 190 cm <sup>2</sup> )										
Prüfgruppe	1 - sauber	2 - unterhalb CCC			3 - auf CCC			4 - oberhalb CCC		
					CCC=A(E10/F8/G7/H5/I4)					
Anzahl Testsysteme	2	2			1			2		
Partikelanzahl je Größenklasse	ges.	ges.	n.met	met.	ges.	n.met	met.	ges.	n.met	met.
E / 50-100 [µm]	0*	95	47,5	47,5	190	95	95	570	285	285
F / 100-150 [µm]	0*	23,8	11,9	11,9	47,5	23,8	23,8	142,5	71,3	71,3
G / 150-200 [µm]	0*	12,4	6,2	6,2	24,7	12,4	12,4	74,1	37,1	37,1
H / 200-400 [µm]	0*	3	3	0	6,1	6,1	0	18,2	18,2	0
I / 400-600 [µm]	0*	1,5	0	1,5	3	0	3	9,1	0	9,1
J / 600-1000 [µm]	0	0	0	0	0	0	0	1,1	1,1	0
K / 1000-1500 [µm]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

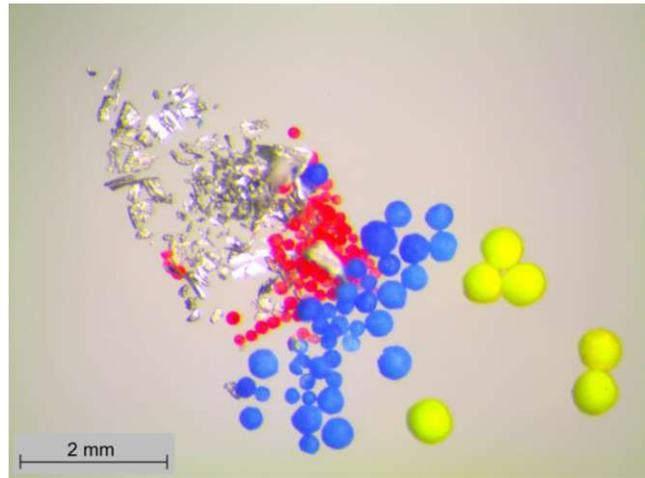
0\* ~ Idealfall; ● = zusätzlich hinzugefügt; ● = angepasst, da je nur ein Material dieser Größenklasse verfügbar

### 3.4.3 Einbringen der Kontaminationspartikel

Zum Einbringen der Kontaminationspartikel waren anfangs zwei verschiedene Ansätze geplant: Die größeren Partikel sollten mithilfe einer Pinzette per Hand unter dem Mikroskop abgezählt werden, für die kleineren war eine volumetrische Abmessung vorgesehen. Das händische Abzählen hat den Vorteil, dass die gewünschte Partikelanzahl exakt definiert werden kann. Allerdings ist das Abzählen bei größeren Partikelmengen mit einem hohen zeitlichen Aufwand verbunden. Deshalb sollte die Anzahl der kleineren, teilweise in großen Mengen vorliegenden Partikel, über deren Volumen bestimmt werden. Für diesen Zweck wurden mittels Funkenerosion Lochbleche mit definierter Stärke und Bohrungsdurchmesser angefertigt. Durch die Berechnung des Volumens des zylinderförmigen Bohrlochs konnte näherungsweise die für die Füllung des Loches benötigte Partikelanzahl ermittelt werden. Geplant war es, die Bleche auf einen Glasträger aufzulegen, die gewünschten Partikel in das Bohrloch zu geben und die überschüssigen Partikel abzustreifen. In der Realität konnte so allerdings keine repräsentative Menge an Partikeln abgemessen werden, denn durch Verrutschen des Bleches, Abheben des Bleches vom Glasträger und Anhaften der Partikel kam es zu Ungenauigkeiten. Deshalb wurden schlussendlich die Partikel aller Größenklassen unter dem Mikroskop abgezählt. Dafür wurde das Stereomikroskop Leica MZ6 der Firma Leica Microsystems verwendet. Die Partikel wurden auf einen Glasträger gegeben, linienförmig angeordnet und sukzessive, durch Verschieben des Trägers, abgezählt. Die linienförmig aufgereihten Partikel sind in Abbildung 19 dargestellt. Dieser Schritt wurde zunächst für jede Partikelart einzeln durchgeführt, anschließend wurden sie zusammengeführt. In Abbildung 20 ist beispielhaft eine mikroskopische Aufnahme des Zustands der gerade noch zulässigen Kontamination „auf dem CCC-Grenzwert“ dargestellt. Die sechs gelben Polypropylen-Partikel gehören zur Größenklasse H (200 - 400  $\mu\text{m}$ ). Die 24 Partikel der Größenklassen F (100 - 150  $\mu\text{m}$ ) und die zwölf Partikel der Klasse G (150 - 200  $\mu\text{m}$ ) sind blau dargestellt. Die roten Partikel sind zwischen 50 und 100  $\mu\text{m}$  groß und auf 95 Stück abgezählt. Zusätzlich sind metallische Späne verschiedener Größen zu sehen. Diese wurden ebenfalls abgezählt, sind aber in dieser Abbildung schwerer voneinander differenzierbar als die bunten Polypropylen Partikel.



*Abbildung 19: Abzählen der auf einen Glasträger aufgereihten Partikel*



*Abbildung 20: Mikroskopische Aufnahme der Partikelzusammensetzung des Kontaminationszustand 3 „auf dem CCC-Grenzwert“, aufgenommen mit dem Stereomikroskop Leica MZ6*

Der Ort, an dem die Verunreinigungen eingebracht werden muss präzise gewählt werden, um eine Verteilung der Partikel im System zu erzielen. Kontaminiert man in Totzonen, also in Bereiche, die nicht an der Fließbewegung der Strömung teilnehmen, hinein, so ist die Verteilung nicht gewährleistet. Zur Identifikation der Totzonen und zur Wahl der passenden Applikationsstelle wurde die im Hydrauliksystem vorherrschenden Strömung untersucht. Dafür wurden bereits vorliegende Simulationsergebnisse der Firma Otto Bock analysiert. In der betrachteten Strömungssimulation wurde der Kolben mit einer Geschwindigkeit von 200 mm/s beaufschlagt. Abbildung 21 zeigt die Stromlinien während der Flexion, welche farblich nach ihrer Geschwindigkeit markiert sind. Dadurch wird die Strömungsbewegung mit ihren Verwirbelungen und Geschwindigkeitsänderungen in den einzelnen Segmenten des Systems veranschaulicht. Im Hydraulikzylinder ist in Richtung der Kolbenbewegung eine geradlinige Strömungsbewegung konstanter Geschwindigkeit zu erkennen. Diese ist auch in Abbildung 22 zu sehen, in der die Stromlinien während der Extension dargestellt sind. Die Simulationen lassen eine gute Durchmischung des Öls im Zylinder vermuten. Der rote Punkt markiert die Oberseite des Kolbens, welche als Ort der Kontamination gewählt wurde.

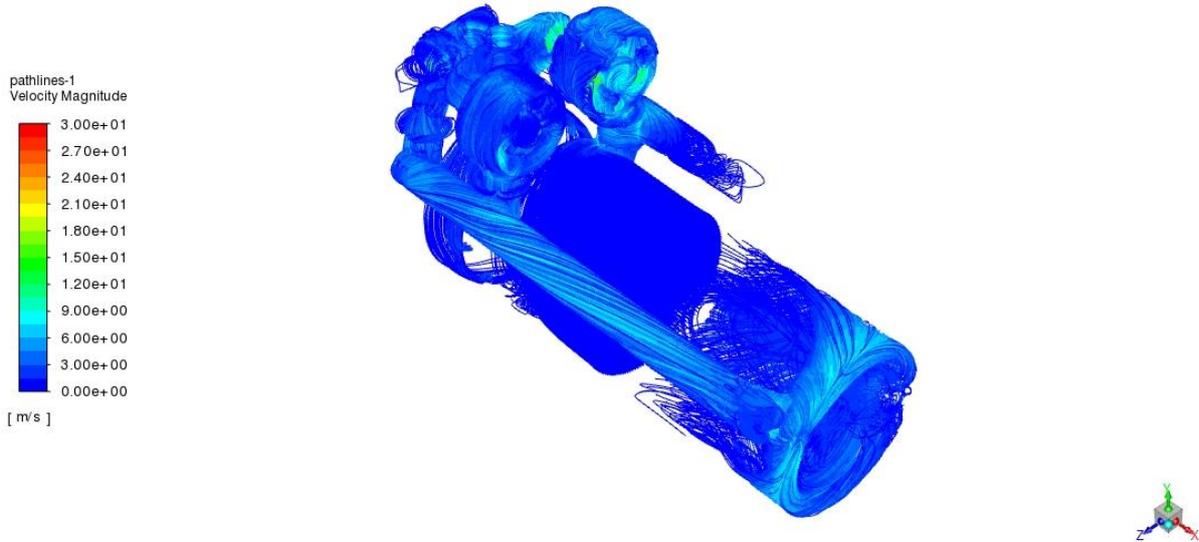


Abbildung 21: Geschwindigkeits-Stromlinien im Hydrauliksystem während der Flexion, mit einer Kolben-Geschwindigkeit von 200 mm/s

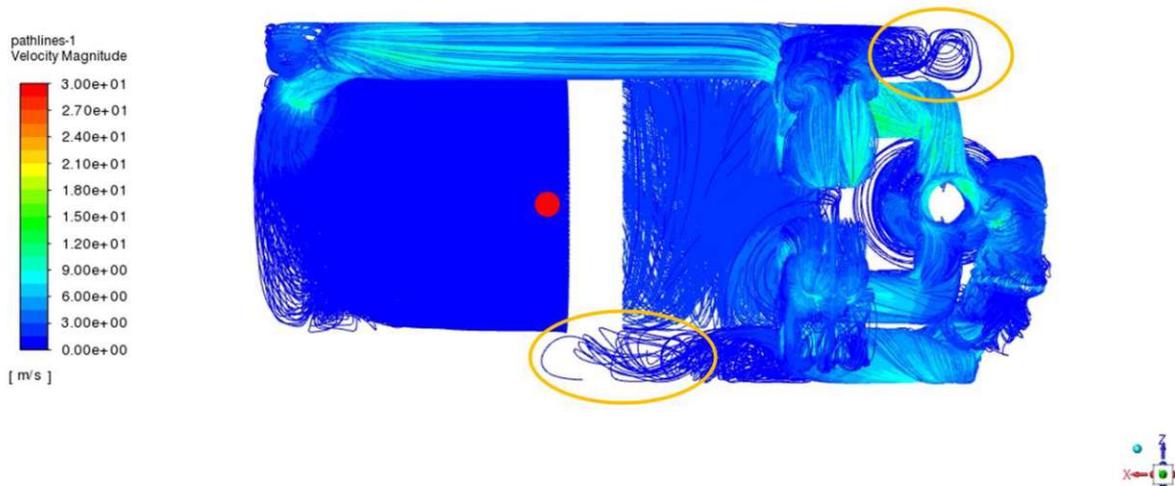


Abbildung 22: Geschwindigkeits-Stromlinien im Hydrauliksystem während der Extension mit einer Kolben-Geschwindigkeit von 200 mm/s. Kennzeichnung der Kontaminationsstelle (roter Punkt) und der Totzonen an den Enden der Kanäle (gelb markiert)

Rechts in Abbildung 22 ist der Bereich des Ventilblocks dargestellt. Die beiden Strömungskanäle, durch die das Hydrauliköl von einer in die andere Kammer gelangt, befinden sich in dieser Ansicht ober- und unterhalb des Ventilblocks und verlaufen horizontal. Es ist zu erkennen, dass am rechten Ende des oberliegenden und am linken Ende des untenliegenden Kanals die Stromlinien enden. Diese Bereiche sind in

der Abbildung gelb markiert. Hier kommt die Strömung zum Stillstand und das Hydrauliköl wird nicht mehr durchmischt, es handelt sich um Totzonen.

Um zu überprüfen, ob die eingebrachten Partikel dem Hydraulikfluid folgen, wurde die Stokes-Zahl (St) berechnet. Diese Zahl ist ein Maß für das Vermögen von Partikeln der umgebenden Strömung zu folgen. Sie gibt das Verhältnis der Relaxationszeit des Partikels ( $\tau_p$ ) zur charakteristischen Zeit der Strömung ( $\tau_f$ ) und wird mit Formel (3.1) [23] berechnet.

$$St = \frac{\tau_p}{\tau_f} \quad (3.1)$$

Bei Werten von  $St \ll 1$  können die Partikel der Strömung gut folgen.

Die Relaxationszeit beschreibt das Folgevermögen von Teilchen bei einer Änderung der Strömungsgeschwindigkeit oder des Strömungsfeldes. Dieses Zeitmaß kann mit Formel (3.2) [23] ermittelt werden.

$$\tau_p = \frac{\rho_p \cdot d_p^2}{18 \cdot \mu} \quad (3.2)$$

mit

$$\begin{aligned} \rho_p &= \text{Partikeldichte} \\ d_p &= \text{Partikeldurchmesser} \\ \mu &= \text{Viskosität des Fluids} \end{aligned}$$

Die charakteristische Zeit der Strömung kann durch Formel (3.3) [23] berechnet werden:

$$\tau_f = \frac{D}{u} \quad (3.3)$$

mit

$$\begin{aligned} D &= \text{charakteristische Länge} \\ u &= \text{Strömungsgeschwindigkeit} \end{aligned}$$

Durch die Berechnung der Stokes-Zahl wurde sichergestellt, dass sich die Kontaminationspartikel an die Bewegung der Strömung anpassen. Die Stokes-Zahl wurde für alle verwendeten Partikelgrößen und -materialien, sowie bei zwei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten ( $v_1 = 0,2 \text{ m/s}$  und  $v_2 = 0,5 \text{ m/s}$ ) berechnet. Die berechneten Werte der Stokes-Zahl lagen für alle Partikel weit unter eins, was

bestätigt das diese der Strömung folgen. Eine Tabelle der Berechnungen ist im Anhang B zu finden.

Anhand der Strömungssimulationen und der Zugänglichkeit während der Montage, wurde die Oberseite des Kolbens als sinnvoller Kontaminationsort gewählt.

Vor der gezielten Applikation der Normpartikel wurden die Systeme so weit aufgebaut, dass sich die Kolbeneinheit bereits im Hydraulikgehäuse befindet und der Ausgleichsbehälter mit dem Gehäuse verschraubt ist. Wie in Abbildung 23 zu sehen, ist die obere Verschlusschraube noch nicht montiert, wodurch die Oberseite des Kolbens frei zugänglich ist und kontaminiert werden kann. Die Partikelfracht wurde durch vorsichtiges Abstreifen des Glasträgers über der Kolbenfläche in den Hydraulikzylinder befördert. Nach der gezielten Verunreinigung wurde das Hydrauliksystem fertig montiert und mit Öl befüllt.



*Abbildung 23: Arbeitsplatz vor der Kontamination: Hydrauliksystem ohne obere Verschlusschraube, Partikelfracht auf Glasträger und verschiedene Hilfsmittel*

### 3.5 Orientierungsprüfungen

Um zu überprüfen, ob und in welchem Ausmaß die Verunreinigungen die Funktion des Hydrauliksystems beeinflussen, wurden hydraulische Orientierungsprüfungen durchgeführt. Bei allen durchgeführten Hydraulikprüfungen handelt es sich um standardisierte Prüfverfahren der Firma Otto Bock. Der Ablauf der Hydraulikprüfungen ist in Abbildung 24 veranschaulicht: Als erstes wurde eine Hydraulikcharakterisierung durchlaufen, welche aus mehreren einzelnen Messungen besteht. Im Anschluss wurde ein Dauertest, der die zu erwartende mechanische Beanspruchung des Systems simuliert, vollzogen. Abschließend wurden erneut Charakterisierungsmessungen durchgeführt, um zu sehen welche Veränderungen durch langfristigen Betrieb des verunreinigten Hydrauliksystems auftreten. Zusätzlich wurden die Hydrauliksysteme auf innere Dichtheit getestet. Zuletzt werden die Prüflinge einer thermischen Belastung ausgesetzt und die darauffolgende Veränderung des Ausgleichsbehälter-Innendrucks wird untersucht.

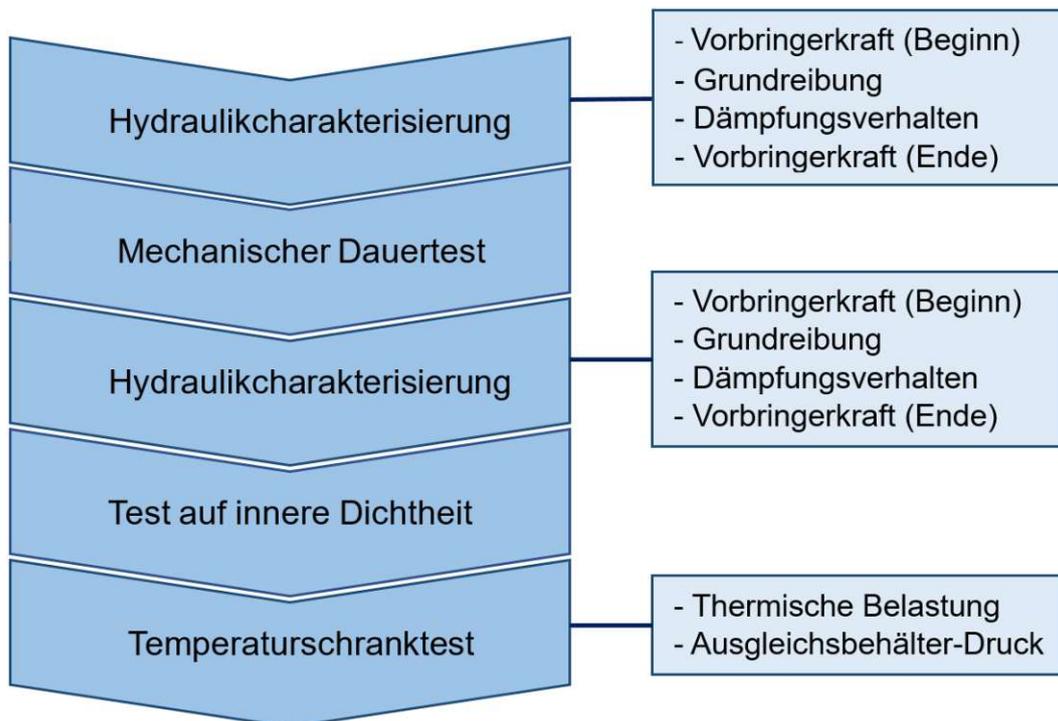
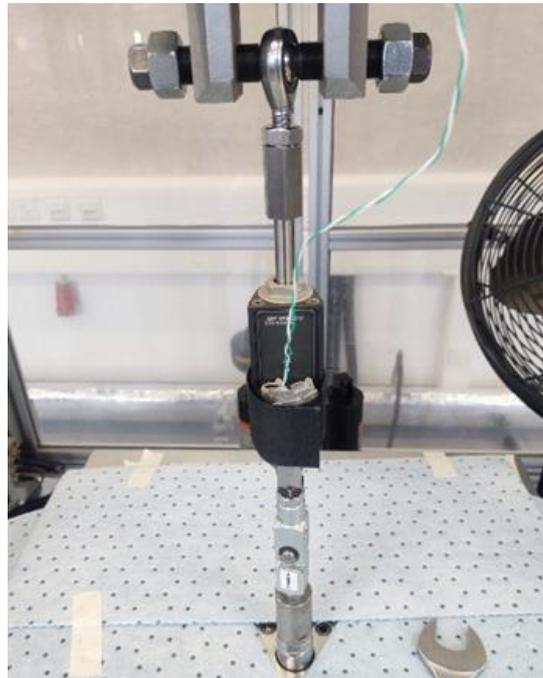


Abbildung 24: Flowchart zum Ablauf der Hydraulikprüfungen

### 3.5.1 Hydraulikcharakterisierung, Dichtheits- und Temperaturtest

Die Hydraulikcharakterisierungsprüfungen dienen zur Orientierung bezüglich des Verhaltens eines Systems. Für die Charakterisierung der Prüflinge wurde eine servohydraulische Linearprüfmaschinen eingesetzt. Es kam eine Maschine des Modells 8501 der Firma Instron, mit der zugehörigen Kraftmessdose 2518-102, zum Einsatz. Das Datenblatt der Kraftmessdose befindet sich im Anhang C der Arbeit. Abbildung 25 zeigt eine in die Maschine eingespannte Hydraulik während der Charakterisierung.



