

Alexander Langeder, BSc

# **Weiterentwicklung eines Prüfstandes zur Untersuchung der Wärmeübertragung von Wälzlagern**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Dipl.-Ing. Armin Buchroithner

Beurteiler

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Bader

Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik

# EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

## AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

---

Datum/Date

---

Unterschrift/Signature

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die mir während meiner Masterarbeit mit Rat und Tat zur Seite standen. Für die Betreuung und Unterstützung von universitärer Seite bedanke ich mich bei Herrn Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Bader und Herrn Dipl.-Ing. Armin Buchroithner, deren Überlegungen den Ausgangspunkt für diese Arbeit darstellten. Zum Gelingen der Arbeit hat nicht zuletzt auch die kollegiale und freundschaftliche Atmosphäre am Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik beigetragen. Hierfür möchte ich mich bei allen Mitarbeitern vom IME Institut recht herzlich bedanken.

Weiterer Dank gebührt meiner Familie im Besonderen meinen Eltern. Nur durch ihre stete moralische und finanzielle Unterstützung war es mir möglich, diese Arbeit und damit mein Studium erfolgreich abzuschließen. Vielen lieben Dank!

## Kurzfassung

Durch die Weiterentwicklung von Maschinenelementen, wie z.B.: Wälzlager können immer höherwertige und leistungsfähigere Maschinen realisiert werden. Das Kleiner-, Leichter- und Schnellerwerden führt allerdings auch zu einer Reihe von Problemen. So sind bei der beispielhaften Betrachtung eines Schwungradspeichers, die auftretenden Strömungsverluste bei einer schweren und langsam drehenden Scheibe mit einem hohen Energieinhalt vernachlässigbar klein. Wird diese Scheibe allerdings klein und schnelldrehend (um wieder den gleichen Energieinhalt zu erlangen) ausgeführt, so haben die auftretenden Strömungsverluste einen starken Einfluss auf die Selbstentladung, welcher nicht mehr außer Acht gelassen werden darf. Um diese Strömungsverluste zu minimieren laufen Schwungradspeicher üblicherweise im Vakuum, was allerdings den Abtransport der Verlustwärme erheblich erschwert.

Diese Überlegungen führen zur eigentlichen Thematik dieser Arbeit. Werden Wälzlager im Vakuum eingesetzt, so sind diese die einzige mechanische Verbindung zwischen Rotor und Gehäuse, was bedeutet, dass die ganze Wärme zwangsläufig über die Wälzlager fließen muss, da Wärmestrahlung und Konvektion vernachlässigbar klein sind (siehe Kapitel 3.1.4). Welchen Wärmeleitwert nun dieses Lager aufweist bzw. welche Faktoren einen Einfluss auf diesen haben wurde bisher nur unzureichend publiziert und soll mit Hilfe dieser Arbeit geklärt werden.

Hauptaufgabe dieser Diplomarbeit war die Neugestaltung eines bereits vorhandenen Prüfstandes zur Messung der Wärmeleitfähigkeit von Wälzlager. Das Grundkonzept des Prüfstands wurde bereits im Jahr 2013 erprobt, wobei einige Schwierigkeiten betreffend Maschinendynamik, thermisches Verhalten und Praktikabilität des Prüfablaufs festgestellt wurden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Ausgangssituation detailliert analysiert, das Verbesserungspotential erhoben, Konzepte aus den gewonnen Erkenntnissen abgeleitet und ein vollständiges CAD-Modell des Aufbaus erarbeitet. Nachfolgend wurden die theoretische Arbeit und Simulationen in die Praxis umgesetzt und der Prüfstand gefertigt, aufgebaut und in Betrieb genommen. Abschließend wurden die Erkenntnisse des Aufbaus, sowie etwaige Verbesserungsvorschläge protokolliert.

## **Abstract**

Constant evolution and improvement of machine elements such as rolling element bearings has enabled the design of high performance machines. However, this striving for “better, lighter, and faster” sometimes also implicates problems at system level.

As an example a flywheel energy storage system is considered. In order to achieve high energy densities, high rotational speeds are necessary. Consequently a vacuum chamber is necessary to reduce windage losses and self-discharge. The absence of atmospheric pressure but leads to thermal issues since all the waste heat from the rotor can now only be transported across the bearings.

Thermal properties of rolling element bearings have not been found in scientific literature in satisfactory detail. Also, the dependency on parameters such as bearing pre-stress, grease filling and rotational speed have not been published.

This master thesis deals with the revision and redesign of an existing test bench for measuring the thermal conductivity of rolling element bearings. In 2013 the basic concept was already put in operation but some difficulties regarding rotor dynamics, thermal behavior and work flow occurred which needed to be solved.