*Abbildung 25: Hydraulik während der Charakterisierung. Hydrauliksystem auf der Linearprüfmaschine, mit Sensor zur Temperaturüberwachung*

In Rahmen der Hydraulikcharakterisierung wurden drei verschiedene Prüfungen durchgeführt:

- Vorbringerkraft:

Es wird getestet, wie hoch die Vorbringerkraft, also die Ausstoßkraft des Kolbens ist. Mithilfe dieses Tests sind Rückschlüsse auf den Zustand der Membran im Ausgleichsbehälter möglich. Dafür wird die Hydraulik über einen Kolbenhub von 25 mm mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,5 mm/s belastet. Gemessen wird die Ausstoßkraft in Flexions- und Extensionsrichtung. Um die Rohdaten aus Flexion- und Extension miteinander zu verrechnen, wird

der Hub interpoliert. Dazu werden je 5 % des Hubs am Anfang und Ende der Messung nicht berücksichtigt, denn der Gesamthub der einzelnen Hydrauliken kann minimal variieren. Außerdem ist der Hub bei einer vollständigen Extension der Hydraulik aufgrund einer in der Kolbeneinheit verbauten Feder nicht immer exakt gleich. Diese Anpassung wird also vorgenommen, um die Vergleichbarkeit zwischen den Systemen zu verbessern. Bei einem Hub von 5 mm und 20 mm soll die gemessene Vorbringerkraft die in Tabelle 10 aufgelisteten Anforderungen erfüllen.

*Tabelle 10: Anforderungen an die Vorbringerkraft bei verschiedenen Kolbenhüben*

Hub [mm]	minimale Kraft [N]	maximale Kraft [N]
5	30	75
20	40	90

Die Ausstoßkraft wird zweimal während der Charakterisierung gemessen. Die erste Messung ist der Beginn der Hydraulikcharakterisierung, die zweite erfolgt im letzten Schritt. Die in Tabelle 10 definierten Anforderungen gelten nur für die vor dem Dauertest durchgeführte Prüfung. [24]

- Grundreibung:

Im Rahmen dieser Prüfung wird die Grundreibung im Hydrauliksystem gemessen. Dabei erfolgt die Belastung, ebenso wie bei der Testung der Vorbringerkraft, über einen Kolbenhub von 25 mm. Bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 1 mm/s wird die über den Messhub entstehende Reibungskraft in Flexions- und Extensionsrichtung aufgezeichnet. Analog zur Interpolation der Rohdaten bei der Testung der Vorbringerkraft, wird auch hier der Hub interpoliert und je 5 % der Messdaten zu Beginn und Ende werden vernachlässigt. Die Reibkraft soll dabei an keiner gemessenen Position > 60 N sein. [25]

- Dämpfungsverhalten bei Geschwindigkeiten:

Bei der Prüfung des Dämpfungsverhaltens werden Flexions- und Extensionsbewegungen bei verschiedenen Geschwindigkeiten durchgeführt. Dabei werden verschiedene Geschwindigkeiten über einen Messhub 25 mm getestet. Unterdessen ist das jeweils zugehörige Servoventil geöffnet und das

entgegengesetzte Ventil geschlossen. Die Messgeschwindigkeiten werden sinusförmig auf das Prüfobjekt aufgebracht und variieren daher innerhalb des Hubs. Es werden 26 verschiedene Durchschnittsgeschwindigkeiten angesteuert, welche in einem Rahmen von 5 mm/s bis 260 mm/s liegen. Mithilfe von Gleichung (3.4) [26] kann die jeweils zur Durchschnittsgeschwindigkeit gehörige Maximalgeschwindigkeit des Sinushubs ermittelt werden.

$$v_{max} = v_{\phi} * \frac{\pi}{2} \quad (3.4)$$

Für jede Geschwindigkeit werden fünf sinusförmige Hübe durchgeführt. Die Messung der dabei entstehenden Kräfte und die Betrachtung deren Maxima ermöglichen Rückschlüsse auf das Dämpfungsverhalten des hydraulischen Systems. Bei einer Maximalgeschwindigkeit von 300 mm/s sind dabei Kraftwerte  $\leq 550$  N zulässig. [27]

Nach dem Durchlaufen des Dauertests wurden die Hydrauliksysteme zusätzlich zur Charakterisierung auf ihre innere Dichtheit getestet und einem thermischen Test im Temperaturschrank unterzogen.

- Innere Dichtheit der Hydraulik:

Die Testung auf innere Dichtheit erfolgt in Zug und Druckrichtung. Zunächst wird getestet, wie viel das Hydraulikmodul bei einer Zugbelastung von 400 N +/- 20 N und geschlossenem Servoventil in Zugrichtung über eine Zeit von 90 s nachgibt. Dabei sind maximal 0,95 mm zulässig. Anschließend wird bei einer Druckbelastung von 400 N  $\pm$  20 N und geschlossenem Servoventil in Druckrichtung getestet. Zum Bestehen des Tests darf das Hydraulikmodul dabei maximal 0,8 mm nachgeben. [28]

- Temperaturschranktest:

Hydrauliksysteme von Prothesenkniegelenken sind hohen Kräften ausgesetzt, welche die Hydrauliktemperatur ansteigen lassen. Da erhöhte Temperaturen im System zur schnelleren Alterung führen können, wird die Hitzebeständigkeit der Prüflinge untersucht. Während der Montage der Hydrauliksysteme werden deren Ausgleichsbehälter mit einem Messdruck von 5,5 bis 6 bar befüllt. Um den Druckabfall im Ausgleichsbehälter nach der mechanischen und

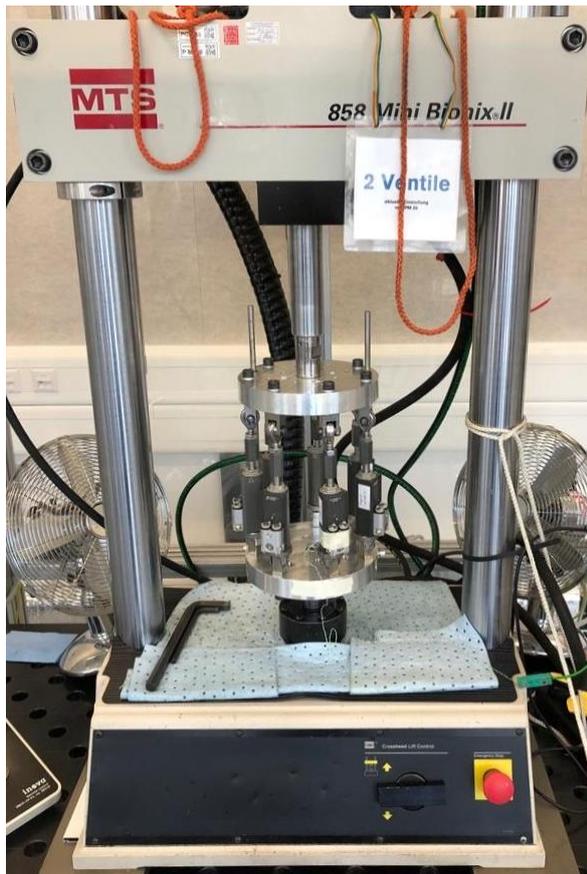
thermischen Beanspruchung zu ermitteln, werden die mechanisch vorbelasteten Prüflinge im Klimaschrank einer Temperatur von 80°C +/- 5°C ausgesetzt. Die Expositionsdauer beträgt 18 Tage. Anschließend an die thermische Belastung wird der Ausgleichsbehälter-Innendruck gemessen und der relative Druckabfall  $\Delta P$  wird mit Formel (3.5) [29] berechnet:

$$\Delta P = \left( 1 - \left( \frac{\text{finaler Ausgleichsbehälter-Innendruck}}{\text{initialer Ausgleichsbehälter-Innendruck}} \right) \right) * 100 \quad (3.5)$$

Als initialer Druck wird ein Fülldruck von 5,75 bar angenommen, der finale Druck ist der nach dem Test ermittelte Wert. Als Akzeptanzkriterium für diese Prüfung ist ein maximaler Druckabfall von 64 % definiert. [29]

### 3.5.2 Dauertest

Zur Imitation der zu erwartenden mechanischen Beanspruchung über einen Zeitraum von zwei Jahren, was dem Serviceintervall des Prothesenkniegelenks entspricht, wird ein Langzeittest durchgeführt. Dafür wird pro Jahr von einer Anzahl von 1,4 Millionen Schrittzyklen ausgegangen. Mithilfe einer hydraulischen Axialprüfmaschine des Typ MTS 858 Mini Bionix II, wird die entsprechende mechanische Beanspruchung simuliert. Währenddessen werden die Prüflinge mit Ventilatoren gekühlt, welche beidseitig am hinteren Ende der Prüfmaschine angeordnet sind. Abbildung 26 zeigt die Prüflinge während des Dauertests. Dank einer Testvorrichtung mit sieben Aufnahmen, können alle Hydrauliksysteme gleichzeitig eingespannt und belastet werden. Aufgrund dessen werden sie über den gesamten Test hinweg mit denselben Frequenzen beaufschlagt. Im rechten Bild ist das Kabel und die Befestigung eines Temperaturmesssensor zu erkennen, welcher auf dem vorne im Bild zu sehenden Prüfling angebracht ist. Da dieser Prüfling sich am weitesten von den beiden Ventilatoren entfernt befindet, wird hier die höchste Temperatur vermutet.



*Abbildung 26: Aufspannung der sieben Hydraulikprüflinge auf die Prüfmaschine während des Dauertests. Links: Ventilatoren zur Kühlung*

Die Kolbenhübe werden mit einer Frequenz von 2,2 - 4 Hz über einen Verfahrweg von mindestens 26 mm ausgeführt. Die dabei maximal zulässige Hydrauliktemperatur beträgt 55°C. Während des Dauertests werden keine Messdaten aufgenommen, es wird lediglich die Frequenz und die Hydrauliktemperatur überwacht. [29] Abbildung 27 zeigt die aufgezeichneten Daten der am schlechtesten für die Ventilatoren zugänglichen Hydraulik. Im unteren der beiden Diagramme ist zu erkennen, dass die maximale Temperatur während des Dauertests etwa 53°C beträgt und somit im zulässigen Bereich liegt. Die aufgebrachte Frequenz der mechanischen Belastung ist aufgrund des Prüfsetups für alle Hydrauliksysteme gleich. Über die ersten 1000 Zyklen variiert die Belastungsfrequenz zwischen 3 und 4 Hz, anschließend werden die Prüflinge mit einer konstanten Frequenz von 2,2 Hz beaufschlagt. Da Prothesenträger sich in der Realität ebenfalls mit variablen Ganggeschwindigkeiten fortbewegen, wurden zur Darstellung eines realen Settings unterschiedliche Belastungsfrequenzen gewählt. Zusätzlich können dadurch aufgrund der Abhängigkeit der Hydrauliktemperatur von der Belastungsfrequenz verschiedene Temperaturniveaus simuliert werden.

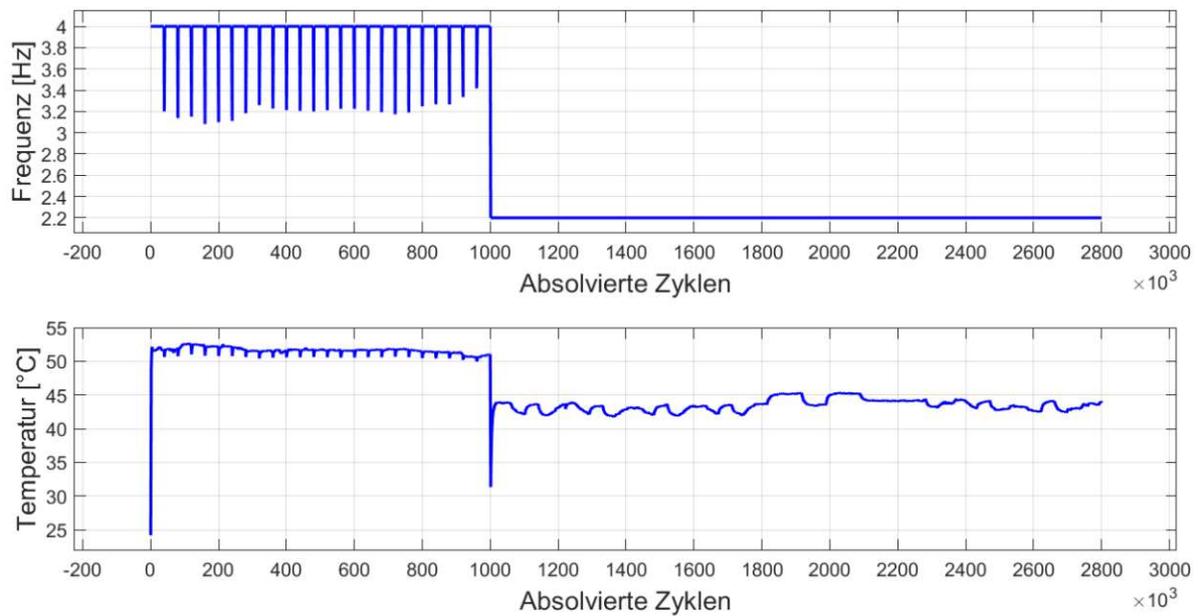


Abbildung 27: Frequenzaufzeichnung der Lastaufbringung und Temperaturüberwachung des am wenigsten gekühlten Hydraulikprüflings

### 3.5.3 Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt sind die Ergebnisse der Charakterisierungsprüfungen, des Tests auf innere Dichtheit und des thermischen Tests aufgelistet und erklärt.

#### 3.5.3.1 Vorbringerkraft

Abbildung 28 zeigt die bei der Messung der Ausstoßkraft vor dem Dauertest erhaltenen Rohdaten. Dabei sind die blauen Grafen der Messung zu Beginn zuzuordnen. Der jeweils oben liegende Graph einer Farbe stellt dabei entsprechend die Flexion dar: Der Kolben wird in den Hydraulikzylinder gedrückt und die Kraft steigt an. Die bei der Extension gemessenen Werte entsprechen dem jeweils unteren Graphen. Die Vorbringerkraft kann durch Interpolation zwischen den Rohdaten der Flexions- und Extensionskurve ermittelt werden und liegt demzufolge genau zwischen diesen beiden Graphen. Dies ist in Abbildung 28 anhand der Messdaten von Prüfling Nummer 1 der sauberen Testgruppe exemplarisch dargestellt.

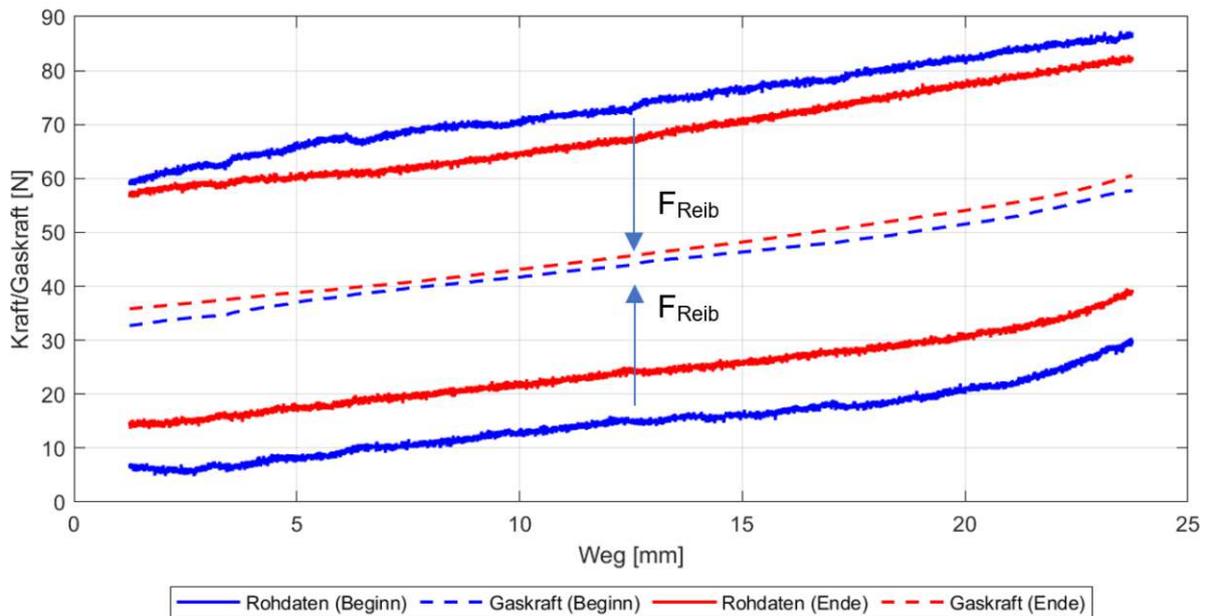


Abbildung 28: Kraft-Weg-Plot. Zu Beginn und Ende der Charakterisierung gemessene Rohdaten und daraus ermittelte Vorbringerkraft. Messdaten von Prüfling 1 der Gruppe „sauber“ bei null Zyklen mechanischer Belastung

Zum besseren Verständnis der auf die Hydraulik wirkenden Kräfte sind in Abbildung 29 die Richtungen der während Flexion und Extension wirkenden Kräfte aufgetragen. Die gemessene Kraft ( $F_{\text{Gesamt}}$ ) setzt sich aus Vorbringerkraft und Reibkraft zusammen. Während der Flexion besitzen die Ausstoßkraft der Hydraulik und die Reibkraft dasselbe Vorzeichen und Addieren sich somit zur Gesamtkraft auf. Bei der Extension ist die gemessene Gesamtkraft deutlich kleiner, da die Reibkraft nun der Kraft der Hydraulik entgegenwirkt.

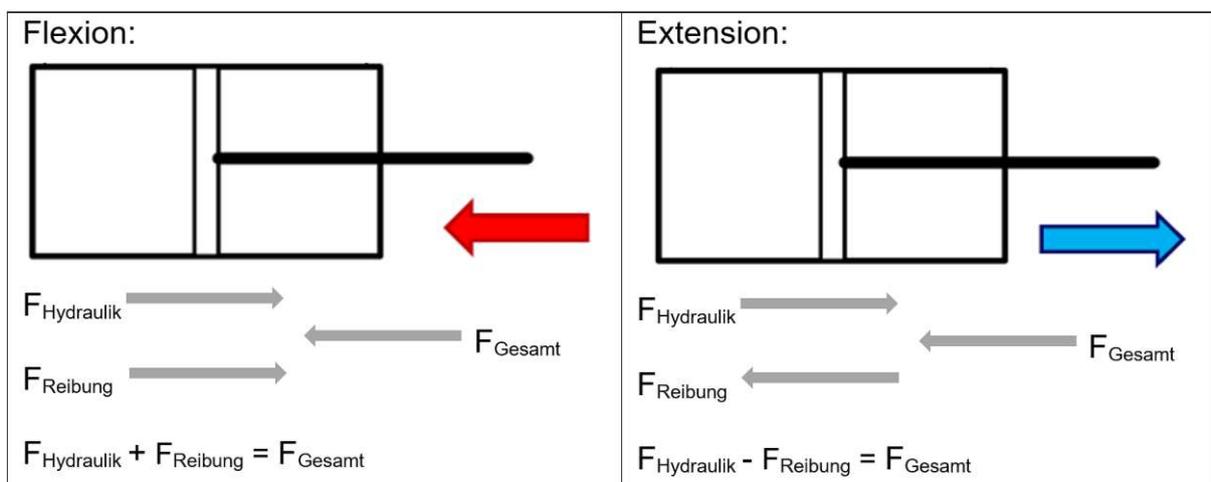


Abbildung 29: Wirkende Kraftvektoren während Flexion (roter Pfeil) und Extension (blauer Pfeil)

Die ermittelte Vorbringerkraft bei null Zyklen und einem Kolbenhub von 5 mm und 20 mm ist in Tabelle 11 dargestellt. Diese Messung erfolgt jeweils am Anfang und am Ende einer Hydraulikcharakterisierung. Es ist zu erkennen, dass die am Ende der Charakterisierung aufgezeichneten Messwerte größer sind. Dies ist damit zu erklären, dass durch die Kolbenbewegung während der durchgeführten Tests die Temperatur in der Hydraulik angestiegen ist und es durch Wärmeausdehnung zur Zunahme des Ölvolumens kommt. Daraus resultiert ein Druckanstieg im System, die Membran wird weiter in den Ausgleichsbehälter gedrückt und die Vorbringerkraft nimmt zu.