Based on the analyses of the initial situation and potential for improvement, concepts were created and a CAD-model was designed. After that, the theoretical work and the simulations were used to manufacture all components and realize the design. Finally the test bench was put into operation whereby all findings and some possible further improvements were documented and are described in detail.

# Inhaltsverzeichnis

Danksagung .....	II
Kurzfassung .....	III
Abstract .....	IV
1. Einleitung.....	- 1 -
1.1. Motivation .....	- 1 -
1.2. Aufgabenstellung.....	- 1 -
1.3. Vorgehensweise .....	- 2 -
1.4. Zielsetzung.....	- 3 -
2. Entstehung und Nutzen des Wärmeleitprüfstands.....	- 4 -
2.1. Grundlage Wärmeleitwertermittlung .....	- 4 -
2.2. Historische Entwicklung und aktuelle Anwendungen.....	- 5 -
3. Einflussgrößen auf die Wärmeleitung eines Wälzlagers.....	- 8 -
3.1. Betrachtete Größen.....	- 8 -
3.1.1. Drehzahl.....	- 8 -
3.1.2. Vorspannung.....	- 9 -
3.1.3. Umgebungsdruck.....	- 9 -
3.1.4. Temperatur .....	- 10 -
3.1.5. Schmierung .....	- 10 -
3.1.6. Material.....	- 11 -
4. Entwicklung und Auswahl eines Prüfstandkonzepts.....	- 13 -
4.1. Analyse der Ausgangssituation .....	- 13 -
4.2. Anforderungen an das überarbeitete Konzept .....	- 18 -
4.3. Abgeleitete Konzepte .....	- 21 -
4.3.1. Konzept 1 .....	- 21 -
4.3.2. Konzept 2 .....	- 24 -
4.3.3. Konzept 3 .....	- 26 -
4.3.4. Konzept 4 .....	- 28 -
4.3.5. Ausgewähltes Konzept.....	- 31 -
5. Vorauslegung und Simulation .....	- 32 -
5.1. Maschinendynamische Betrachtungsweise .....	- 32 -

---

5.2.	Lagerauslegung.....	- 37 -
6.	Messmethode und Messanordnung .....	- 42 -
6.1.	Analyse der ursprünglichen Messmethode .....	- 42 -
6.2.	Verbessertes Messkonzept .....	- 44 -
7.	CAD – Konstruktion und Optimierung.....	- 49 -
8.	Entwicklung einer Induktionsheizung .....	- 63 -
8.1.	Analyse der Ausgangssituation .....	- 63 -
8.2.	Anforderungen an die überarbeitete Version der Heizung .....	- 64 -
8.3.	Abgeleitetes Konzept .....	- 64 -
8.4.	CAD-Konstruktion des ausgewählten Konzepts.....	- 68 -
9.	Fertigung und Zusammenbau des Prüfstandes.....	- 70 -
9.1.	Fertigung der Induktionsheizung .....	- 70 -
9.2.	Bearbeitung der Vakuumkammer .....	- 74 -
9.3.	Fertigung der Stromdurchführungen .....	- 75 -
9.4.	Fertigung des Kühlsystems.....	- 76 -
9.5.	Aufbau / Zusammenbau des Prüfstandes.....	- 77 -
10.	Sensorik und Berechnung des thermischen Modells.....	- 87 -
10.1.	Spezifikationen der Messsensorik .....	- 87 -
10.2.	Thermisches Modell und Berechnung des Wärmeleitwerts.....	- 90 -
10.3.	Messfehler .....	- 92 -
11.	Inbetriebnahme des Prüfstands.....	- 95 -
11.1.	Verwendete Netzgeräte und Leistungselektronik.....	- 95 -
11.2.	Durchführung erster Messungen .....	- 96 -
12.	Zusammenfassung und Ausblick .....	- 102 -
12.1.	Zusammenfassung .....	- 102 -
12.2.	Ausblick.....	- 103 -
13.	Literaturverzeichnis.....	- 104 -
14.	Abbildungsverzeichnis.....	- 106 -
15.	Tabellenverzeichnis .....	- 109 -
16.	Formelverzeichnis .....	- 110 -
17.	Anhang.....	- 111 -
17.1.	Lagerauslegung .....	- 111 -

---

17.2.	Glasfaserverstärkter Kunststoff .....	- 114 -
17.3.	Edelstahl 1.4301 .....	- 117 -
17.4.	Aluminiumlegierung 7075.....	- 119 -
17.5.	Klebstoff UHU plus Endfest 300 .....	- 120 -
17.6.	Epoxydharz L + Härter L .....	- 123 -
17.7.	Fertigungszeichnungen .....	- 126 -
17.7.1.	Hohlwelle.....	- 126 -
17.7.2.	Lagerschild_innen.....	- 127 -
17.7.3.	Lagerblock .....	- 128 -
17.7.4.	Lagerschild_oben.....	- 129 -
17.7.5.	Zweiteiliges Lagerschild_unten .....	- 130 -
17.8.	Spindellager-Bezeichnung Skf .....	- 131 -
17.9.	Spindellager 71908 CDGA/P4A .....	- 132 -
17.10.	SKF vakuumtaugliches Lagerfett .....	- 133 -
17.11.	Elektromotor (Spindel).....	- 135 -
17.12.	Magnetscheibenkupplung .....	- 137 -
17.13.	Drehschieberpumpe E2M2 .....	- 141 -
17.14.	Zahnrad-Wasserpumpe.....	- 144 -
17.15.	Pt-100 Widerstandsthermometer .....	- 145 -
17.16.	JUMO Typenblatt 90600 .....	- 148 -
17.17.	Analogeingangsmodule NI 9217 .....	- 150 -
17.18.	Pyrometer .....	- 153 -
17.19.	Drucksensor .....	- 155 -

---

## **1. Einleitung**

Dieses Kapitel beschreibt den chronologischen Ablauf dieser Diplomarbeit, beginnt mit der Motivation und endet mit der Beschreibung der erreichten Ziele und möglichen nächsten Schritten.

### **1.1. Motivation**

Durch ein Forschungsprojekt an der TU-Graz, welches sich mit dem Thema „Flywheel Energy Storage System, abgekürzt FESS“ (= einer alternativen Energiespeicherung im evakuierten Raum und unter hohen Drehzahlen) befasst, wurde festgestellt, dass die Thematik der Wärmeleitung von Wälzlager bisher kaum behandelt wurde. Aus diesem Grund gibt es nur sehr wenig Literatur über das Verhalten der Wälzlager unter derartigen Betriebsbedingungen.

In einem Hochvakuum herrschen besondere Verhältnisse die Wärmeübertragung betreffend. Durch die praktisch nicht vorhandene Gasatmosphäre gibt es keine nennenswerte Konvektion und der Wärmetransport durch Strahlung ist aufgrund geringer Temperaturdifferenzen meist vernachlässigbar klein. Somit erfolgt die Übertragung der Wärme beinahe ausschließlich durch Wärmeleitung über die Wälzlager.

Durch diese besonderen Beanspruchungen der Wälzlager und dem ungewissen Verhalten ist es schwer eine verlässliche Auslegung durchzuführen. Eine wissenschaftliche Untersuchung dieser Thematik ist daher naheliegend und notwendig für zahlreiche Anwendungen, welche in Kapitel 2 genauer erläutert werden.

### **1.2. Aufgabenstellung**

Die Aufgabe besteht darin, den bereits vorhandenen Wärmeleit-Prüfstand mit den bisher gewonnenen Erfahrungen aus den vorhergegangenen Arbeiten weiter zu entwickeln bzw. die dabei entstandenen Problematiken und Komplikationen auszumerzen. Erst beim tatsächlichen Aufbau des Prüfstands, wurde der zu geringe Spielraum, welcher durch teilweise fixierte Komponenten hervorgerufen wird, erkannt. Genauso kamen Störungen der Messsensorik erst bei den praktischen Versuchen zum Vorschein. Dies führte zu erschwerten und unflexiblen Prüfbedingungen.

Es wird nun mit der Umgestaltung der Konstruktion gestartet und zwar so, dass der ganze Prüfstand einen modularen Aufbau besitzt. Dies ist nötig, um ein Maximum an Flexibilität zu erlangen, indem einzelne Komponenten auf einfachste Art und Weise entfernt und wieder hinzugefügt werden können. Weiters sollen durch etwaige Änderungen des bisherigen

Messkonzepts die ungewollten Störeinflüsse weitgehend reduziert werden. Schlussendlich soll der Prüfstand in optimierter Form gebaut und in Betrieb genommen werden, sodass zukünftige Messungen von verschiedensten Wälzlagern, mit unterschiedlichen Bedingungen in einem automatisierten Prüfbetrieb durchgeführt werden können.