*Tabelle 11: Vorbringerkraft der Prüflinge bei null Zyklen mechanischer Belastung. Gemessen zu Beginn und Ende der Charakterisierung bei 5 mm und 20 mm Kolbenhub*

Vorbringerkraft [N] – 0 Zyklen					
		Beginn		Ende	
Testgruppe	Nummer	5 mm	20 mm	5 mm	20 mm
1 - sauber	1	36	48	38	51
	2	37	52	39	54
2 - unterhalb CCC	1	37	51	39	53
	2	36	50	41	57
3 - auf CCC	1	36	51	38	53
4 - oberhalb CCC	1	37	52	39	54
	2	39	54	41	56

Die in Abschnitt 3.5.1 gegebenen Werte, gelten als Anforderungen an die Vorbringerkraft der Hydraulik. Tabelle 11 ist zu entnehmen, dass diese Vorgaben bei der Vorab-Charakterisierung von allen Prüflingen erfüllt werden. Die gemessenen Kräfte bei einem Hub von 5 mm reichen von 36 N bis 41 N und liegen somit im zulässigen Bereich von 30 N bis 75 N. Betrachtet man die Vorbringerkraft bei einem Hub von 20 mm, so reichen die ermittelten Werte von 48 N bis hin zu einer Maximalkraft von 57 N. Diese Kräfte liegen ebenfalls im erlaubten Wertebereich.

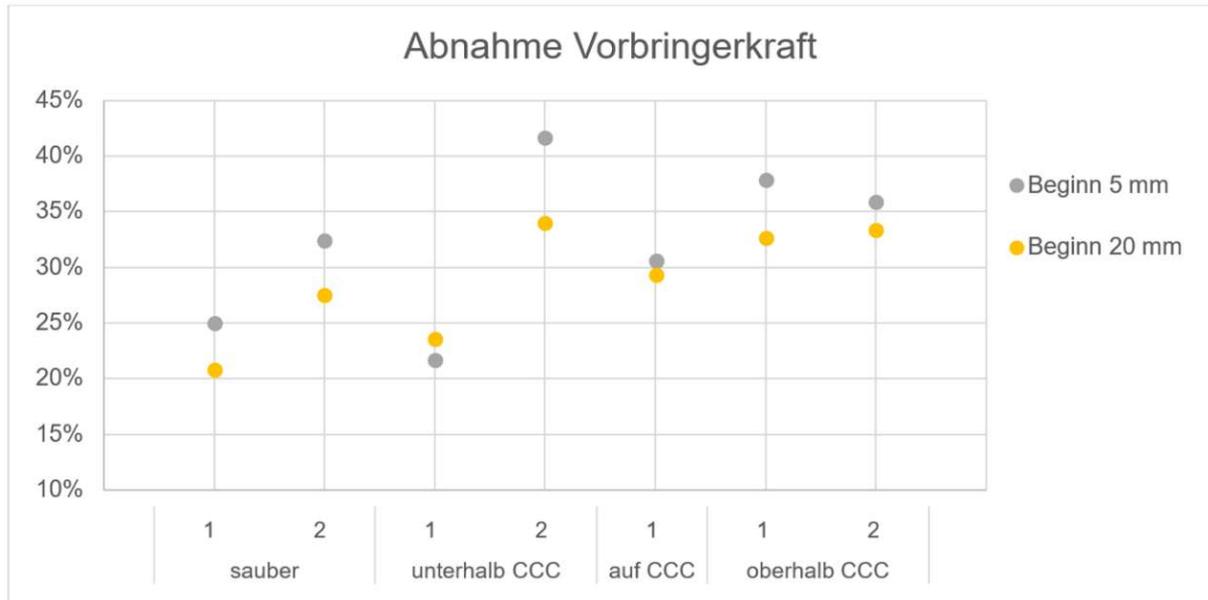
Die nach dem Dauertest mit 2800000 Zyklen ermittelten Werte für die Vorbringerkraft sind in Tabelle 12 aufgeführt. Im Vergleich zur Charakterisierung bei null Zyklen ist die Kraft deutlich gesunken. Die auf den Kolben wirkende Kraft ist abhängig vom Systemdruck. Der Druck wiederum sinkt zu einem großen Teil durch eine Abnahme

des Drucks im Ausgleichsbehälter. Eine weitere Ursache für die Abnahme der Vorbringerkraft ist eine Verringerung der Ölmenge, welche zu einem kleinen Teil durch Öl-Verdunstung an der Kolbenstange und größtenteils durch Leckagen entsteht. Die Auftretswahrscheinlichkeit dieser beiden Effekte ist bei einer Langzeitbelastung hoch und erklärt die Abnahme der Vorbringerkraft. Die gemessenen Werte liegen im Normbereich.

*Tabelle 12: Vorbringerkraft der Prüflinge nach 2800000 Zyklen mechanischer Belastung. Gemessen zu Beginn und Ende der Charakterisierung bei 5 mm und 20 mm Kolbenhub*

Vorbringerkraft [N] – 2800000 Zyklen					
		Beginn		Ende	
Testgruppe	Nummer	5 mm	20 mm	5 mm	20 mm
<b>1 - sauber</b>	1	27	38	29	41
	2	25	37	26	39
<b>2 - unterhalb CCC</b>	1	29	39	31	42
	2	21	33	22	34
<b>3 - auf CCC</b>	1	25	36	27	38
<b>4 - oberhalb CCC</b>	1	23	35	26	38
	2	25	37	27	38

Die prozentuelle Abnahme der Vorbringerkraft ist in Abbildung 30 veranschaulicht. Die Ergebnisse unterliegen geringen Schwankungen, dennoch ist ein Trend zu sehen: Mit zunehmender Kontamination ist eine steigende Abnahme der Vorbringerkraft zu erkennen.



*Abbildung 30: Vergleich der Abnahme der Vorbringerkraft der Prüflinge nach 2800000 Zyklen mechanischer Belastung. Messungen zu Beginn der Charakterisierung, Kolbenhub 5 mm (grau) und 20 mm (gelb)*

Am stärksten hat die Vorbringerkraft bei Prüfling 2 der Testgruppe „unterhalb CCC“, gefolgt von den Hydrauliksystemen der am stärksten verschmutzten Gruppe „oberhalb CCC“ abgenommen.

Die ermittelten Kraftkurven von Prüfling 1 der Gruppe „oberhalb CCC“ vor und nach der Langzeitbelastung sind exemplarisch in Abbildung 31 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Vorbringerkraft durch die mechanische Belastung deutlich abgenommen hat.

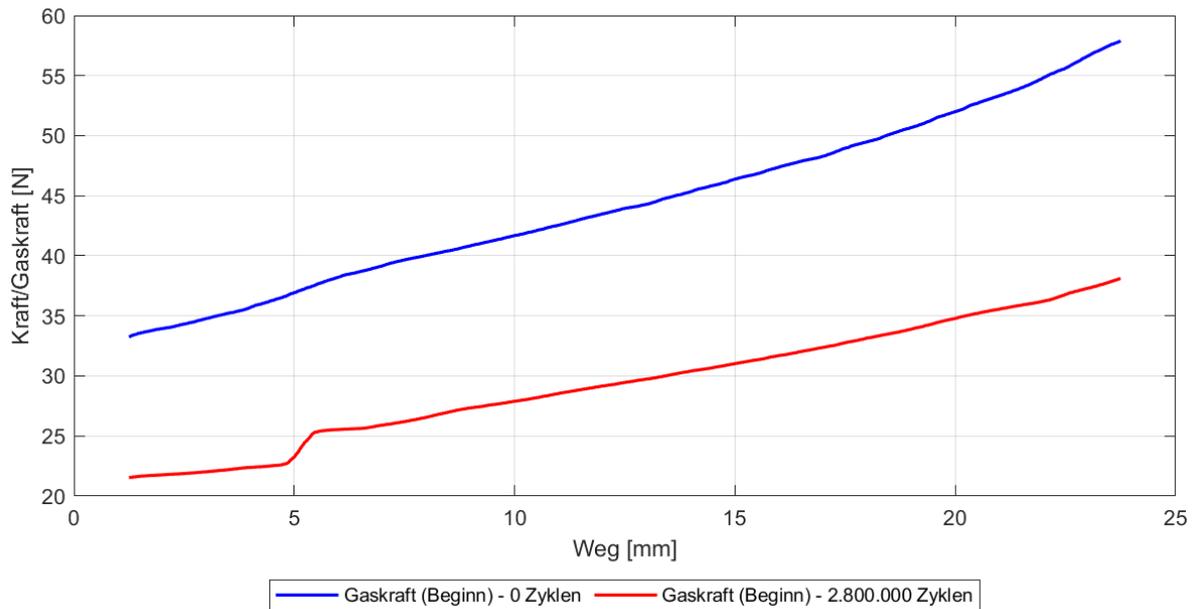


Abbildung 31: Gemessene Vorbringerkraft von Prüfling 1 der Testgruppe „oberhalb CCC“ bei null und 2800000 Zyklen mechanischer Belastung

Die Rückstellwirkung in der Mitte des Kolbenhubs entspricht der Ausstoßkraft eines Hydrauliksystems. Diese kann aus dem jeweiligen Gaskraft-Plot (siehe Abbildung 31) abgelesen werden. In Tabelle 13 sind die Ausstoßkräfte der Prüflinge vor dem Durchlaufen des Dauertests aufgelistet.

Tabelle 13: Ausstoßkraft der Prüflinge bei null Zyklen mechanischer Belastung

Ausstoßkraft [N] – 0 Zyklen		
Testgruppe	Nummer Prüfling	Kraft [N]
<b>1 - sauber</b>	1	41,7
	2	44,1
<b>2 - unterhalb CCC</b>	1	44,2
	2	42,3
<b>3 - auf CCC</b>	1	43,6
<b>4 - oberhalb CCC</b>	1	43,9
	2	45,8

Bei der zweiten Hydraulikcharakterisierung nach dem Langzeittest wurden folgende Messwerte für die Ausstoßkraft ermittelt (siehe Tabelle 14).

Tabelle 14: Ausstoßkraft der Prüflinge nach 2.800 000 Zyklen mechanischer Belastung

Ausstoßkraft [N] - 2.800 000 Zyklen		
Testgruppe	Nummer Prüfling	Kraft [N]
<b>1 - sauber</b>	1	32,2
	2	31,4
<b>2 - unterhalb CCC</b>	1	34
	2	27,2
<b>3 - auf CCC</b>	1	30,7
<b>4 - oberhalb CCC</b>	1	29,5
	2	31,2

Die nach dem Langzeittest an der Mitte des Hubs gemessene Rückstellwirkung ist deutlich vermindert. Die prozentuale Abnahme, der Ausstoßkraft wurde berechnet. Die ermittelten Werte zeigen zwar gewisse Schwankungen, jedoch ist ein Trend erkennbar: Für stärker verschmutzte Systeme ist ein größerer Leistungsabfall zu verzeichnen. Bildet man die Durchschnittswerte über die Testgruppen, so steigt der Leistungsabfall kontinuierlich an (s. Abbildung 32). Bei der sauberen Testgruppe tritt eine Abnahme von 26 % auf. Die unterhalb des CCC-Werts kontaminierte Gruppe 2 weist einen Abfall von 29 % auf, Testgruppe 3 eine Verminderung um 30 %. Für die am stärksten verschmutzten Prüflinge ist die größte Leistungsabnahme zu verzeichnen: Im Durchschnitt nimmt die Ausstoßkraft über den Dauertest hinweg um 32 % ab.

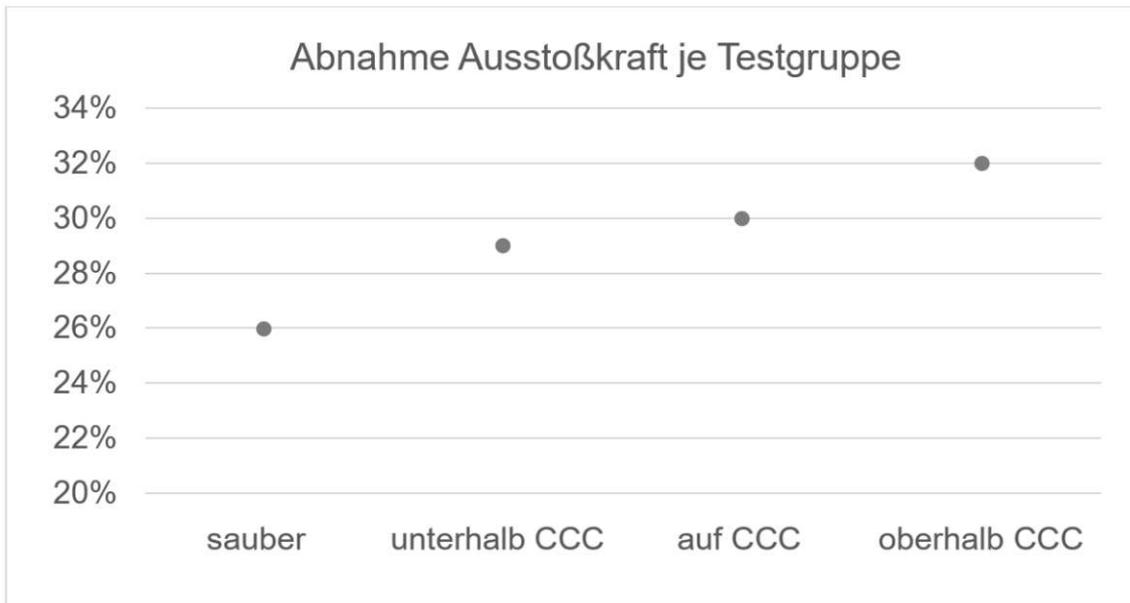


Abbildung 32: Durchschnittliche Abnahme der Ausstoßkraft je Testgruppe nach 2800000 Zyklen mechanischer Belastung

### 3.5.3.2 Grundreibung

Die Grundreibung wird analog zur Vorbringerkraft über Interpolation der Rohdaten für Flexion und Extension ermittelt. Die maximal erreichten Reibkräfte über einen Kolbenhub von 25 mm sind in Tabelle 15 aufgeführt.

Tabelle 15: Maximal gemessene Reibkraft bei null Zyklen mechanischer Belastung

Reibkraft [N] – 0 Zyklen		
Testgruppe	Nummer Prüfling	max. Kraft [N]
<b>1 - sauber</b>	1	30
	2	31
<b>2 - unterhalb CCC</b>	1	25
	2	38
<b>3 - auf CCC</b>	1	29
<b>4 - oberhalb CCC</b>	1	28
	2	28

Vor dem Dauertest wird von keinem der Prüflinge die maximal zulässige Reibkraft von 60 N überschritten. Der höchste Reibwert wird mit 38 N bei einem der Prüflinge aus Gruppe 2, „unterhalb CCC“ gemessen. Für die beiden Prüflinge der am stärksten verschmutzten Testgruppe 4 wurden mit je 28 N geringere Reibwerte ermittelt als für

die Prüflinge der sauberen Kontrollgruppe (30 N, 31 N). Das erscheint zunächst kontrovers. Gewisse Streuungen in den Messergebnissen von Prüfverfahren können jedoch trotz identischen Prüflingen und Setup auftreten. Die hier gemessenen Werte und deren Streuungen liegen im Normbereich. In der Vorab-Charakterisierung ist kein signifikanter Unterschied zwischen den verschiedenen Testgruppen erkennbar.

Nach der Belastung mit 2800000 Zyklen wurden die in Tabelle 16 aufgelisteten Werte gemessen. Die Reibwerte aller Hydrauliksysteme nahmen, unabhängig von ihrem Kontaminationszustand, ab. Die höchste vorkommende Kraft von 20 N wird erneut bei Prüfling 2 der Testgruppe „unterhalb CCC“ gemessen.

*Tabelle 16: Maximal gemessene Reibkraft nach 2800000 Zyklen mechanischer Belastung*

Reibkraft [N] - 2.800 000 Zyklen		
Testgruppe	Nummer Prüfling	max. Kraft [N]
<b>1 - sauber</b>	1	17
	2	19
<b>2 - unterhalb CCC</b>	1	16
	2	20
<b>3 - auf CCC</b>	1	18
<b>4 - oberhalb CCC</b>	1	18
	2	16

In Abbildung 33 ist die prozentuelle Abnahme der Reibkraft dargestellt. Die Kraftminderungen der Prüflinge unterliegen einer geringen Schwankung und befinden sich in einem Rahmen von 36 % bis 47 %.

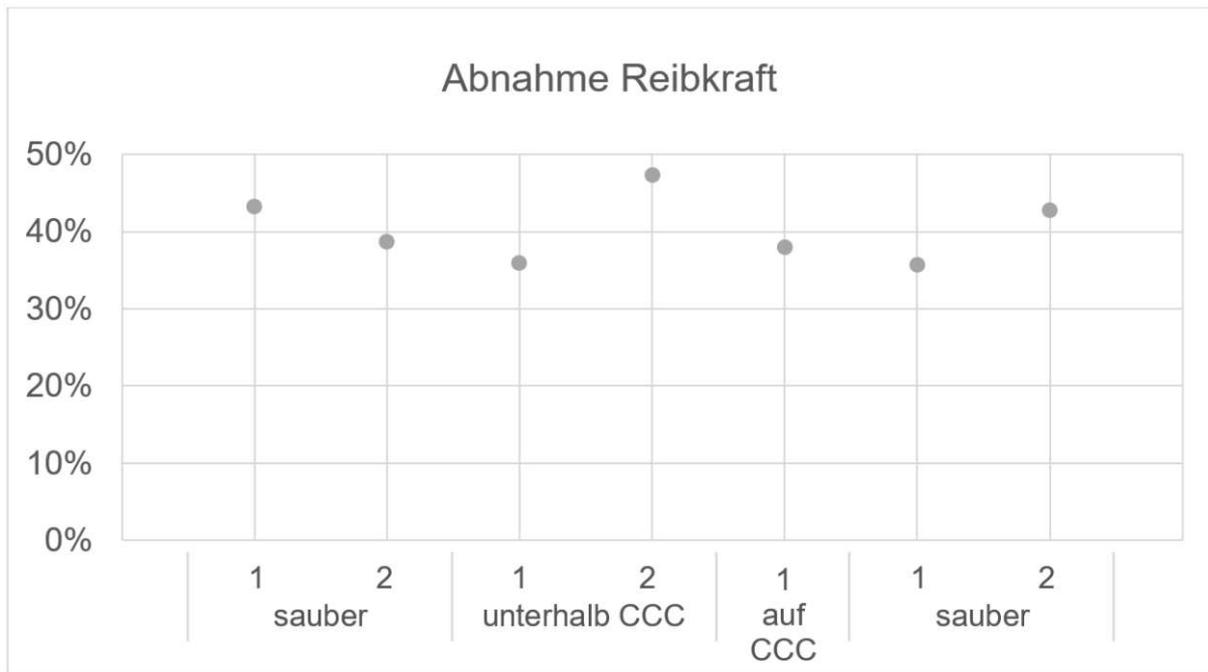


Abbildung 33: Vergleich der Abnahme der Reibkraft aller Prüflinge, nach 2800000 Zyklen mechanischer Belastung

Zum genauen Verständnis der verminderten Reibwerte muss zunächst betrachtet werden, wodurch Reibkräfte in einem Hydraulikzylinder entstehen. Reibung entsteht durch die Relativbewegung von Reibungspartnern zueinander. In diesem Fall an den Bindungsdichtstellen, am Kolben und an der Kolbenstange. Die vorherrschende Reibung ist von mehreren Faktoren abhängig. Da bei den beiden vorliegenden Charakterisierungen das Versuchsssetup identisch ist, können allerdings einige Einflüsse, wie beispielsweise die Geschwindigkeit, vernachlässigt werden. Die partikulären Verschmutzungen sind ebenfalls vor und nach dem Dauertest gleich, scheinen jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Reibkräfte zu haben. Die Alterung der Werkstoffe der Reibungspartner hat ebenfalls einen Einfluss auf die Reibung. Abnutzung der Führungsbänder, Dichtungen und O-Ringe kann eine Erklärung für die abnehmenden Reibkräfte sein. Wird die Hydraulik mechanisch beansprucht, so steigt die Temperatur. Durch die Erwärmung der Hydraulikflüssigkeit dehnt sich diese aus, die Dichte des Fluids sinkt und der Druck steigt. Zusätzlich nimmt durch die Erwärmung die Viskosität ab, was wiederum in geringeren Reibwerten resultiert.

Weiterhin ist die Art der Reibung bedeutend. Wird der Kolben anfänglich in Bewegung versetzt, kommt es zu Trockenreibung, welche mit großen Reibkräften verbunden ist. Durch die Bewegung des Kolbens baut sich sukzessive ein hydrodynamischer

Schmierfilm auf. Es herrscht Mischreibung: Einige der Dichtungszonen schwimmen bereits auf diesem Film auf, während andere noch im unmittelbaren Kontakt mit der Gegenfläche stehen. Ist der Schmierfilm mit zunehmender Bewegung schließlich komplett ausgebildet, so herrscht Flüssigkeitsreibung. Die Dichtungen stehen nurmehr mit dem Schmierfilm in Berührung und es werden geringe Reibkräften gemessen. [8] Bei der Vorab-Charakterisierung ist zunächst mit einer nicht-benetzen Kolbenstange zu rechnen. In der abschließenden Charakterisierung ist anzunehmen, dass ausschließlich Flüssigkeitsreibung auftritt. Dies trägt auch zur Abnahme der Reibung nach dem Langzeittest bei.

Der wichtigste Parameter für die Veränderung der Reibkraft ist allerdings Systemdruck. Betrachtet man die Ergebnisse der Messungen für die Vorbringerkraft (siehe 3.5.3.1) so ist bei allen Prüflingen ein Druckabfall im System zu erkennen. Da Dichtungsreibung druckabhängig ist, führen geringere Drücke im System zu einer Abnahme der Reibkräfte.

### 3.5.3.3 Dämpfungsverhalten bei Geschwindigkeiten

Für jeden Prüfling werden die 26 getesteten Geschwindigkeiten in einem Kraft-Hub-Plot aufgetragen. Abbildung 34 zeigt exemplarisch das Diagramm von Prüfling Nummer 2 der sauberen Testgruppe. Die verschiedenen Geschwindigkeiten sind farblich abgestuft, wobei hellere Farben für zunehmende Geschwindigkeiten verwendet wurden. Dabei wurden nicht alle Testgeschwindigkeiten, sondern nur eine repräsentative Auswahl dargestellt. Der weiße Balken in der Mitte des Diagramms bildet die Ausstoßkraft an der jeweiligen Position des Hubs ab. Die Legende gibt jeweils die Maxima der Ist-Geschwindigkeiten, also der tatsächlich ermittelten Geschwindigkeiten, an. Dabei werden während der Flexion positive Kräfte gemessen. Bei einem Hub von etwa 25 mm ist die vollständige Flexion erreicht und es kommt zur Bewegungsumkehr, die Extensionskräfte besitzen ein negatives Vorzeichen. Betrachtet man die Beträge der Kräfte, so ist auch in diesem Diagramm zu erkennen, dass während der Flexion höhere Kräfte aufgebracht werden müssen als bei der Extension.

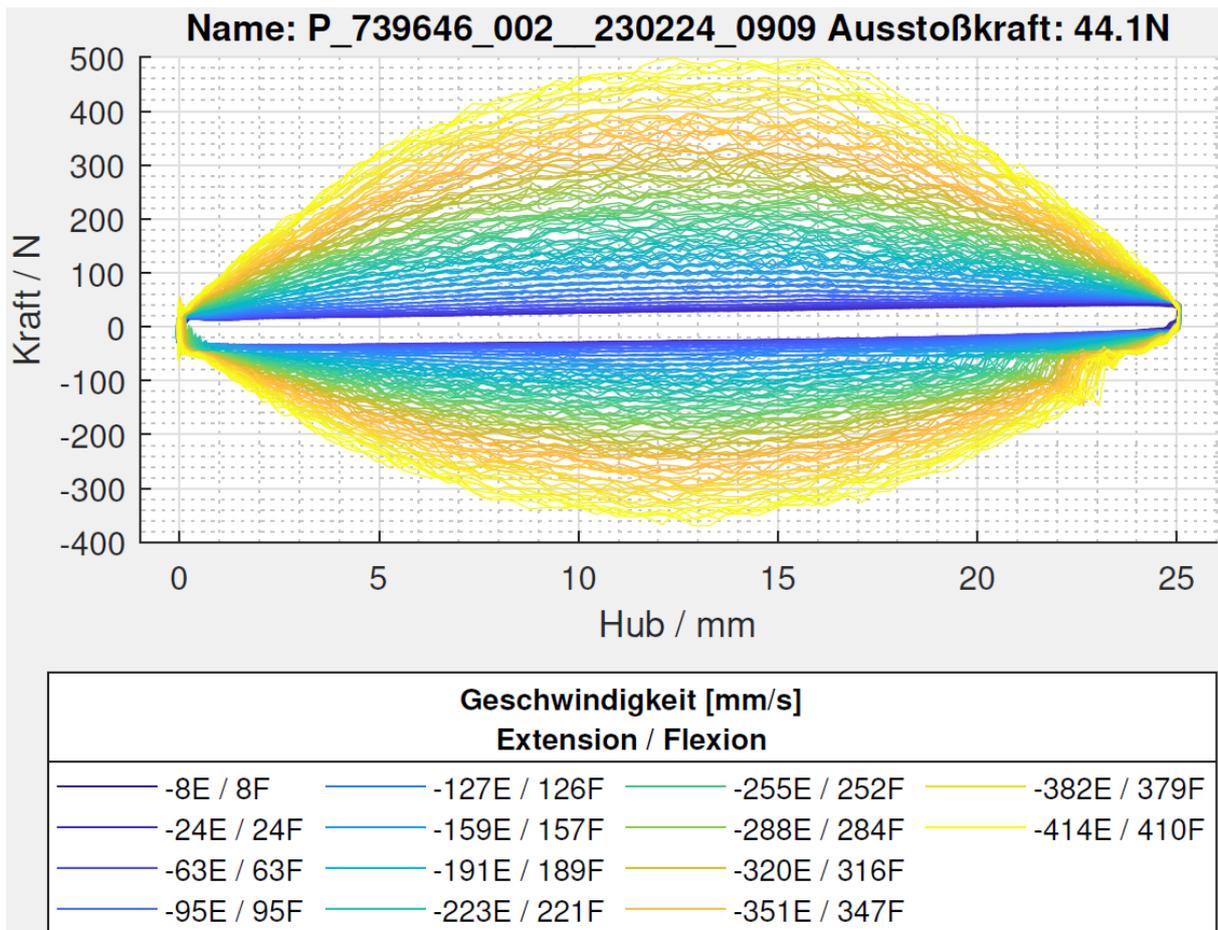
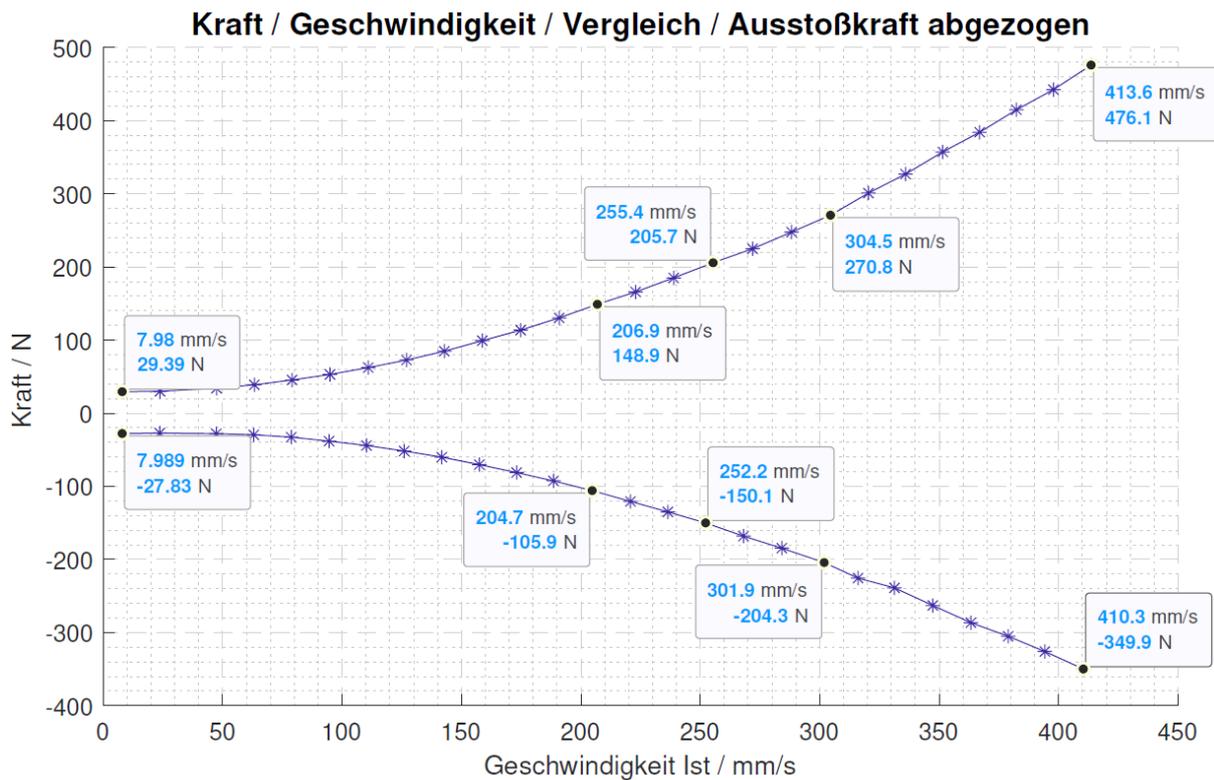


Abbildung 34: Kraft-Hub-Diagramm bei 0 Zyklen mechanischer Belastung. Belastung mit verschiedenen farbkodierten Geschwindigkeiten. Angabe der Maximalgeschwindigkeiten in Extension (E) und Flexion (F). Messdaten von Prüfling Nr. 2 der Gruppe „sauber“

Die in Abbildung 34 aufgetragenen Daten sind in Abbildung 35 noch einmal als Kraft-Geschwindigkeits-Diagramm dargestellt. Hierbei handelt es sich wieder um die Messdaten der Hydraulik Nummer 1 aus der sauberen Testgruppe. Die positiven Kräfte stellen die Flexion dar, die negativen Kräfte die Extension. Betrachtet man beispielsweise die Kraftbeträge, welche bei einer Geschwindigkeit von etwa 300 mm/s entstehen, so ist zu erkennen, dass die Flexionskraft mit ca. 262 N deutlich größer ist als der Betrag der Extensionskraft (ca. 200 N). Mit zunehmender Geschwindigkeit steigen die Kraftunterschiede noch weiter an. Die gemessenen Kraftwerte bei 300 mm/s sind bei allen Prüflingen  $\leq 550$  N und liegen damit sowohl in Flexions- als auch in Extensionsrichtung im zulässigen Bereich.



*Abbildung 35: Kraft-Geschwindigkeit Diagramm bei null Zyklen mechanischer Belastung. Vergleich Flexion und Extension, Messdaten von Prüfling Nr. 2 der Gruppe „sauber“*

Vergleicht man die vor und nach dem Langzeittest aufgenommenen Daten, so ist festzustellen, dass der Unterschied zwischen den beiden Messungen sehr gering ist. Die bei einer Geschwindigkeit von  $v_{\max} = 300$  mm/s gemessenen Kräfte sind nach dem Dauertest nur minimal gesunken.

Die gemessenen Geschwindigkeiten bei Krafteinwirkung sind bei allen Prüflingen nach dem Dauertest nur geringfügig kleiner als zuvor. Dies ist in Abbildung 36 zu erkennen: Die gestrichelten Linien veranschaulichen die vor und die durchgezogenen Linien die nach dem Dauertest gemessenen Geschwindigkeiten. Bei der Flexion ist die Geschwindigkeitsabnahme etwas ausgeprägter zu erkennen als bei der Extension. Über die verschiedenen Kontaminationsgruppen sind dabei keine signifikanten Unterschiede feststellbar.

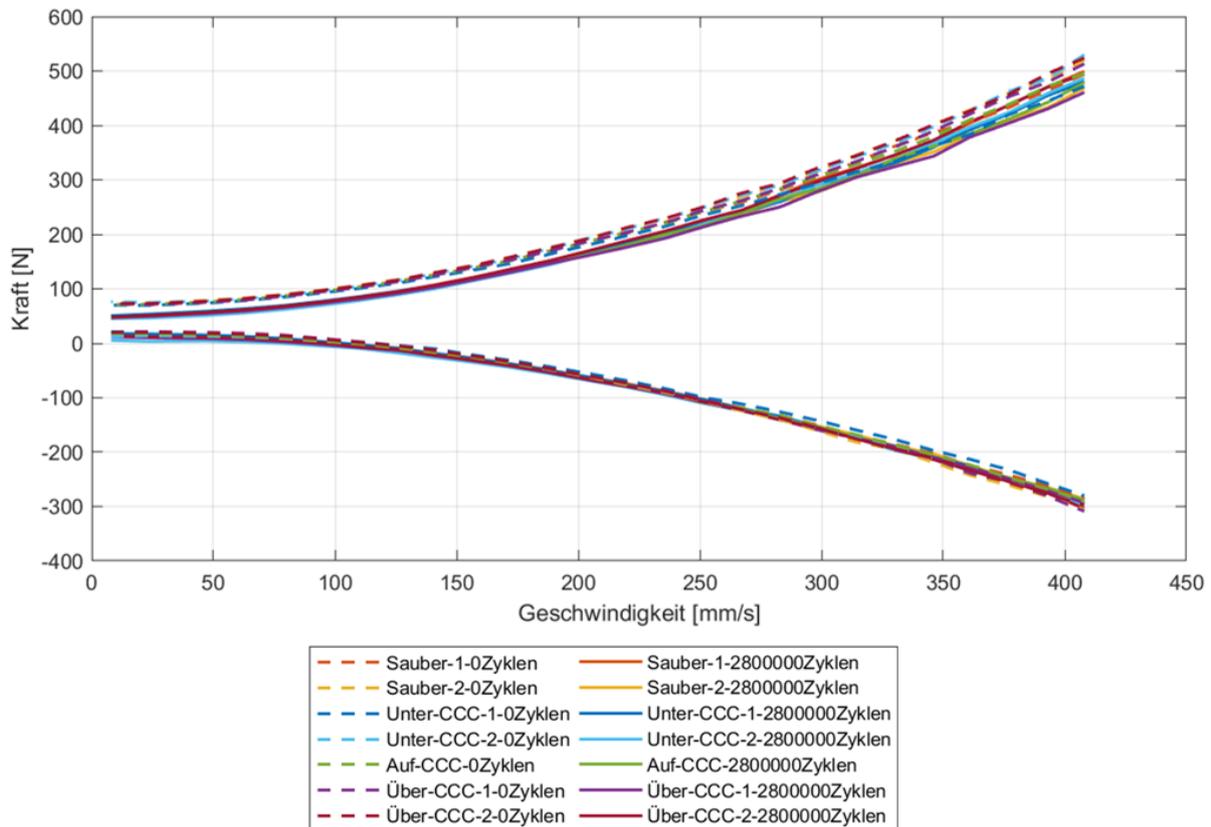


Abbildung 36: Vergleich der ermittelten Kraft-Geschwindigkeit-Kurven aller Prüflinge bei null und 2800000 Zyklen mechanischer Belastung

### 3.5.3.4 Test auf innere Dichtheit

Zusätzlich zur Charakterisierung wurden die Hydrauliksysteme im Anschluss an den Dauertest auf innere Dichtheit geprüft. In Abbildung 37 ist die aufgebrachte Kraft über die Zeit dargestellt. Da es einige Sekunden beansprucht bis sich die Kraft bei Werten von  $\pm 400 \text{ N} \pm 20 \text{ N}$  eingependelt hat, wurden die Prüflinge teilweise über einen Zeitraum von 100 s geprüft.

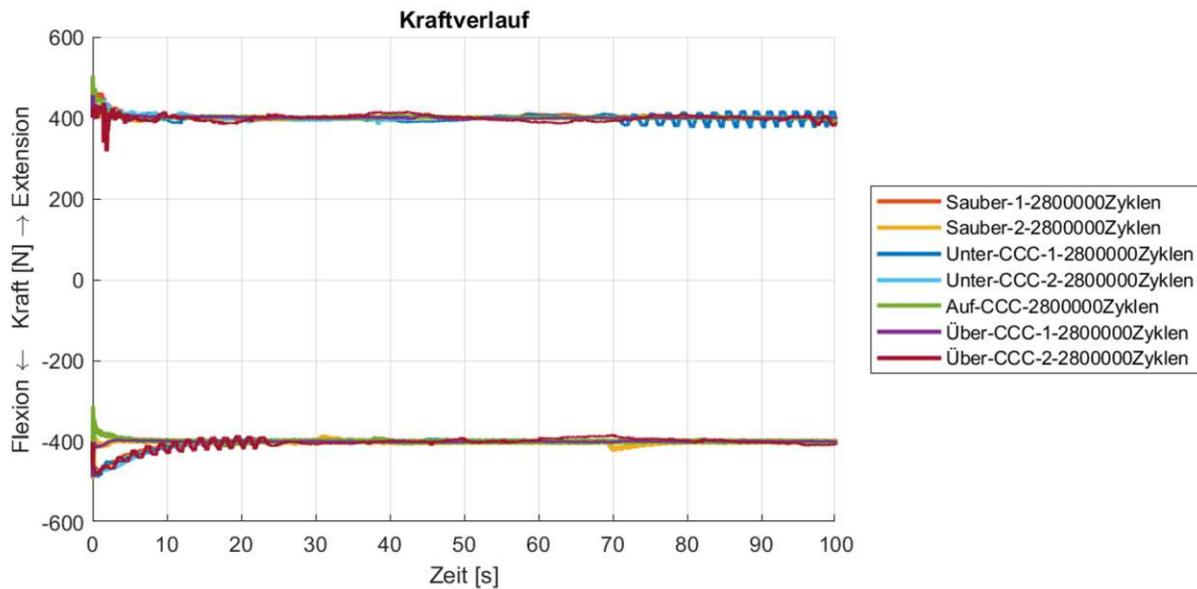


Abbildung 37: Kraft-Zeit-Diagramme der Hydraulikprüflinge, aufgenommen während des Tests auf innere Dichtheit nach 2800000 Zyklen mechanischer Belastung

Der Totgang der Prüflinge ist in Abbildung 38 veranschaulicht. Dazu wird aufgeigt, wie stark die Hydraulik bei der vorgegebenen Belastung in Zug- und Druckrichtung über einen Belastungszeitraum von 90 s nachgibt. Zur Veranschaulichung werden die in Abschnitt 3.5.1 aufgelisteten Grenzwerte mit den roten horizontalen Linien dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die meisten Prüflinge innerhalb des definierten Bereichs liegen und somit den Test bestanden haben. Die beiden Prüflinge der am stärksten kontaminierten Gruppe überschreiten die Grenzwerte deutlich. Prüfling 1 dieser Gruppe (hier lila dargestellt) gibt in Extensionsrichtung um 1,9 mm nach, in Druckrichtung liegt der Messwerte innerhalb der Vorgaben. Der Totgang in Flexionsrichtung des zweiten Prüflings, der am stärksten verschmutzten Testgruppe, kann am dunkelroten Graphen abgelesen werden. Mit einem Betrag von 2,4 mm übersteigt dieser den zulässigen Wert somit um ein Vielfaches. Außerdem ist zu erkennen, dass ein Hydrauliksystem der sauberen Testgruppe die Akzeptanzkriterien in Zugrichtung leicht überschreitet: Mit 1,1 mm übersteigt der gemessene Wert den zulässigen Totgang von 0,95 mm. Alle anderen getesteten Hydrauliksysteme liegen im zulässigen Wertebereich und haben den Test auf innere Dichtheit somit bestanden.