### **1.3. Vorgehensweise**

1. Der Erste Schritt ist das detaillierte Analysieren des ursprünglichen Prüfstands. Dazu gehört das Überprüfen der vorhandenen Prüfstandskomponenten auf ihre Funktionalität und das Begutachten des Gesamtaufbaus, sowie das Recherchieren und Durcharbeiten der vorangegangenen Bachelorarbeiten und der Masterarbeit. Siehe: (Kopeinig, 2012) (Riepan, 2013) (Haidl, 2014)
2. Mit den daraus gewonnenen Erkenntnissen werden Größen und Eigenschaften herausgearbeitet, welche die Gestaltung des Aufbaus wesentlich beeinflussen und somit mögliche Konzeptideen eingrenzen.
3. Als Nächstes folgt das Entwickeln eines Konzeptes, welches alle grundlegenden und später zusätzlich definierten Anforderungen in bestmöglicher Form erfüllt. Dies beinhaltet sowohl den Aufbau in konstruktiver Sicht, als auch den Aspekt der unkomplizierten Messung und Auswertung.
4. Mit einem erfolgreich entworfenen Konzept kann nun eine CAD-Konstruktion durchgeführt werden. Durch dies wird der Prüfstand digital dargestellt und es können Fehler und Probleme erkannt werden, welche anhand des ausgearbeiteten Konzepts alleine, nicht entdeckt werden könnten. Außerdem stellt eine solide CAD-Konstruktion die Basis für nachfolgende Fertigungszeichnungen dar.
5. Schlussendlich werden alle neu hinzugekommenen oder veränderten Komponenten gefertigt und der Prüfstand aufgebaut. Des Weiteren wird dieser auch auf seine Funktionalität überprüft, was durch die Inbetriebnahme und Adjustierung der Sensorik geschieht.

## **1.4. Zielsetzung**

Ziel dieser Diplomarbeit ist es ein Prüfstandskonzept zu entwickeln und zu fertigen, welches den Prüfablauf vereinfacht und alle bisher aufgetretenen Probleme behebt. Es soll ein einfaches Wechseln von Modulen, einzelnen Bauteilen und Sensoren möglich sein. Außerdem ist ein störungsfreier Prüfbetrieb (Betrieb mit geringem Rauschen des Messsignals) anzustreben, damit qualitativ hochwertige Messergebnisse bezüglich der Wärmeleitfähigkeit von Wälzlagern in Abhängigkeit von diversen Umgebungsparametern erzeugt werden können.

## 2. Entstehung und Nutzen des Wärmeleitprüfstands

In diesem Kapitel wird ein kurzer Überblick über den Nutzen dieses Prüfstands gegeben und warum es erforderlich ist die Wärmeleitwerte von Wälzlagern zu kennen.

### 2.1. Grundlage Wärmeleitwertermittlung

Zu Beginn ist zu erwähnen, dass es kaum oder nur sehr wenig wissenschaftliche Publikationen, Berichte oder Forschungsarbeiten gibt, welche das Thema der Wärmeleitung von Wälzlagern behandeln. Eine der wenigen veröffentlichten Quellen für Nachforschungen ist der Bericht „A Methodology for Measuring Thermal Properties of Bearings in Motion“, welcher sich mit dem Aufbau eines solchen Wärmeleitprüfstands befasst. (Takeuchi, et al., 2004)

Weiters ist es auch den diversen Herstellern von Wälzlagern nicht möglich exakte Angaben zu diesem Thema zu liefern. Bei Anfragen erhält man ungefähre Werte, welche sich jedoch in einem sehr großen Streubereich bewegen. So konnte der FESS Projektpartner *SKF Austrian GmbH* die Wärmeleitung nicht genauer als 0,5 bis 2W/mK schätzen. In Abbildung 1 sind die Ergebnisse einer thermischen Simulation zu sehen, welche von *SKF* durchgeführt wurde. (Buchroithner & Bader, IEEE, 2012)

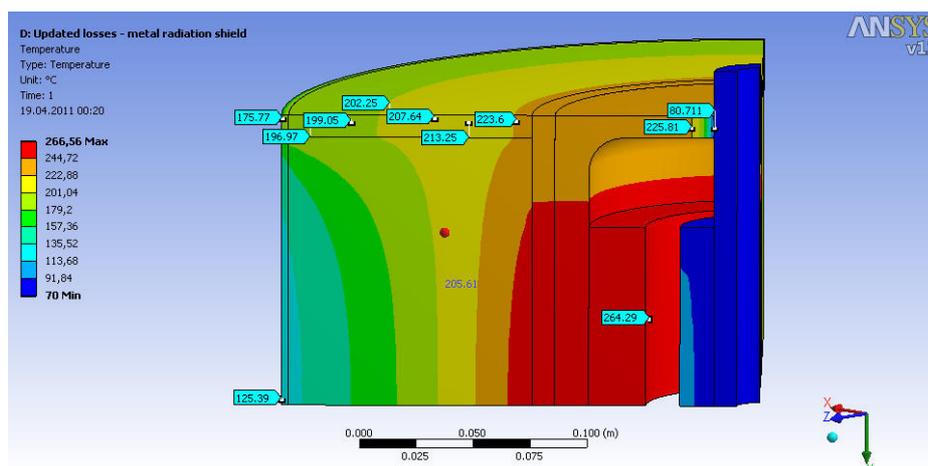


Abbildung 1: Thermische Simulation (Buchroithner & Bader, IEEE, 2012)

Angeht diese ungenauen Angaben ist es sehr schwer Projekte oder Konstruktionen konkret auszulegen, ohne einen Fehler zu machen. Es ist immer ein unbekannter Part

---

(Näheres dazu im folgenden Kapitel) vorhanden, welchen man versuchen kann aufwendig zu umgehen oder mittels Einrechnung von großzügig gewählten Sicherheiten zu neutralisieren. Dies steht allerdings oft im Gegensatz zum Prinzip einer einfachen und kostengünstigen Konstruktion.