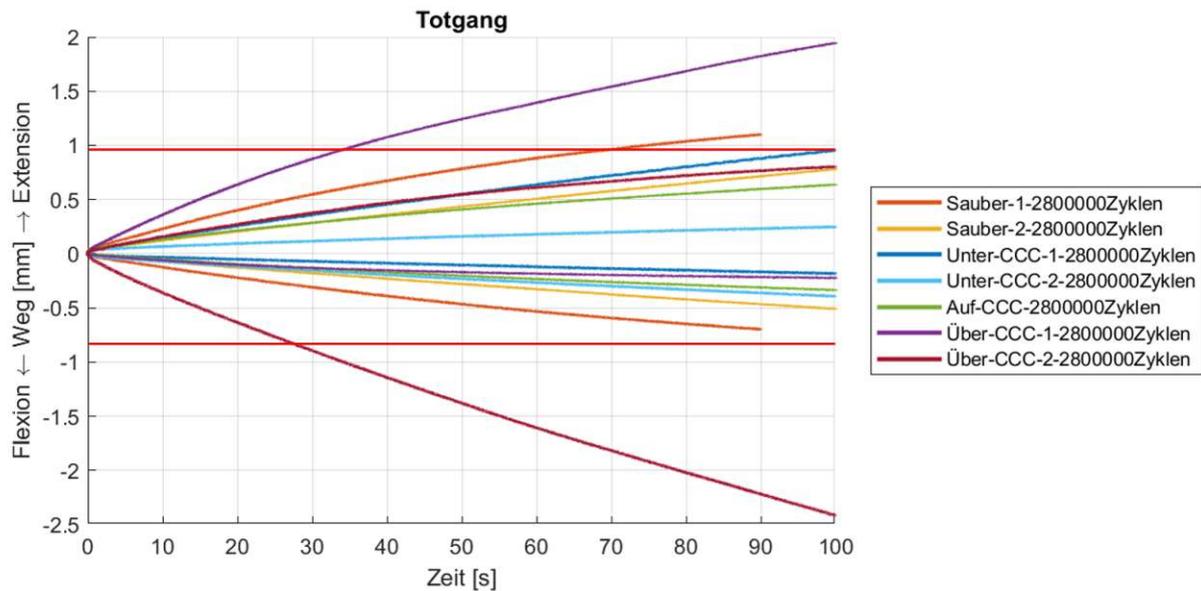


Abbildung 38: Weg-Zeit-Plot der Messdaten des Totgang der Prüflinge in Flexions- und Extensionsrichtung nach 2800000 Zyklen mechanischer Belastung. Kennzeichnung der Toleranzgrenzen (rote Linien)

### 3.5.3.5 Temperaturschranktest

Im Anschluss an die zweite Charakterisierung und den Test auf innere Dichtigkeit wurden die Prüflinge einer Temperatur von 80°C ausgesetzt. Abbildung 39 zeigt die Hydrauliksysteme im Klimaschrank während der thermischen Belastung.



Abbildung 39: Prüflinge während der thermischen Belastung im Klimaschrank

Die Prüflinge waren über 20 Tage hinweg erhöhten Temperaturen im Wärmeschrank ausgesetzt. Dabei wurden die vorgesehenen 18 Tage aufgrund von Feiertagen zwar überschritten, die längere Exposition hat allerdings keinen Einfluss auf das

Testergebnis. Nach der thermischen Belastung wurden die Prüflinge aus dem Wärmeschrank entnommen und der verbleibende Druck im Ausgleichsbehälter gemessen. Die dabei ermittelten Werte sind in Tabelle 17 aufgelistet. Zur Überprüfung des Akzeptanzkriteriums wird mithilfe von Formel 3.2 der Druckabfall berechnet, welcher ebenfalls in Tabelle 17 aufgeführt ist.

*Tabelle 17: Ausgleichsbehälter-Innendruck-Messung nach mechanischer und thermischer Belastung und ermittelter Druckabfall ausgehend vom initialen Messdruck*

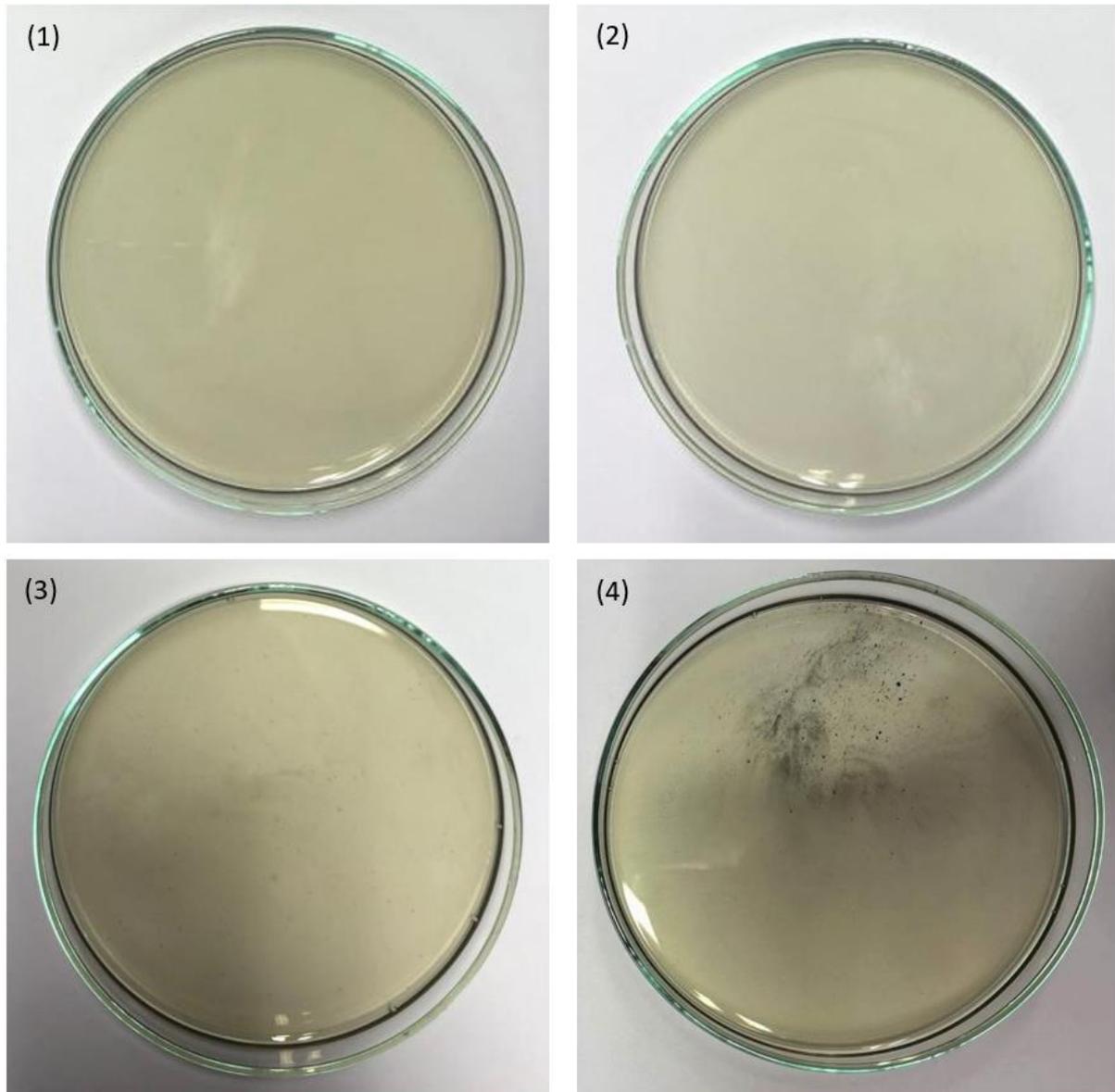
<b>Ausgleichsbehälter-Innendruck</b>			
Testgruppe	Nummer Prüfling	Druck [bar]	Druckabfall [%]
<b>1 - sauber</b>	1	4,990	13,2
	2	4,930	14,3
<b>2 - unterhalb CCC</b>	1	4,980	13,4
	2	4,590	20,2
<b>3 - auf CCC</b>	1	5,040	12,3
<b>4 - oberhalb CCC</b>	1	4,850	15,7
	2	4,710	18,1

Die final gemessenen Drücke liegen alle im Bereich von 4,59 bis 5,04 bar. Das in Abschnitt 3.5.1 gegebene Akzeptanzkriterium wird von allen Prüflingen erfüllt. Der Druckunterschied zwischen initialem und finalem Fülldruck liegt bei allen Hydrauliksystemen weit unter den zulässigen 64 %. Zwischen den Ausgleichsbehälter-Innendrücken der einzelnen Prüflinge sind gewisse Druckschwankungen zu erkennen. Prüfling 2 der Gruppe „unterhalb CCC“ weist mit 20,2 % den höchsten Druckabfall auf. Dies stützen die unter Punkt 3.5.3.1 aufgeführten Messwerte der Vorbringerkraft: Prüfling 2 der unter dem Grenzwert kontaminierten Gruppe besaß bei 0 Zyklen die höchste und nach 2800000 Belastungszyklen die geringste Ausstoßkraft aller Testsysteme. Die Hydraulik der Gruppe „auf CCC“ weist den geringsten Druckabfall im Ausgleichsbehälter vor. Abgesehen von diesen beiden Prüflingen ist ein Trend in den Messergebnissen zu erkennen: Mit zunehmenden Verschmutzungsgrad ist eine geringe Abnahme des finalen Ausgleichsbehälter-Innendrucks zu erkennen.

### 3.6 Demontage und optische Beurteilung

Nachdem die Hydrauliksysteme alle mechanischen und thermischen Prüfungen durchlaufen haben, wurden sie entleert und zerlegt. Durch die Demontage der Prüflinge können das Hydrauliköl und die Bauteile auf Verunreinigungen untersucht werden. Zusätzlich kann ein Blick ins Innere der Hydraulik Aufschluss darüber geben, ob und in welchem Ausmaß die gezielte Einbringung von Partikeln zur Förderung von Abrieb im System beiträgt.

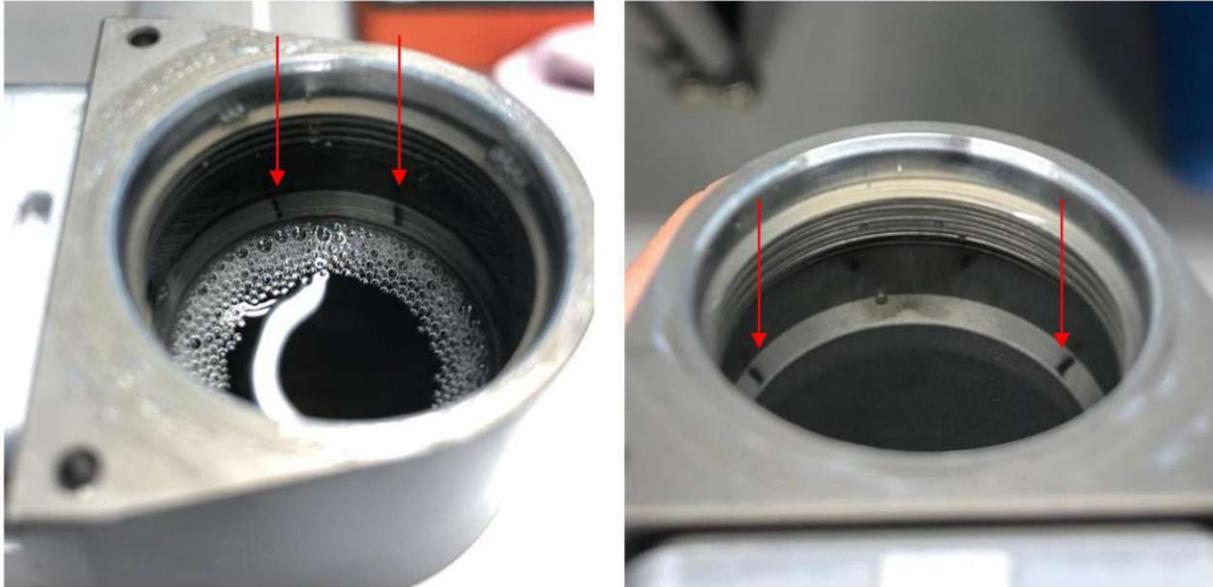
Abbildung 40 zeigt das bei der Demontage der Hydrauliksysteme entnommene Ölvolumen. Es ist zu erkennen, dass das Hydrauliköl der sauberen (1) und der unterhalb des Grenzwerts kontaminierten Testgruppe (2) reiner ist, als das Öl der beiden stärker verschmutzten Gruppen. Im Hydrauliköl der Prüflinge der Gruppe „auf CCC“ (3) sind vereinzelt Partikel erkennbar, das Öl der am stärksten verschmutzten Testgruppe „oberhalb CCC“ (4) ist deutlich verunreinigt. Es sind schwarze Partikel und Schlieren zu erkennen.



*Abbildung 40: Öl aus unterschiedlich stark verschmutzten, mechanisch und thermisch belasteten, Hydrauliksystemen. Kontaminationsgruppe (1) „sauber“, (2) „unterhalb CCC“, (3) „auf CCC“ und (4) „oberhalb CCC“*

Bei der optischen Inspektion des Hydrauliköls und konnte festgestellt werden, dass bei den stärker kontaminierten Prüflingen mehr Materialabrieb vorgefunden wurde. Die Menge der Verunreinigung im Hydrauliksystem korreliert mit der gezielt eingebrachten Partikelfracht. Während die Kontaminationsgruppen „sauber“, „unterhalb CCC“ und „auf CCC“ zufriedenstellende Ergebnisse liefern, war das Öl der Gruppe „oberhalb CCC“ stark verunreinigt. Die im Öl sichtbaren Verschmutzungen können auf Materialabrieb im System zurückgeführt werden. Rückstände der eingebrachten bunten Polypropylen-Partikel sind nicht erkennbar.

Bei der optischen Inspektion des Hydraulikgehäuses und des Anbindungsteils war auffallend, dass radial angeordnet, punktuelle Ablagerungen auftraten. Diese waren in Bereichen nahe der Einströmöffnungen des Ausgleichsbehälters, am Gehäuse und am Anbindungsteil, zu finden. Die Ablagerungen am Hydraulikgehäuse sind in Abbildung 41 zu sehen.



*Abbildung 41: Ablagerung von Verunreinigungen im Inneren des Hydraulikgehäuses*

Abbildung 42 zeigt die Ablagerungen am Anbindungsteil. Diese sind exakt in den Abständen der Einströmöffnungen, über den Umfang des Bauteils verteilt, angeordnet.



*Abbildung 42: Punktuelle Ablagerung von Verunreinigungen radial am Anbindungsteil*

### 3.7 Interpretation

Betrachtet man die Ergebnisse zusammenfassend so ist zu erkennen, dass alle getesteten Hydrauliksysteme die Anforderungen erfüllen, bevor sie der Langzeitbelastung ausgesetzt werden. Die gezielt eingebrachten Verschmutzungen scheinen dabei keinen Einfluss auf die gemessenen Werte zu haben.

Im Anschluss an den Langzeittest wurden bei allen Prüflingen geringere Reibwerte ermittelt. Dies ist durch den geringeren Druck im Hydrauliksystem zu erklären. Das Dämpfungsverhalten hat bei fast allen Prüflingen über den Dauertest hinweg leicht abgenommen. Weder die Reibkräfte noch die Dämpfungswerte sind dabei klar nach den Testgruppen differenzierbar. Daraus lässt sich ableiten, dass die Kontaminationspartikel lediglich einen geringfügigen Einfluss auf diese beiden Prüfungen haben. Bei der zu Anfang und Ende des Hubs gemessenen Vorbringerkraft und bei der Ausstoßkraft an der Mitte des Hubs, ist zu erkennen, dass die Abnahme der Kräfte mit der steigenden Partikelkontamination korreliert. Dies lässt darauf schließen, dass zunehmende Verschmutzung des Hydrauliksystems eine Leistungsverringerung zur Folge hat.

Der thermische Test im Klimaschrank mit anschließender Vermessung des Ausgleichsbehälter-Innendruckes hat gezeigt, dass eine Korrelation zwischen Grad der Verunreinigung und Druckabfall im Ausgleichsbehälter zu erkennen ist. Bei der Demontage der Hydrauliksysteme fiel auf, dass bei den stärker kontaminierten Prüflingen mehr Abriebpartikel im Hydrauliköl zu finden sind als bei der sauberen Vergleichsgruppe.

Am aussagekräftigsten ist allerdings der Test auf Innere Dichtheit. Ein Prüfling der am stärksten kontaminierten Testgruppe übersteigt die zulässigen Werte für den Totgang um 100 %, der zweite sogar um 200 %.

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse kann davon ausgegangen werden, dass die Partikelbelastung von Testgruppe 1 bis 3 noch tolerierbar ist. Die am stärksten verschmutzten Hydrauliksysteme der Gruppe 4 können jedoch nicht mehr die erwünschte Leistung erbringen und entsprechen somit nicht den erforderlichen Kriterien.

## 4 Erstellung einer Sauberkeitsspezifikation

### 4.1 Ableitung der funktionskritischen Verunreinigung

Um Funktionsbeeinträchtigungen zu vermeiden, müssen bei der Erstellung einer Sauberkeitsspezifikation als erstes die partikelsensiblen Bereiche des Bauteils oder Systems identifiziert werden. Dabei ist es notwendig, die Kontaminationspartikel so genau wie möglich nach den folgenden Merkmalen zu charakterisieren:

- Schadensmechanismus
- Partikelgröße
- Anzahl bzw. Menge der Partikel
- Werkstoffeigenschaften/ kritische Partikelmaterialien
- Fehlereintrittswahrscheinlichkeit, wie z.B. bei veränderlichen Zuständen
- (temporäre) örtliche Konzentration im System

Da es sich bei einer Hydraulik um ein fluidführendes System handelt, sind Verunreinigungen im System mobil und es besteht die Gefahr, dass diese von einem unkritischen Ort zu partikelsensiblen Bereichen gelangen. Deshalb müssen alle fluidbenetzten Flächen die notwendigen Sauberkeitsgrenzwerte des „schwächsten Glieds der Kette“ einhalten. [18]

Im Zuge des in dieser Arbeit untersuchten Hydrauliksystems, wurden die Ventile als partikelsensible Bereiche identifiziert. Diese weisen zum einen geringe Passungs- und Toleranzwerte auf und zum anderen ist deren Funktionalität von großer Bedeutung, um eine Funktionsverschlechterung des Hydrauliksystems zu vermeiden.

#### 4.1.1 Bewertung konstruktiver Merkmale

Zur Identifizierung potenziell funktionskritischer Kontaminationen, kann zunächst die Untersuchung der konstruktiven Merkmale hilfreich sein. Dazu sollten die Angaben auf den technischen Zeichnungen der Bauteile eingesehen werden. Spaltmaße, Toleranzangaben, Passungen und weitere Abmaße der Teile und des Systems lassen Rückschlüsse auf kritische Partikelgrößen zu. Dabei ist auch zu beachten, dass sich die Partikel je nach Art der Strömung unterschiedlich ausrichten können. Zur Bewertung des Risikos, welches ein Partikel mit sich bringt, ist also sowohl die Partikellänge als auch die Breite relevant. Handelt es sich um einen sehr schmalen Kontaminationspartikel, so besteht die Gefahr, dass dieser beispielsweise in Spaltmaße oder Passungen eindringt.

Im vorliegenden Hydrauliksystem variieren die geometrischen Abmaße, Oberflächenrauigkeiten und Toleranzen von Bauteil zu Bauteil. Da es sich um ein Fluidsystem handelt, sollte die kritischste Stelle im System untersucht werden. Für das Stellventil sind Toleranzwerte im einstelligen Mikrometer-Bereich gegeben. Der Ausschluss von Partikel mit größeren Abmaßen wäre aber weder wirtschaftlich vertretbar noch notwendig, denn die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Partikel entsprechender Größe und Orientierung an genau dieser Stelle im System ablagert ist verschwindend gering. Die Stellventile umfassen im Vergleich um ganzen System nämlich nur einen geringen Teil der benetzten Oberfläche, in welchem zusätzlich eine ausgeprägte Strömungsdynamik herrscht. Die konstruktiven Merkmale der Bauteile dienen in diesem Fall demnach nur zur groben Abschätzung der Größenordnung potenziell kritischer Partikel.

#### **4.1.2 Schadpartikelversuche**

Ein sehr bedeutender und realitätsgetreuer Ansatz zur Testung eines Systems auf Partikelverträglichkeit sind Schadpartikelversuche. Dabei werden Systeme betrachtet, die gezielt mit einer definierten Partikelkonzentration kontaminiert wurden, um deren Robustheit gegenüber Verunreinigungen zu untersuchen. Die Planung, Durchführung und Auswertung der Schadpartikelversuche stellt den Hauptanteil dieser Diplomarbeit dar und wurde in Abschnitt 3 genau beschrieben.

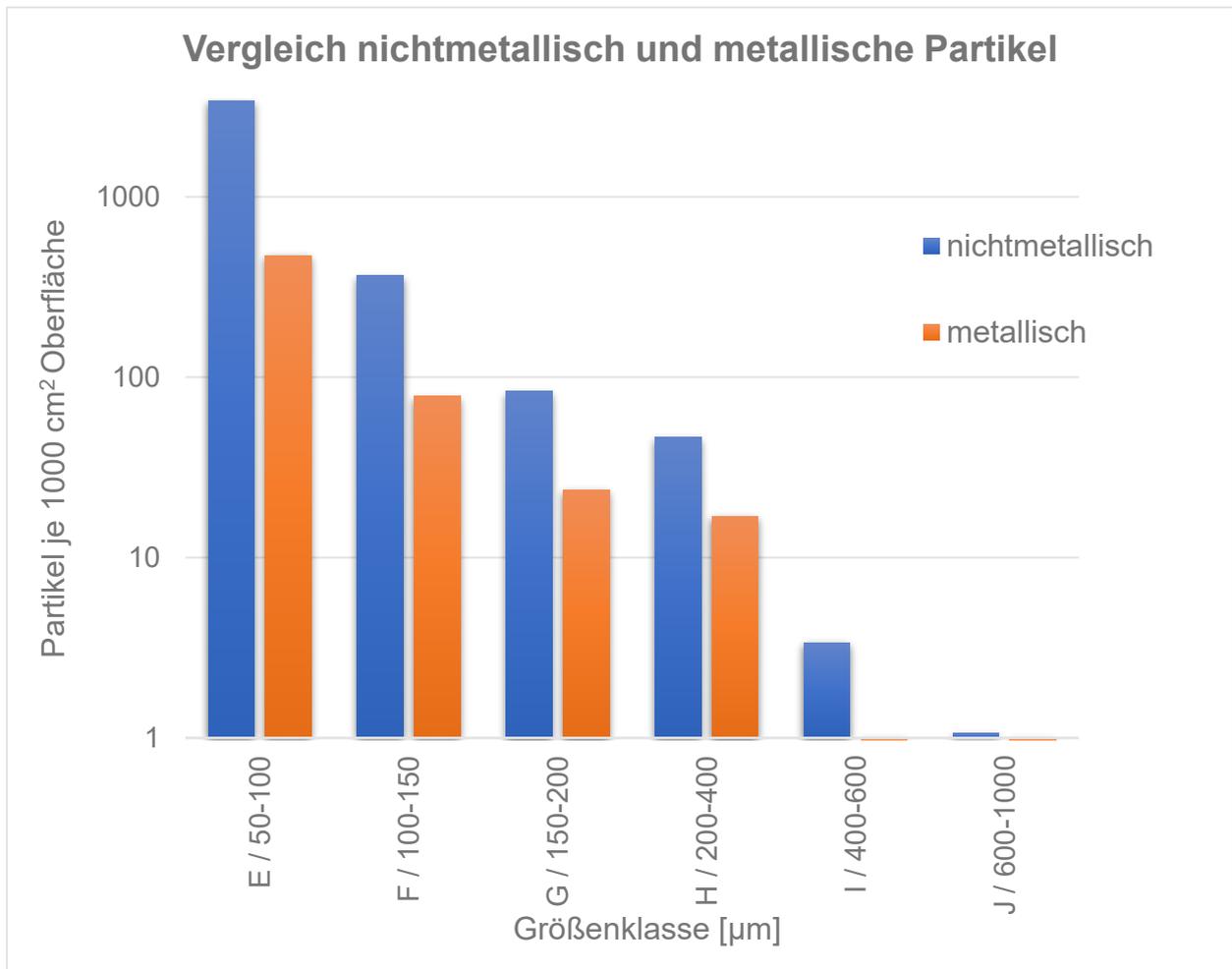
#### **4.1.3 Simulation**

Software-Programme ermöglichen die Berechnung der Strömung im Fluidsystem. Dadurch kann das Strömungsprofil simuliert und visualisiert werden, um einen Überblick über die vorherrschenden Bedingungen zu erhalten. Jedoch ist die Bewertung der erzielten Ergebnisse von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängig. Durch die Komplexität von Strömungssimulationen kann es bei der Definition der Randbedingungen zu potenziellen Abweichungen der Ergebnisse kommen. Weiterhin ist mit Strömungssimulationen auch ein hoher finanzieller und technischer Aufwand verbunden. Nach Rücksprache mit der Firma HYDAC, welche sich ebenfalls kritisch gegenüber der Aussagekraft der Simulationen positioniert hat, wurde im Rahmen der erstellen Sauberkeitsspezifikation daher auf eine Strömungssimulation verzichtet.

## 4.2 Betrachtung zum Stand der Technik

Sind die eben beschriebenen Anforderungen an die Sauberkeit des Systems festgelegt, ist zu prüfen, ob diese technisch und wirtschaftlich realisierbar sind. Dazu sollte zunächst der aktuelle, branchenspezifische Stand zu Materialien und deren Bearbeitung und Reinigung betrachtet werden. Demnach ist zur Säuberung und Produktion von Bauteilen für weniger sauberkeitskritische Branchen nur ein geringeres Budget wirtschaftlich vertretbar als beispielsweise in der Halbleiterindustrie.

Sauberkeitsanalysen mit vergleichbaren Bauteilen sind hilfreich, um aufzuzeigen welches Sauberkeitsniveau bei der vorliegenden Produktionstechnik zu erwarten ist. Dabei sind ähnliche Fertigungs-, Reinigungs- und Logistikprozesse der Teile erforderlich. In der Vergangenheit wurden bereits Hydraulik-Bauteile der Kniegelenke Genium und C-Leg untersucht. Dabei wurden Abklinguntersuchungen und Sauberkeitsanalysen mittels Nassextraktion durchgeführt. Die Analysen zeigten, dass sowohl verschiedene Partikel als auch Fasern auf den Bauteiloberflächen vorgefunden wurden. Betrachtet man die Materialien der Partikel, so handelt es sich bei dem Großteil um nichtmetallische Partikel. Abbildung 43 kann man entnehmen, wie viele Partikel bei der Analyse auf 1000 cm<sup>2</sup> Bauteiloberfläche, gemittelt über alle analysierten Teile, vorgefunden wurden. Dabei befinden sich die meisten Partikel in der Größenklasse E, welche den Bereich von 50 - 100 µm umfasst. Die größten auf der Bauteiloberfläche vorgefundenen Partikel, liegen in der Größenordnung 600 - 1000 µm, was der Klasse J entspricht.



*Abbildung 43: Vergleich metallische und nichtmetallische Partikel je 1000 cm<sup>2</sup> Bauteiloberfläche*

Anhand der vorgefundenen Kontaminationen wurde für jedes Bauteil der CCC-Wert ermittelt. Zur groben Einordnung der vorgefundenen Kontamination, wurde der für eine Arbeitshydraulik definierte Bauteilsauberkeitscode der Firma HYDAC verwendet, um die Ergebnisse einzuordnen. Dieser ist als A(F8/G7/H5/I4) definiert. Das maximal zulässige Partikel darf demnach nicht größer als 600  $\mu\text{m}$  sein. Die tatsächlich vorgefundene Verunreinigung ist in Tabelle 18 angegeben und übersteigt sowohl die zulässige Partikelgröße als auch die zulässigen Partikelzahlen in mehreren Größenklassen. Die rote Linie kennzeichnet den Schwellenwert der maximal zulässigen Partikelgröße. Laut dem definierten Bauteilcode sind Partikel der Klasse J und größer inakzeptabel, die entsprechenden Felder wurden in der Tabelle orange markiert. Die gelben Felder heben die Größenklassen hervor in denen die maximal tolerierte Partikelanzahl überschritten wurde. Es wird deutlich, dass die untersuchten

Bauteile nicht den für einen Flüssigkeitskreislauf einer Arbeitshydraulik erforderlichen Reinheitsanforderungen entsprechen.

*Tabelle 18: Vorgefundene Partikel je 1000 cm<sup>2</sup> Bauteiloberfläche und ermittelte CCC-Werte der Bauteile. Kennzeichnung des Schwellenwerts der maximal zulässigen Partikelgröße (rote Linie) und dessen Überschreitung (orange Markierungen), Kennzeichnung bei Überschreitung der maximal zulässigen Partikelanzahl (gelbe Markierungen)*

Partikel je 1000 cm <sup>2</sup> BT-Oberfläche		Größenklasse [µm]					
Bauteil	CCC-Wert	E / 50-100	F / 100-150	G / 150-200	H / 200-400	I / 400-600	J / 600- 1000
Ventil	A(E11/F8/G7/H6/I4/J00/K-N00)	1770,8	193,5	74,4	39,7	9,9	0,0
Mittelteil	A(E10/F8/G5/H5/I2/J00/K-N00)	874,6	135,1	30,0	26,3	3,8	0,0
UVS	A(E12/F9/G6/H5/I00/J3/K-N00)	2088,1	300,9	53,9	22,5	0,0	4,5
Zwischenteil Ventilwelleneinheit	A(E12/F9/G8/H7/I00/J00/K-N00)	2099,4	416,9	210,9	117,7	0,0	0,0
OVS	A(E9/F6/G6/H5/I00/J2/K-N00)	292,2	58,4	50,6	23,4	0,0	3,9
Zylinderhülse	A(E10/F8/G5/H6/I00/J00/K-N00)	986,5	225,8	23,8	39,6	0,0	0,0
Mittelteil	A(E11/F8/G6/H4/I3/J4/K-N00)	1285,2	181,9	52,8	11,7	5,9	11,7
Kupplung Ventil	A(E11/F8/G6/H5/I00/J00/K-N00)	1404,6	223,6	48,6	19,4	0,0	0,0
Auflagering	A(E11/F7/G6/H4/I4/J00/K-N00)	1083,8	68,7	49,0	9,8	9,8	0,0
Sinusfeder	A(E11/F9/G6/H4/I3/J00/K-N00)	1639,5	332,9	39,7	14,9	5,0	0,0
Außenring Fa.Gleser	A(E13/F11/G9/H8/I3/J00/K-N00)	7445,1	1217,8	310,4	200,6	4,8	9,6
Außenring Fa.Loher	A(E12/F10/G6/H6/I3/J00/K-N00)	2941,7	682,9	33,4	43,0	4,8	0,0

Ritzel	A(E12/F10/G9/H9/I5/J00/K-N00)	3096,0	749,0	364,5	259,7	20,0	0,0
Druckfeder	A(E15/F11/G9/H8/I3/J00/K-N00)	26743,4	1563,0	309,9	137,3	4,4	0,0
Kolbeneinheit G X3	A(E14/F10/G6/H6/I3/J00/K-N00)	10650,4	828,4	52,1	47,3	4,7	0,0
Kolbenstange C-Leg	A(E11/F9/G7/H6/I0/J3/K-N00)	1162,8	290,7	116,3	62,6	0,0	4,5
Hydraulikgehäuse C-Leg	A(E10/F7/G00/H00/I00/J00/K-N00)	583,5	77,1	0,0	0,0	0,0	0,0

Durch Benchmarking können Unterschiede zwischen vergleichbaren Unternehmen aufgezeigt werden. Dies kann Diskrepanzen aufzeigen und bei der Festlegung möglicher Verbesserungen helfen. Infolgedessen definierte, firmenübergreifende Grenzwerte sind sinnvoll, um ein einheitliches Reinheitsniveau innerhalb der einzelnen Branchen zu erzielen. Identische Sauberkeitsspezifikationen wiederum vereinfachen sowohl den Kunden-Lieferanten Dialog als auch die Planbarkeit von Prozessen und Kosten.

Die Überprüfung der erstellten Reinheitsspezifikation sollten im Rahmen der Analyseverfahren der Norm VDA 19.1 möglich sein. Sind zur Prüfung spezielle Analysegeräte, die über die „Stand der Technik“ - Gerätschaften hinausgehen erforderlich, ist fraglich, ob eine wirtschaftlich vertretbare Analyse durch den Lieferanten gewährleistet werden kann.

### 4.3 Sauberkeitsgrenzwerte

Besteht aufgrund einer Partikelverunreinigung die Gefahr einer Funktionsbeeinträchtigung des Systems, so sollte ein Sauberkeitsgrenzwert definiert werden. Wird ein Grenzwert überschritten, so führt das nicht unmittelbar zum Fehlereintritt, die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Fehlers steigt jedoch an. [18] Unter Berücksichtigung von Abschnitt 4.1 und der in den Schadpartikelversuchen gewonnenen Erkenntnissen kann ein Sauberkeitsgrenzwert für das untersuchte Hydrauliksystem definiert werden. Die Prüflinge der Testgruppe 3 konnten in den Orientierungsprüfungen zufriedenstellende Ergebnisse erzielen. Eine stärkere Partikelbelastung führte allerdings zu einer Zunahme des Totgang des Systems. Demzufolge entspricht die Verunreinigung von Gruppe 3 der gerade noch zulässigen Kontamination. Die maximal zulässige Partikelgröße entspricht  $600\ \mu\text{m}$  und System-Sauberkeitsgrenzwert lautet  $\text{CCC} = \text{A}(\text{E}10/\text{F}8/\text{G}7/\text{H}5/\text{I}4)$ . Mithilfe der Norm VDA 19 können die zulässigen Partikelgrößen und Konzentrationsklassen aufgelistet werden. Für das untersuchte Hydrauliksystem ist folgenden Partikel-Zusammensetzung zulässig:

- mehr als 500 bis 1.000 Partikel  $\geq 50\ \mu\text{m}$  und  $< 100\ \mu\text{m}$  (E10),
- mehr als 130 bis 250 Partikel  $\geq 100\ \mu\text{m}$  und  $< 150\ \mu\text{m}$  (F8),
- mehr als 64 bis 130 Partikel  $\geq 150\ \mu\text{m}$  und  $< 200\ \mu\text{m}$  (G7),
- mehr als 16 bis 32 Partikel  $\geq 200\ \mu\text{m}$  und  $< 400\ \mu\text{m}$  (H5),
- mehr als 8 bis 16 Partikel  $\geq 400\ \mu\text{m}$  und  $< 600\ \mu\text{m}$  (I4). [18]

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse dieser Arbeit noch einmal zusammengefasst und diskutiert. Außerdem werden Bereiche aufgezeigt, in denen die Fortführung der vorliegenden Arbeit sinnvoll ist und mögliche weitere Schritte erläutert.

### 5.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Diplomarbeit wurde die partikuläre Verunreinigung im Hydrauliksystem eines Mikroprozessor-Prothesenkniegelenks untersucht. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für die Festlegung eines Sauberkeitsgrenzwert.

Die technische Sauberkeit von Otto Bock-Hydraulikbauteilen wurde bereits in einem vorhergehenden Projekt untersucht. Dabei wurde jedoch lediglich der Reinheitszustand einiger hydraulischer Bauteile analysiert. Allein durch eine Sauberkeitsanalyse kann allerdings keine Aussage über die Funktionalität unterschiedlich stark verschmutzter Systeme gemacht werden. Um die Fehlerrate zu senken und Reklamationen zu verringern wurde deshalb ein Grenzwert für Reinheitsanforderungen erarbeitet.

Zunächst wurden einige aus dem Lager entnommene, potenziell kritische Hydraulik-Bauteile auf ihren Sauberkeitszustand geprüft. Zusätzlich wurden alle Bauteile professionell gereinigt. Basierend auf den Ergebnissen der vorherigen Sauberkeitsanalysen wurde nach Partikeln gesucht, welche die tatsächliche Kontamination am besten repräsentieren können. Die Wahl fiel auf Normpartikel, welche in zwei verschiedenen Materialien und sechs verschiedenen Größenklassen zum Einsatz kamen. Die zu testenden Hydrauliksysteme wurden in vier Gruppen unterteilt. Eine Gruppe wurde nach der Reinigung so sauber wie möglich montiert und befüllt. Die anderen Gruppen wurden, angelehnt an einem von der Firma HYDAC definierten Sauberkeitsgrenzwert, verschiedenen Verschmutzungszuständen zugeordnet. Eine Gruppe wurde mit der gerade noch dem Grenzwert entsprechenden Partikelfracht belastet, die anderen beiden mit weniger bzw. mehr Partikel. Anschließend folgten hydraulische Orientierungsprüfungen. Dazu wurden zunächst einige Charakterisierungsprüfungen durchgeführt, um das Verhalten der einzelnen Prüflinge aufzuzeichnen. Es folgte ein Langzeittest, der die, über einen Zeitraum von zwei Jahren, auf die Hydraulik wirkende mechanische Beanspruchung simuliert. Nach diesem Test wurde erneut eine Hydraulik-Charakterisierung durchgeführt, zusätzlich

wurde der Totgang der Systeme geprüft. Die Prüflinge wurden darauffolgend thermischer Belastung über einen Zeitraum von 20 Tagen ausgesetzt und der final vorhandene Druck im Ausgleichsbehälter wurde ermittelt. Um einen Überblick über die Kontaminations- und Abriebsituation im System zu erlangen, wurden die Hydrauliksysteme zuletzt demontiert und entleert.

Abgesehen von den Schadpartikelversuchen wurden weitere Faktoren betrachtet, die bei der Definition eines Sauberkeitsgrenzwerts eine Rolle spielen. Dazu gehört beispielsweise eine Bewertung der konstruktiven Merkmal oder eine Betrachtung zum Stand der Technik.

Letztendlich wurde ein Sauberkeitsgrenzwert für das Hydrauliksystem definiert. Dieser dient als fundierte Entscheidungsgrundlage, bis zu welchem Verschmutzungsgrad sämtliche Anforderungen nachweislich noch erfüllt werden können.