Beim Überschreiten einer maximal zulässigen Betriebstemperatur einer Wälzlagerung kann durchaus auch mit Schädigungen, welche weitreichende Auswirkungen haben können, gerechnet werden. Angefangen von der Reduktion der Lebensdauer, über das Versagen der Schmierung, bis hin zu schweren mechanischen Schädigungen. Das Versagen der Lagerung hat im schlimmsten Fall fatale Auswirkungen auf das gesamte System und bedeutend wichtigere Komponenten (kostspieligere Komponenten wie z.B.: Magnetkupplung oder Antriebseinheit) laufen Gefahr, beschädigt zu werden. (Takeuchi, et al., 2004)

Diese Punkte zeigen die Wichtigkeit eines solchen Prüfstands auf. Die Wärmeleitung von Wälzlagern ist besonders unter extremen Betriebsbedingungen von großer Wichtigkeit. Dies ist dann der Fall, wenn die Konvektion und Wärmestrahlung umgebungsbedingt vernachlässigbar klein werden und die Wärme hauptsächlich über die Wärmeleitung übertragen wird. Dadurch wird eine unerwünscht hohe Erwärmung von einzelnen Komponenten, unter anderen auch der Wälzlager, erreicht.

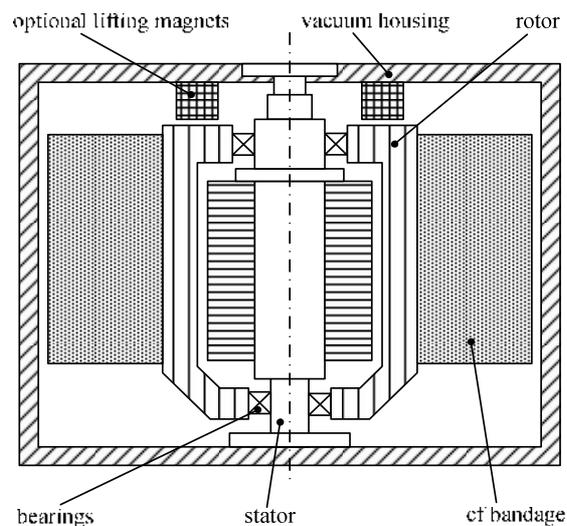
Ein Beispiel für solch extreme Betriebssituationen ist die Verwendung von Wälzlagern im Vakuum oder bei sehr geringen Umgebungsdrücken. Dies kann mehrere Gründe haben, so umgeht man zum Beispiel bei drehenden Bauteilen den Einfluss von Strömungen, welche der Grund für unerwünschte Verluste sind (beispielsweise die Selbstentladung bei FESS).

## **2.2. Historische Entwicklung und aktuelle Anwendungen**

Die ersten bahnbrechenden Grundlagen der Erforschung der Wärmeleitung von Wälzlagern stellten K. T. Stevens und M. J. Todd in den 1960er- und 1970er-Jahren auf. Sie erbrachten den Beweis der Drehzahlabhängigkeit des Wärmeleitverhaltens. Jedoch ist zu erwähnen, dass Ihre Versuche nur bis zu einer maximalen Drehzahl von 2.500 upm durchgeführt wurden. Durch den Fortschritt in der Lagerentwicklung unter anderem auch beim Einsatz von belastbaren Werkstoffen wie Keramik, spielen allerdings deutlich höhere Drehzahlen bereits eine Rolle und es werden Wälzlager eingesetzt, welche Drehzahlen über 20.000 upm aushalten. Y. R. Takeuchi erkannte dies und entwickelte einen Wärmeleitprüfstand, bei welchem Wälzlager mit Stahlkugeln verwendet werden und eine Drehzahl von bis zu 10.000 upm erreicht wird.

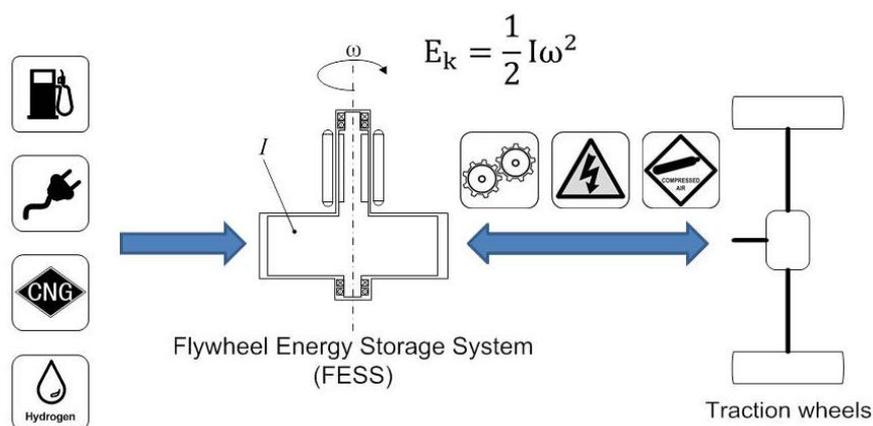
Der grundlegende Ausgangspunkt für die Entwicklung des Wärmeleitprüfstands von Takeuchi, war der kostengünstige und effektive Einsatz von rotierenden Komponenten im Weltraum (Vakuum). „*Thermal modeling is important in the cost effective design and development of rotational components in space.*“ (Takeuchi, et al., 2004, S. 3)

Ein konkretes Anwendungsbeispiel, bei welchem die Wärmeleitung von Wälzlagern eine entscheidende Rolle spielt, ist das Flywheel-Projekt am Institut für Maschinenelemente der TU-Graz. Hier wird versucht, Energie mittels einer drehenden Masse zu speichern. Abbildung 2 zeigt den Halbschnitt eines typischen Flywheel Energy Storage Systems (FESS).



**Abbildung 2: Halbschnitt eines typischen FESS (Buchroithner & Bader, 2012)**

Als Erstes wird Energie in rotatorische Energie umgewandelt welches durch das Antreiben einer Massescheibe (Flywheel) umgesetzt wird. Wenn nun die Energie wieder benötigt wird, kann die gespeicherte Rotationsenergie wieder verwendet werden. In Abbildung 3 ist eine schematische Darstellung des eben Erwähnten zu erkennen.



**Abbildung 3: FESS in einem Hybridfahrzeug (Buchroithner & Bader, 2012)**

Bei diesem Prinzip würden unter normalen, atmosphärischen Umständen viel zu große Verluste aufgrund von Strömungen auftreten und damit den Wirkungsgrad, welchen dieses System aufweist, sehr klein werden lassen. Aus wirtschaftlicher Sicht wäre der Nutzen daraus zu gering, was den Einsatz eines solchen Systems in Frage stellt. Aus den genannten Umständen wird ein evakuierter Raum genutzt. Hier reduzieren sich die wirkungsgradmindernden Strömungsverluste und der Nutzen des Systems ist größer.

Wie bereits erwähnt, findet nun die Wärmeübertragung nur noch durch Wärmeleitung statt. In einem System mit drehenden Teilen muss die Wärme nun zwangsläufig über die Lagerung, welche in diesem Fall eine Wälzlagerung ist, abfließen. Die Wärme entsteht durch auftretende Verluste (auch in evakuierter Umgebung). Die Frage ist nun, ob die Wärmeleitung über die Wälzlager einen relevanten Einfluss hat oder nicht. Wenn ja, müsste dies auf jeden Fall in der Auslegung berücksichtigt werden. Dies ist der ungewisse Part, welchen es zu untersuchen gilt.

Es gibt natürlich auch Konzepte, die beispielsweise eine magnetische Lagerung im Vakuum vorsehen und somit die Probleme der Wälzlager umgehen. Jedoch werden selbst hier Fanglager (üblicherweise Wälzlager) benötigt, welche bei einer Notfallabschaltung, bei verschiedenen Testläufen während der Entwicklung, sowie beim generellen Abschalten der Vorrichtung, die Funktion eines Lagers übernehmen und für den Schutz der magnetischen Lagerung sorgen. (Takeuchi, et al., 2004)

Der Grund für den Einsatz von Wälzlagern anstatt einer durchaus geeigneteren magnetischen Lagerung lässt sich mit den hohen Aufwendungen erklären. Magnetlager sind mit großen Anschaffungskosten und aufwendiger Regelungstechnik verbunden. Da jedoch das Prinzip einer „Low Cost“ Technologie verfolgt wird (in Ausblick einer Serienfertigung) sind solch hohe Aufwendungen nicht erstrebenswert und dadurch werden Wälzlager verwendet.

Ein weiterer wichtiger Einsatzbereich, an dessen Beispiel der Nutzen dieser Arbeit vor Augen geführt wird, sind alle Systeme bei denen eine genauere thermische Betrachtung vorgenommen werden soll. Sollen einzelne Komponenten eines Systems, oder gar das ganze System thermisch untersucht werden, so ist es nötig, von jedem einzelnen Bestandteil das thermische Verhalten zu kennen.

### 3. Einflussgrößen auf die Wärmeleitung eines Wälzlagers

Dieses Kapitel befasst sich mit den auftretenden Größen und Einflussfaktoren, welche das zu prüfende Lager beeinflussen. Die Frage ist nun, bei welchen Parametern es Sinn macht, diese zu variieren und welche zweitrangig sind.