## 5.2 Diskussion und Ausblick

Die durchgeführten Sauberkeitsanalysen zeigten, dass die aktuellen Bauteile deutlich sauberer waren, als jene die vor ein paar Jahren untersucht wurden. Um dies zu veranschaulichen, wurde jeweils der durchschnittliche CCC-Wert über alle untersuchten Bauteile ermittelt. Für die dieser Arbeit vorhergegangenen Analysen, welche unter 4.2 aufgeführt sind, wurde der Wert  $CCC = A(E12/F9/G7/H6/I3/J1/K-N00)$  ermittelt. Verglichen damit ist der aktuell vorgefundene Verschmutzungszustand mit  $CCC = A(E10/F8/G3/H2/I00/J0/K-N00)$  deutlich geringer. Betrachtet man beispielsweise die Größenklasse E, welche Partikel  $\geq 50 \mu\text{m}$  und  $<100 \mu\text{m}$  umfasst, so wurden in den ersten Analysen bis zu 4000 Partikel (E12) und nun maximal 1000 Partikel (E10) vorgefunden. Vermutlich ist diese erhebliche Verbesserung des Sauberkeitszustandes auf eine Veränderung der Verpackungsstandards zurückzuführen.

Die Kontaminationsklassen der Schadpartikelversuche wurden, angelehnt an einen von der Firma HYDAC definierten Sauberkeitscode, gewählt und geringfügig modifiziert. Die Ergebnisse der Orientierungsprüfungen zeigen, dass der ermittelte Grenzwert dem CCC-Wert der Firma HYDAC sehr ähnlich ist. Aufgrund dieser Übereinstimmung wird die Richtigkeit und Eignung des CCC-Werts für das untersuchte Hydrauliksystem durch die erhaltenen Ergebnisse gestützt.

Die Limitationen dieser Arbeit entstehen vor allem aus einer geringen Zahl an Prüfsystemen. Zur Ermittlung des Sauberkeitsgrenzwertes mittels Hydraulikprüfungen standen nur sieben Systeme zu Verfügung. Aufgrund der erforderlichen Unterteilung in unterschiedlich stark verschmutzte Testgruppen, bestehen die Gruppen aus nur je einem oder zwei Prüflingen. Da Hydrauliktests gewissen Regelschwankungen unterliegen ist eine größere Anzahl an Prüflingen nötig, um ein repräsentatives Messergebnis zu erzielen.

Außerdem ist zu beachten, dass das für die Versuche verwendete Verhältnis von nichtmetallischen zu metallischen Partikeln nicht der vorgefundenen Kontamination entspricht. Es wurde angenommen, dass aktuell noch ein großer Anteil der nichtmetallischen Fremdkontaminationen von Verpackung und Handling ausgeht und dieser durch eine weitere, bereits geplante, Anpassung der Verpackungsempfindlichkeitsklassen eingedämmt werden kann. Deshalb wurde das

Verhältnis der verwendeten Werkstoffe zugunsten der metallischen Partikel auf 50:50 verschoben.

Weiterhin ist zu beachten, dass ein Überschreiten des ermittelten Sauberkeitsgrenzwertes nicht zwingend in einer Leistungsverminderung resultiert. Die Ergebnisse der Orientierungsprüfungen zeigten, dass die Kontamination von Testgruppe 3 tolerabel ist und die noch stärker verschmutzten Prüflinge der Gruppe 4 die Anforderungen nicht mehr erfüllen können. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Grenzwert zwischen den Kontaminationszuständen der beiden Testgruppen liegt, ist jedoch wesentlich größer, als dass exakt Gruppe 3 dem zulässigen Maximum entspricht.

Die durchgeführten Versuche sind als Orientierung zur Erstellung einer Sauberkeitsfibel zu sehen. Die gewonnenen Ergebnisse werfen jedoch noch Fragen auf. Diese Diplomarbeit ist Teil eines momentan laufenden Technologieprojektes der Firma Otto Bock, welches in den nächsten Monaten weiter fortgeführt wird. Die offenen Fragen können mithilfe weiterer Untersuchungen geklärt werden: Die Auswertung der in der Vergangenheit aufgetretenen Schadensfällen ergab, dass die meisten Probleme an den Ventilen aufgetreten sind. Daher wäre es sinnvoll die Ventilbaugruppen gesondert zu testen, um zu sehen, ob diese ihren Anforderungen entsprechen.

Um einen passenden Ort für die gezielte Kontamination zu finden, wurden im Rahmen der Arbeit Strömungssimulationen betrachtet. Da die Simulationen nur eine vereinfachte Darstellung der Realität sind, wäre eine optische Betrachtung der Fluidströme im System aufschlussreich. Durch Kontamination und mechanische Belastung eines Hydrauliksystem mit transparentem Gehäuse könnte untersucht werden, ob die Partikel in die Totzonen der Hydraulik gelangen können und daher nicht mehr am Strömungsgeschehen teilnehmen. Die für die Kontamination verwendeten Polypropylen-Partikel eignen sich für diese Versuche besonders gut, da die Partikel mit Fluoreszenzindikatoren markiert sind.

Im Anschluss an das aktuelle Projekt ist bei der Firma Otto Bock ein Folgeprojekt zum Thema Reinheitsanforderungen geplant. Im Rahmen dessen soll eine „Otto Bock-Sauberkeitsfibel“ erstellt werden, welche zukünftig als fundierte Entscheidungsbasis für Zuordnung von Komponenten und Bauteilen zu erforderlichen Sauberkeitsklassen dienen wird. Weiterhin sollen Konstruktionsrichtlinien erstellt

werden, welche die individuellen Anforderungen an die technische Sauberkeit einzelner Bauteile definieren.

Bei der technischen Sauberkeit handelt es sich nicht um ein unveränderliches Merkmal, sondern nur um einen temporären, veränderlichen Zustand. Es stellt sich die Frage, ob es wirtschaftlicher ist, den gesamten Prozess sauber zu halten oder die Komponenten am Ende des Prozesses zu reinigen. Um dies festzustellen, können potenziell geeignete und derzeit am Markt verfügbare Reinigungsanlagen und -mittel untersucht werden. Abhängig von Zeit- und Kostenaufwand der Reinigung der fertig montierten Hydrauliksystemen kann abgeschätzt werden, welcher Ansatz rentabler ist.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mikroprozessorgesteuertes Prothesenkniegelenk „Genium“ der Firma Otto Bock mit integriertem Hydrauliksystem [3] .....	2
Abbildung 2: Arbeitsweise eines doppeltwirkenden Zylinders. Schematische Darstellung [6] .....	6
Abbildung 3: Hydraulikschaltbild: Hydraulikzylinder mit Ausgleichsvolumen, sowie Rückschlag- und Stellventilen. Ölfluss während Flexion (rot) und Extension (blau) [7] .....	7
Abbildung 4: Definition der Partikellänge nach ISO 16232 [19] .....	16
Abbildung 5: Flowchart zum Vorgehen in Kapitel 3 .....	20
Abbildung 6: Vorgehensweise bei der Auswahl des für die Sauberkeitsanalyse geeigneten Extraktionsverfahrens [18] .....	24
Abbildung 7: Ausschnitt aus dem Analysebericht des Hydraulikgehäuses. Auflistung der Prüfbedingungen, Ergebnisse der Gravimetrie und Blindwert-Ermittlung.....	28
Abbildung 8: Ausschnitt aus dem Analysebericht des Hydraulikgehäuses. Ergebnisse der mikroskopischen Analyse .....	29
Abbildung 9: Ausschnitt aus dem Analysebericht des Hydraulikgehäuses. Bildmaterial der größten vorgefundenen Verunreinigungen .....	30
Abbildung 10: Vorgefundene nichtmetallische und metallische Partikel pro 1000 cm <sup>2</sup> Bauteiloberfläche .....	32
Abbildung 11: Mikrotomographie-Scan eines aufgerollten Filterpads. Draufsicht, Vorder- und Seitenansicht eines Partikels im Filterpad .....	35
Abbildung 12: Segmentierung eines Partikels aus CT-Daten und Messung der Partikeldimensionen .....	36
Abbildung 13: 3D-Modell des Partikels aus verschiedenen Perspektiven .....	36
Abbildung 14: Ausschnitt aus der Vorderansicht eines mikrotomographischen Scans eines Filterpads mit Partikel.....	37
Abbildung 15: Vergleich der Methoden zur Partikelvermessung. (1) L <sub>max</sub> , (2) Vermessung in den Ebenen der CT-Scans .....	38
Abbildung 16: Montage der Unterbaugruppe „Anbindungsteil“ .....	39
Abbildung 17: Anreichen der gereinigten Teile bei der Montage .....	39
Abbildung 18: Normpartikel der Firma BIDAG. Polypropylen-Partikel mit bunten UV-Indikatoren (oben) und Aluminiumpartikel (unten).....	41
Abbildung 19: Abzählen der auf einen Glasträger aufgereihten Partikel .....	45
Abbildung 20: Mikroskopische Aufnahme der Partikelzusammensetzung des Kontaminationszustand 3 „auf dem CCC-Grenzwert“, aufgenommen mit dem Stereomikroskop Leica MZ6 .....	45
Abbildung 21: Geschwindigkeits-Stromlinien im Hydrauliksystem während der Flexion, mit einer Kolben-Geschwindigkeit von 200 mm/s.....	46
Abbildung 22: Geschwindigkeits-Stromlinien im Hydrauliksystem während der Extension mit einer Kolben-Geschwindigkeit von 200 mm/s. Kennzeichnung der Kontaminationsstelle (roter Punkt) und der Totzonen an den Enden der Kanäle (gelb markiert) .....	46
Abbildung 23: Arbeitsplatz vor der Kontamination: Hydrauliksystem ohne obere Verschlusschraube, Partikelfracht auf Glasträger und verschiedene Hilfsmittel .....	48
Abbildung 24: Flowchart zum Ablauf der Hydraulikprüfungen .....	49

Abbildung 25: Hydraulik während der Charakterisierung. Hydrauliksystem auf der Linearprüfmaschine, mit Sensor zur Temperaturüberwachung .....	50
Abbildung 26: Aufspannung der sieben Hydraulikprüflinge auf die Prüfmaschine während des Dauertests. Links: Ventilatoren zur Kühlung .....	54
Abbildung 27: Frequenzaufzeichnung der Lastaufbringung und Temperaturüberwachung des am wenigsten gekühlten Hydraulikprüflings .....	55
Abbildung 28: Kraft-Weg-Plot. Zu Beginn und Ende der Charakterisierung gemessene Rohdaten und daraus ermittelte Vorbringerkraft. Messdaten von Prüfling 1 der Gruppe „sauber“ bei null Zyklen mechanischer Belastung .....	56
Abbildung 29: Wirkende Kraftvektoren während Flexion (roter Pfeil) und Extension (blauer Pfeil) .....	56
Abbildung 30: Vergleich der Abnahme der Vorbringerkraft der Prüflinge nach 2800000 Zyklen mechanischer Belastung. Messungen zu Beginn der Charakterisierung, Kolbenhub 5 mm und 20 mm .....	59
Abbildung 31: Gemessene Vorbringerkraft von Prüfling 1 der Testgruppe „oberhalb CCC“ bei null und 2800000 Zyklen mechanischer Belastung .....	60
Abbildung 32: Durchschnittliche Abnahme der Ausstoßkraft je Testgruppe nach 2800000 Zyklen mechanischer Belastung .....	62
Abbildung 33: Vergleich der Abnahme der Reibkraft aller Prüflinge, nach 2800000 Zyklen mechanischer Belastung .....	64
Abbildung 34: Kraft-Hub-Diagramm bei 0 Zyklen mechanischer Belastung. Belastung mit verschiedenen farbkodierten Geschwindigkeiten. Angabe der Maximalgeschwindigkeiten in Extension (E) und Flexion (F). Messdaten von Prüfling Nr. 2 der Gruppe „sauber“ .....	66
Abbildung 35: Kraft-Geschwindigkeit Diagramm bei null Zyklen mechanischer Belastung. Vergleich Flexion und Extension, Messdaten von Prüfling Nr. 2 der Gruppe „sauber“ .....	67
Abbildung 36: Vergleich der ermittelten Kraft-Geschwindigkeit-Kurven aller Prüflinge bei null und 2800000 Zyklen mechanischer Belastung .....	68
Abbildung 37: Kraft-Zeit-Diagramme der Hydraulikprüflinge, aufgenommen während des Tests auf innere Dichtheit nach 2800000 Zyklen mechanischer Belastung .....	69
Abbildung 38: Weg-Zeit-Plot der Messdaten des Totgang der Prüflinge in Flexions- und Extensionsrichtung nach 2800000 Zyklen mechanischer Belastung. Kennzeichnung der Toleranzgrenzen (rote Linien) .....	70
Abbildung 39: Prüflinge während der thermischen Belastung im Klimaschrank .....	70
Abbildung 40: Öl aus unterschiedlich stark verschmutzten, mechanisch und thermisch belasteten, Hydrauliksystemen. Kontaminationsgruppe (1) „sauber“, (2) „unterhalb CCC“, (3) „auf CCC“ und (4) „oberhalb CCC“ .....	73
Abbildung 41: Ablagerung von Verunreinigungen im Inneren des Hydraulikgehäuses .....	74
Abbildung 42: Punktuelle Ablagerung von Verunreinigungen radial am Anbindungsteil .....	74
Abbildung 43: Vergleich metallische und nichtmetallische Partikel je 1000 cm <sup>2</sup> Bauteiloberfläche .....	79

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Reinheitsklassen und zulässige Partikelanzahl pro 100 ml Hydrauliköl [14]	12
Tabelle 2: Alphabetische Größenklassen und zugehörige Partikelgrößen [19]	18
Tabelle 3: Numerische Konzentrationsklassen und zulässige Partikelanzahl pro 1000 cm <sup>2</sup> Oberfläche (O) oder 100 cm <sup>3</sup> Volumen (V) [19]	19
Tabelle 4: Übersicht der für die Sauberkeitsanalyse bei der Firma HYDAC ausgewählten Hydraulikbauteile	21
Tabelle 5: Extraktionsbedingungen der von der Firma HYDAC durchgeführten Sauberkeitsanalysen	24
Tabelle 6: Ermittelte CCC-Werte der Bauteile	31
Tabelle 7: Vergleich der vorgefundenen Partikelarten. Auflistung der nichtmetallischen und metallischen Partikel je Größenklasse	31
Tabelle 8: Übersicht der für die Fremdkontamination verwendeten Normpartikel	41
Tabelle 9: Definition der Verschmutzungszustände für die Fremdkontamination, angelehnt an den Bauteilsauberkeitscode für den Kreislauf einer Arbeitshydraulik [21]. Getroffene Veränderungen sind mit roten Zahlenwerten markiert. Kennzeichnung der maximal zulässigen Partikelgröße durch eine rote Linie. Ableitung der Kontamination der Prüfgruppen 1,2 und 4 ausgehend von der auf dem CCC-Wert basierenden Gruppe 3. Auflistung der verwendeten Partikel pro Hydrauliksystem, nach Prüfgruppen aufgegliedert	43
Tabelle 10: Anforderungen an die Vorbringerkraft bei verschiedenen Kolbenhüben	51
Tabelle 11: Vorbringerkraft der Prüflinge bei null Zyklen mechanischer Belastung. Gemessen zu Beginn und Ende der Charakterisierung bei 5 mm und 20 mm Kolbenhub	57
Tabelle 12: Vorbringerkraft der Prüflinge nach 2800000 Zyklen mechanischer Belastung. Gemessen zu Beginn und Ende der Charakterisierung bei 5 mm und 20 mm Kolbenhub	58
Tabelle 13: Ausstoßkraft der Prüflinge bei null Zyklen mechanischer Belastung	60
Tabelle 14: Ausstoßkraft der Prüflinge nach 2.800 000 Zyklen mechanischer Belastung	61
Tabelle 15: Maximal gemessene Reibkraft bei null Zyklen mechanischer Belastung	62
Tabelle 16: Maximal gemessene Reibkraft nach 2800000 Zyklen mechanischer Belastung	63
Tabelle 17: Ausgleichsbehälter-Innendruck-Messung nach mechanischer und thermischer Belastung und ermittelter Druckabfall ausgehend vom initialen Messdruck	71
Tabelle 18: Vorgefundene Partikel je 1000 cm <sup>2</sup> Bauteiloberfläche und ermittelte CCC-Werte der Bauteile. Kennzeichnung des Schwellenwerts der maximal zulässigen Partikelgröße (rote Linie) und dessen Überschreitung (orange Markierungen), Kennzeichnung bei Überschreitung der maximal zulässigen Partikelanzahl (gelbe Markierungen)	80