#### 3.1. Betrachtete Größen

##### 3.1.1. Drehzahl

Die maximale Drehzahl wird zurzeit von den eingebauten Spindellagern (Anhang 17.9) bestimmt und ist laut Datenblatt auf ca. 20.000 upm, unter Einsatz einer Fettschmierung, begrenzt (= Komponente mit der niedrigsten, maximalen Drehzahl). Tabelle 1 gibt einen Überblick der maximalen Drehzahlen.

Komponente	max. Drehzahl
HSC Spindel	42.000 upm
Magnetscheibenkupplung	26.000 upm
Spindellager Skf 71908 CDGA/P4A	20.000 upm

Tabelle 1: Drehzahlübersicht

Eine der Hauptaufgaben dieses Prüfstands ist es zu untersuchen, welchen Einfluss unterschiedliche Drehzahlen auf die Wärmeleitung haben. Dadurch müssen die Drehzahl und somit auch die Antriebseinheit steuerbar sein. Eine Möglichkeit zur Automatisierung ist hier auf jeden Fall erstrebenswert, wie Abbildung 4 prinzipiell zeigt.

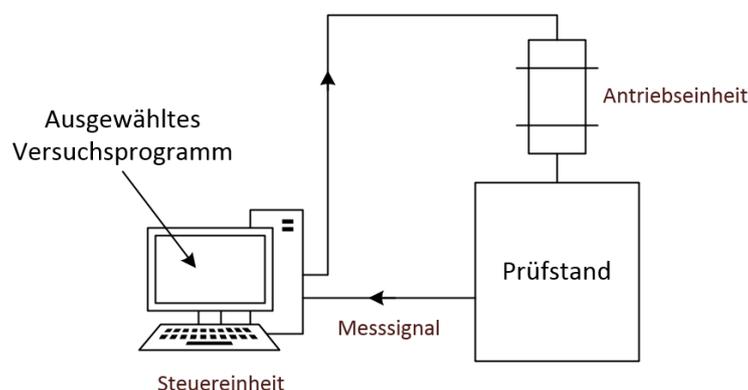


Abbildung 4: Automatisierung Drehzahl

### 3.1.2. Vorspannung

Die Vorspannung kann als Kraft definiert werden (Vorspannkraft) und hat einen signifikanten Einfluss auf das Verhalten eines Lagers. Durch Wahl der richtigen Vorspannung wird eine optimale Betriebssituation hinsichtlich Lebensdauer, erforderlicher Steifigkeit und Betriebssicherheit erreicht. Durch eine zu große Vorspannkraft wird das Lager verspannt, was zu unerwünscht hohen Verlusten führt. Wird die Vorspannkraft zu klein gewählt, so wird die Mindestbelastung nicht erreicht. Dies führt wiederum zu Lagerschäden durch Gleitbewegungen der Wälzkörper, da die Kugeln in diesem Fall nicht mehr richtig abwälzen. (SKF, 2015)

Ebenso unbekannt wie der Einfluss der Drehzahl auf die Wärmeleitfähigkeit, ist der Einfluss von unterschiedlichen Vorspannungen (bei unterschiedlichen Drehzahlen). Gibt es überhaupt eine messbare Veränderung durch Variation der Vorspannkraft? Zu diesem Zweck ist es sinnvoll vorerst einen „groben“ Prinzipversuch durchzuführen und gegebenenfalls später, mit vergleichsweise gleich geringem Aufwand, Versuche, mit der Möglichkeit der Feinjustierung durchzuführen. Das bedeutet, dass am Anfang große Unterschiede der Vorspannkraft von beispielsweise 50N und 500N (Abbildung 5) getestet werden und erst bei einer deutlich erkennbaren Veränderung kleinere Intervalle in Betracht gezogen werden.

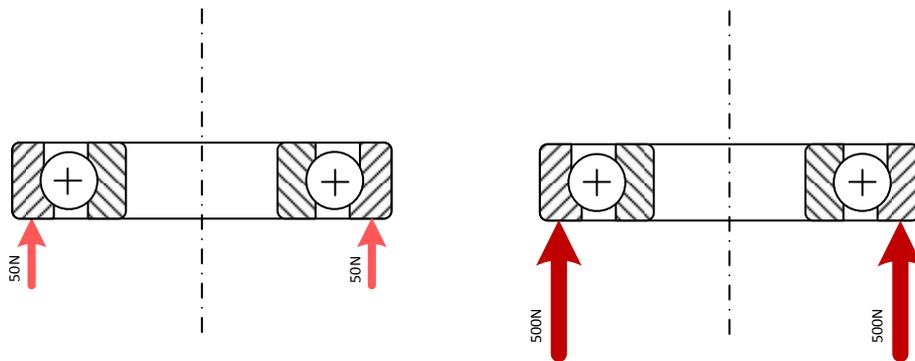


Abbildung 5: Veränderung der Vorspannkraft

### 3.1.3. Umgebungsdruck

Das Vakuum in der Kammer wird von einer Drehschieberpumpe E2M2 der Firma *Edwards* (Anhang 17.13) erzeugt. Der erreichte Druck ist von der Dichtheit (Leckage) und dem Ausgasen der Komponenten im Innenraum abhängig. Die vorhergegangenen Versuche haben gezeigt, dass sich ein Druck von ca. 0,1 mbar einstellt (bei laufender Pumpe).