## Literaturverzeichnis

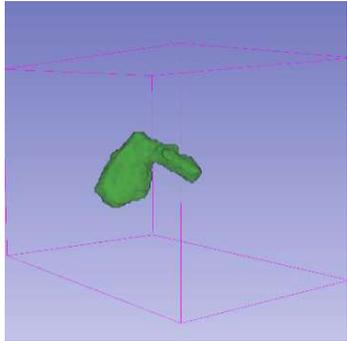
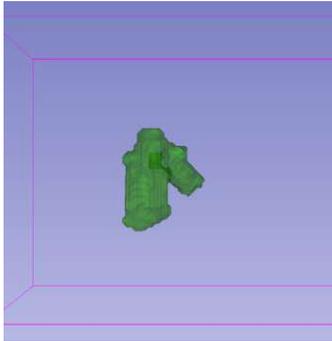
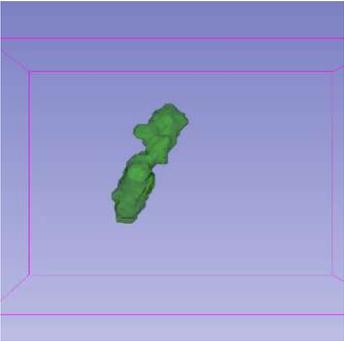
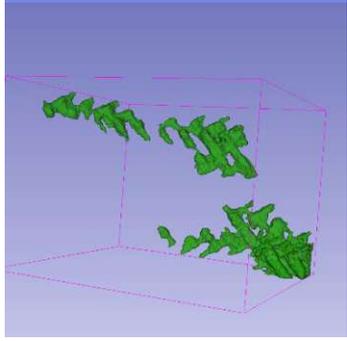
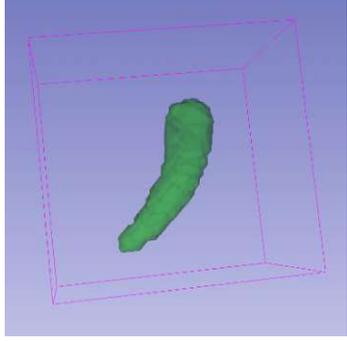
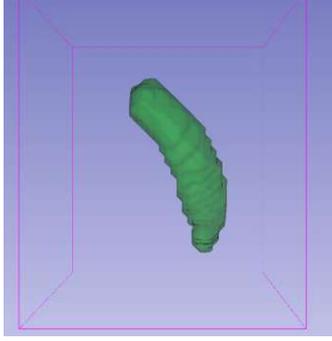
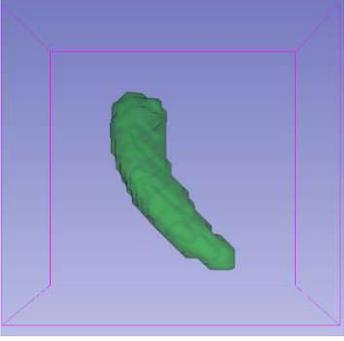
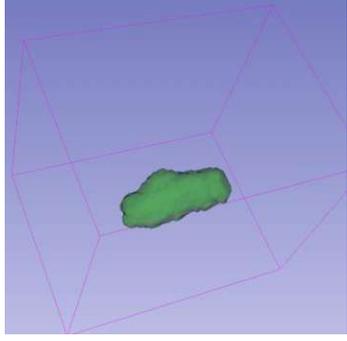
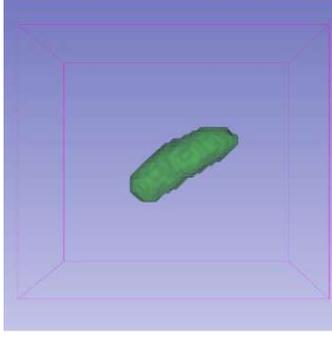
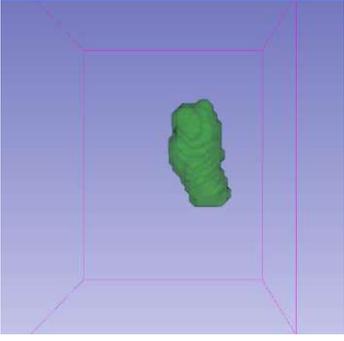
- [1] S. Oehler, *Mobilitätsuntersuchungen und Belastungsmessungen an Oberschenkelamputierten*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2015.
- [2] W. Cao, H. Yu, W. Chen, Q. Meng, und C. Chen, „Design and Evaluation of a Novel Microprocessor-Controlled Prosthetic Knee“, *IEEE Access*, Bd. 7, S. 178553–178562, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2957823.
- [3] „Genium | Für Macher.“ <https://www.ottobock.com/undefined> (zugegriffen 26. April 2023).
- [4] D. Will und N. Gebhardt, Hrsg., *Hydraulik*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014. doi: 10.1007/978-3-662-44402-3.
- [5] T. Krist, *Hydraulik Fluidtechnik: Hydraulik-Steuerungen*, 8. Aufl. Würzburg: Vogel Business Media, 1997.
- [6] „CASE IH - Hydraulikzylinder“. [https://www.caseih.com/emea/de-at/Reusable-Content/Magazine/zoom-digital/hydraulic\\_cylinders/index.html](https://www.caseih.com/emea/de-at/Reusable-Content/Magazine/zoom-digital/hydraulic_cylinders/index.html) (zugegriffen 26. April 2023).
- [7] Dipl.-Ing. Dr. Sima, Harald, „Einführung Orthetik“, Wien, 31. Mai 2021.
- [8] N. Gebhardt und J. Weber, *Hydraulik – Fluid-Mechatronik: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Messtechnik und virtuelles Engineering*, 7. Aufl. 2020 Edition. Berlin: Springer Vieweg, 2020.
- [9] P. Heisel, Uwe, Fiebig, Wieslaw, Mittwollen, Norbert, und Oehler, Martin, „Luftblaseneinfluss auf Schallgeschwindigkeit und Druckschwingungen in einem hydraulischen System“, *Ölhydraulik, Pneumatik*, Bd. 38, Nr. 7, S. 420–423, 1994.
- [10] M. Orošnjak, M. Jocanović, und V. Karanović, „Applying Contamination Control for Improved Prognostics and Health Management of Hydraulic Systems“, in *Advances in Asset Management and Condition Monitoring*, A. Ball, L. Gelman, und B. K. N. Rao, Hrsg., in Smart Innovation, Systems and Technologies. Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 583–596. doi: 10.1007/978-3-030-57745-2\_49.
- [11] H. Kohler, „Sauberkeit im Hydrauliksystem“, *Dtsch Agrartech*, 1973, Zugegriffen: 23. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Sauberkeit+im+Hydrauliksystem&author=Kohler%2C+H.&publication\\_year=1973](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Sauberkeit+im+Hydrauliksystem&author=Kohler%2C+H.&publication_year=1973)
- [12] M. Singh, G. S. Lathkar, und S. K. Basu, „Failure Prevention of Hydraulic System Based on Oil Contamination“, *J. Inst. Eng. India Ser. C*, Bd. 93, Nr. 3, S. 269–274, Juli 2012, doi: 10.1007/s40032-012-0032-2.
- [13] International Organisation for Standardisation, „ISO 4406 Hydraulic fluid power - Fluids - Methods for coding the level of contamination by solid particles“. Januar 2021.
- [14] F. Hackländer, Astrid, „FuG Elektronik – Global Player in einer spannungsführenden Welt“, *OELCHECKER - eine Zeitschrift der OELCHECK GmbH*, S. 4–6, 2019.
- [15] D. Schulz, „Bauteilsauberkeit — prozesssicher und wirtschaftlich“, *J Oberfl Techn*, Bd. 54, Nr. 9, S. 68–71, Sep. 2014, doi: 10.1365/s35144-014-0530-5.
- [16] „Technische Sauberkeit in der Elektrotechnik (Leitfaden, 2. Auflage)“, ZVEI: Die Elektroindustrie, Frankfurt am Main, 2018. Zugegriffen: 23. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.zvei.org/presse-medien/publikationen/technische-sauberkeit-in-der-elektrotechnik-leitfaden-2-auflage>

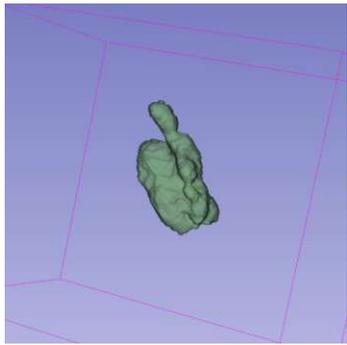
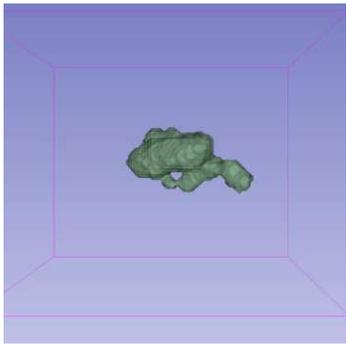
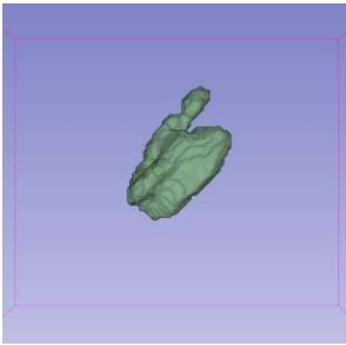
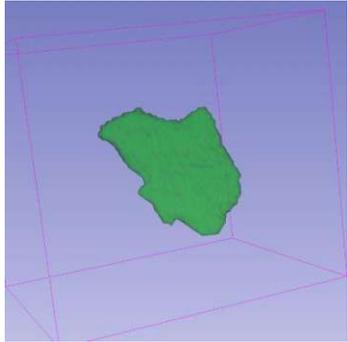
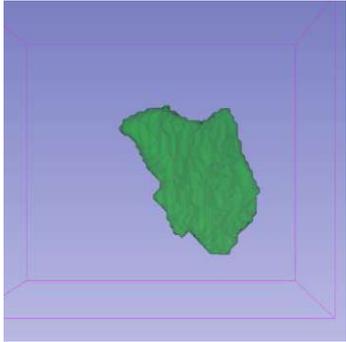
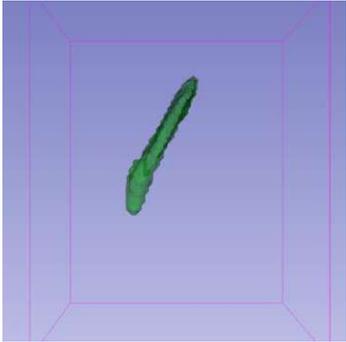
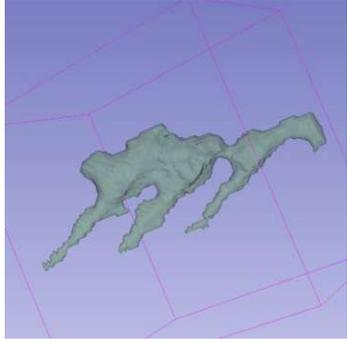
- [17] S. Krottil, „Technische Sauberkeit in der additiven Fertigung“, *J Oberfl Techn*, Bd. 59, Nr. 11, S. 52–55, Nov. 2019, doi: 10.1007/s35144-019-0402-0.
- [18] Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA), Hrsg., „VDA 19.1 Prüfung der Technischen Sauberkeit - Partikelverunreinigung funktionsrelevanter Automobilteile“. 2015. Zugegriffen: 23. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://technische-sauberkeit-support.de/technische-sauberkeit-audits/iso-16232-vda-19.1>
- [19] International Organisation for Standardisation (IOS), Hrsg., „ISO 16232 Road vehicles - Cleanliness of components and systems“. 2018. Zugegriffen: 23. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.beuth.de/de/norm/iso-16232/300157067>
- [20] Rochowicz, Markus, „Erstellung von Sauberkeitsgrenzwerten“, *JOT Journal für Oberflächentechnik*, Bd. 54, S. 58–61, 2014.
- [21] HYDAC Filtertechnik GmbH, „Sauberkeitsfibel - Technische Sauberkeit von Bauteilen und Systemen“. 2009. Zugegriffen: 30. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hydac.com/shop/de-de/catalogsearch/result?q=sauberkeitsfibel>
- [22] „Identifizierung metallischer Partikel | RJL Micro & Analytic“, 10. Juli 2018. <https://www.rjl-microanalytic.de/fehlerhafte-detektion-metallischer-partikel-durch-lichtmikroskopie/> (zugegriffen 20. April 2023).
- [23] „A numerical study of particle-laden flow around an obstacle: flow evolution and Stokes number effects | Elsevier Enhanced Reader“. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0307904X21004959?token=07578AC51E1474717D269748CB5AFBB1A0A2701D889185AD4E0E9753C86A0BF46AB9E71E032F1ADFF1C43FA8C6BC64A&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230427073624> (zugegriffen 27. April 2023).
- [24] Otto Bock Healthcare Products, „Prüfrichtlinie MDR-17422 - Test: Vorbringerkraft“.
- [25] Otto Bock Healthcare Products, „Prüfrichtlinie MDR-17421 - Test: Grundreibung“.
- [26] Otto Bock Healthcare Products, „Prüfprotokoll. Hydraulikcharakterisierung DOA & Entwicklungsgelenk Fuchs“.
- [27] Otto Bock Healthcare Products, „Prüfrichtlinie MDR-13537 - Test: Dämpfungsverhalten bei Geschwindigkeiten“.
- [28] Otto Bock Healthcare Products, „Prüfrichtlinie MDR-13532 - Test: Innere Dichtheit Hydraulik“.
- [29] Otto Bock Healthcare Products, „Prüfrichtlinie MDR-16293 - Test: Lebensdauer Ausgleichsbehälter“.

# Anhang

## A) Mikrotomographische Auswertung:

Vermessung der segmentierten Partikel			
Partikel	Länge [ $\mu\text{m}$ ]	Breite [ $\mu\text{m}$ ]	Tiefe [ $\mu\text{m}$ ]
1	94,3	83,55	132,9
2	61,7	58,1	73,5
3	39,7	43,7	35,8
4	69,6	79,7	65
5	kein einzelnes Partikel		
6	kein einzelnes Partikel		
7	52,8	67,7	78,36
8	65,4	54,4	96,6
9	108,3	62,5	76,5
10	74,2	36,5	52,8
11	63,2	52,3	91,5
12	61,9	57,4	59,3
13	63,9	63,9	65,4
14	kein einzelnes Partikel		
15	61	64,2	72,3
16	kein einzelnes Partikel		
17	41,8	40,1	47,2
18	58,8	30,6	37,4
19	70,7	103,5	137
20	62,3	63,2	64,1
21	144,3	70,8	132,5
22	37	42,5	40,8
23	63,1	45,1	38,7
24	50,5	63,3	60,2
25	kein einzelnes Partikel		
26	kein einzelnes Partikel		
27	73,8	38,5	81,9
28	57	55,7	59,7

Partikel	3D-Modelle der segmentierten Partikel		
1			
5		→ kein einzelnes Partikel	
9			
11			

19			
21			
25		→ kein einzelnes Partikel	



## C) Datenblatt Kraftmessdose



### 2518/2525-100 Series Load Cells

Catalog number 2525-108/112

2518-100/101/102/103/107/111

#### Features

- Full-scale static rated capacities from  $\pm 5$  kN to  $\pm 200$  kN (500 kgf, 1,124 lbf to 20,000 kgf, 44, 960 lbf)  
Full-scale dynamic rated capacities from  $\pm 2.5$  kN to  $\pm 100$  kN (250 kgf, 562 lbf to 10,000 kgf, 2,248 lbf)
- Fatigue rated, designed with an annular shear stressed element, which provides true axial loads transfer, high stiffness that has resistance to side loads and bending moments.
- Compact low profile design frees up valuable vertical testing space
- Operates in tension, compression and reverse stress modes
- Auto recognition and electrical calibration
- Load cells are designed to withstand 150% of rated capacity
- Excellent linearity through tension and compression
- High axial and lateral stiffness
- All load cells comply with the highest applicable testing standards, including ISO DIS 7500/1, EN10002-2, BS1610 (1992) and JIS B7721, B7733

#### Description

Instron load cells are an integral part of the load weighing system of a testing machine. The proprietary design, manufacturing and quality control are done with customer applications in mind. They are certified in accordance with international standards especially for use in materials testing machines.

Interchangeability, along with transducer recognition and single point calibration makes them easy to use. System electronics provide overload protection by stopping the test at 105% of full scale output

They maintain high alignment and are resistant to offset loading throughout the test, even with large size specimens. The cells can withstand up to 150% of the rated capacity allowing the user to zero out the weight of the fixture up to 50% of the rated load cell capacity, and still maintain specified accuracy through the full range.

Instron load cells are tested for accuracy and repeatability on a calibration apparatus traceable to international standards, with an uncertainty of measurements not exceeding one third of the permissible error of the load cell. Accuracy has been found to be equal to or better than 0.025% of the load cell rated output or 0.25% of the indicated load, whichever is greater.



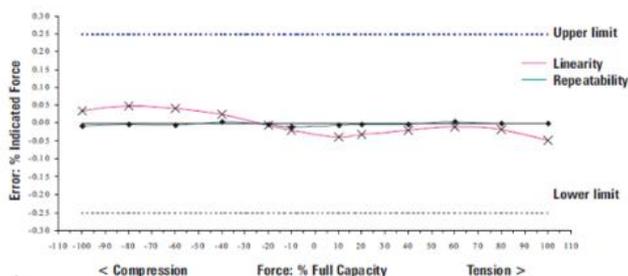
▲  
2525-100 Series load cell

#### Principle of Operation

Instron load cells are precision force transducers containing a full bridge of strain gauges bonded to internal load bearing structures. When mechanically stressed the electrical resistance changes on the gauges, thus changing the output signal. This signal is then conditioned for display readouts in accordance with international standards.

The load cell structure has high axial stiffness which reduces stored energy that can transfer to the specimen at break, giving false values. Increased lateral stiffness reduces measurement errors from off axis loading, commonly found when performing compression and flexural tests or where specimens fail by tearing.

These load cells are designed to perform tension, compression, and reverse stress modes, eliminating the need to change cells frequently.



▲  
Typical load cell calibration test results

## 2518/2525-100 Series Load Cells

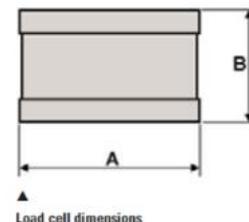
Catalog number 2525-108/112 2518-100/101/102/103/107/111

### Specifications

Catalog Number	Maximum Static Capacity	Maximum Dynamic Capacity	Mechanical Fitting (Frame)	Mechanical Fitting (Loadstring)	Mechanical Fitting (Central Thread)	Weight	Overall Diameter (A)	Effective Length (B)
2518-100	±100 kN (10,000 kgf, 22,480 lbf)	±50kN (5,000 kgf, 11,240 lbf)	M30 x 2 RH female end (type II)	6 x M10 on 100 PCD	M30 x 2 LH female end (type II)	8.5 kg (18.7 lb)	140 mm (5.5 in)	96 mm (3.8 in)
2518-101	±50 kN (5,000 kgf, 11,240 lbf)	±25kN (2,500 kgf, 562 lbf)	M30 x 2 RH female end (type II)	6 x M10 on 100 PCD	M30 x 2 LH female end (type II)	8.5 kg (18.7 lb)	140 mm (5.5 in)	96 mm (3.8 in)
2518-102	±20 kN (2,000 kgf, 4,496 lbf)	±10kN (1,000 kgf, 2,248 lbf)	M30 x 2 RH female end (type II)	6 x M10 on 100 PCD	M30 x 2 LH female end (type II)	8.5 kg (18.7 lb)	140 mm (5.5 in)	96 mm (3.8 in)
2518-103	±10 kN (1,000 kgf, 2,248 lbf)	±5kN (500 kgf, 1,124 lbf)	M30 x 2 RH female end (type II)	6 x M10 on 100 PCD	M30 x 2 LH female end (type II)	8.5 kg (18.7 lb)	140 mm (5.5 in)	96 mm (3.8 in)
2518-107	±30 kN (3,000 kgf, 6,744 lbf)	±15kN (1,500 kgf, 3,372 lbf)	M30 x 2 RH female end (type II)	6 x M10 on 100 PCD	M30 x 2 LH female end (type II)	8.5 kg (18.7 lb)	140 mm (5.5 in)	96 mm (3.8 in)
2525-108	±5 kN (500 kgf, 1,124 lbf)	Static rated only	M30 x 2 RH female end (type II)	6 x M10 on 100 PCD	M30 x 2 LH female end (type II)	8.5 kg (18.7 lb)	140 mm (5.5 in)	96 mm (3.8 in)
2518-111	±200 kN (20,000 kgf, 44,960 lbf)	±100kN (10,000 kgf, 22,480 lbf)	M48 x 2 RH female end (type III)	6 x M10 on 100 PCD 6 x M20 on 150 PCD	M48 x 2 LH female end (type II)	20 kg (44 lb)	210 mm (8.3 in)	170 mm (6.7 in)
2525-112	±150 kN (15,000 kgf, 33,720 lbf)	Static rated only	M48 x 2 RH female end (type III)	6 x M10 on 100 PCD 6 x M20 on 150 PCD	M48 x 2 LH female end (type II)	20 kg (44 lb)	210 mm (8.3 in)	170 mm (6.7 in)

### Load Cells General Performance

Linearity	< ±0.25% of reading over a range of 100% to 0.4% of load cell static rating
Repeatability	< ±0.25% of reading over a range of 100% to 0.4% of load cell static rating Zero error. The residual indicated force after removing a series of forces is not greater than ±0.05% full rated output.
Hysteresis	0.1% of full rated output
Zero Recovery	0.1% of reading over 3 minutes
Bridge Resistance	350 Ohms ±5%
Sensitivity	2 mV/V at full static rating
Zero Balance	< ±1% full rated output
Overload	150% static rating without permanent zero shift 300% static rating without mechanical failure
Deflection	0.15 mm at full static rating
Load Reversal Zero Shift	< ±0.50% full rated output (tension to compression)
Compensated Temperature Range	Temperature range 0 °C to 50 °C (32 °F to 122 °F)
Temperature Effect on Zero	< ±0.002% of full rated output per °C
Temperature Effect on Sensitivity	< ±0.002% of full rated output per °C



#### Notes:

- It is important to note that most other transducer manufacturers specify linearity of their load cells as a percentage of the full rated output (% FRO). This can be misleading when using lower ranges (e.g. 1% of capacity). A load cell rated at 0.05% FRO could show a reading error of 5% at this low point.



**Corporate Headquarters**  
100 Royall Street, Canton, Massachusetts 02021-1089, USA  
Tel: 800-564-8378 or 781-575-5000 Fax: 781-575-5751

**European Headquarters**  
Coronation Road, High Wycombe, Bucks HP12 3SY, United Kingdom  
Tel: +44 1494 464646 Fax: +44 1494 456123

[www.instron.com](http://www.instron.com)

Copyright © Instron 2003. All rights reserved.  
Instron is a registered trademark of Instron Corporation.  
Instron reserves the right to change specifications without notice.

2518/2525\_100\_rev1\_0803