Es soll der eingestellte Druck während eines Versuches möglichst konstant gehalten werden.

### **3.1.4. Temperatur**

Die Welle wird mittels einer Heizung aufgeheizt, sodass die Wärme über das zu testende Lager abfließen muss.

Hierbei treten 3 Wärmeübertragungsmechanismen auf:

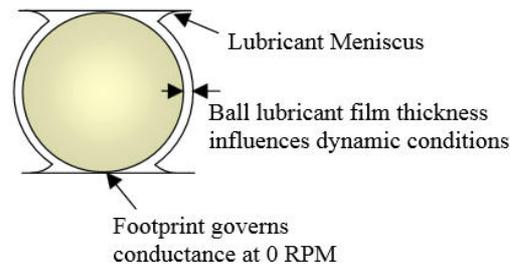
- In erster Linie tritt Wärmeleitung auf. Dieser Prozess wird als ein Wärmefluss in einem Festkörper (oder auch ruhendem Fluid) vom Wärmeren zum Kälteren (2. Hauptsatz) beschrieben.
- Bei der Konvektion spricht man von der Wärmeübertragung durch ein strömendes Fluid, dies kann sowohl eine Flüssigkeit als auch ein Gas sein. Da dieser Prüfstand allerdings im Vakuum betrieben wird, fällt die Komponente der Konvektion weg.
- Die dritte Übertragungsart ist die Wärmestrahlung. Hierbei wird die Energie mittels elektromagnetischer Strahlung übertragen und funktioniert nicht wie bei den beiden anderen Varianten durch Weitergabe von Energie an einen unmittelbaren Nachbarn. Das bedeutet allerdings, dass Wärmestrahlung auch im Vakuum von staten geht. In diesem Prüfstand wird die Wärmestrahlung trotzdem vernachlässigt, da zu geringe Temperaturunterschiede auftreten und nur eine kleine Fläche vorhanden ist. (Riepan, 2013)

Es soll auch das Verhalten bei verschiedenen hohen Temperaturen auf das Lager getestet werden, um diesen Einfluss ebenfalls bestimmen zu können.

### **3.1.5. Schmierung**

Die Aufgabe der Schmierung ist es Verschleiß und vorzeitige Ermüdung zu verhindern, indem ein Schmierfilm zwischen Wälzkörper und den Lagerringen ausgebildet wird. Die verwendeten Schmierverfahren sind die Fettschmierung, die Ölschmierung und die Feststoffschmierung. Genaueres dazu in der Masterarbeit von Herrn Haidl, Kapitel 2.2.3. (Haidl, 2014)

Im Stillstand wird die Wärme über die Hertz'sche Kontaktfläche und den Schmierfilm übertragen. Dies ändert sich allerdings, sobald das Lager sich zu drehen beginnt. Nun wird die Wärmeübertragung viel komplexer. Das Schmiermittel wird herausgedrückt und es bleibt nur ein dünner Schmierfilm übrig. (Takeuchi, et al., 2004)



**Abbildung 6: Schmierung der Kugel**

Verschiedenste Schmierstoffe zu testen ist auf jeden Fall ratsam, da das Verhalten von Öl, Fett und Feststoffen durchaus unterschiedlich ist. Außerdem wird der verwendete Schmierstoff noch zusätzlich in einer evakuierten Umgebung verwendet, was ebenso eine Veränderung des Verhaltens bewirkt. Der eingesetzten Schmiermittelmenge bedarf es ebenso einer Überprüfung, um auch diesen Einfluss zuordnen zu können.

### 3.1.6. Material

Unterschiedlichste Materialien haben verschiedene Wärmeleitwerte und übertragen die zugeführte Energie je nach Material verschiedenartig. So verwenden zum Beispiel Hybridlager im Gegensatz zu Standard-Wälzlagern, Keramikwälzkörper. Die nachfolgende Tabelle 2 zeigt physikalische und mechanische Eigenschaften von verschiedenen Materialien, welche in Wälzlagern verwendet werden.

Properties	Polycrystalline Diamond (PCD)	Tungsten Carbide	Steel (4140)	Silicon Nitride	Silicon Carbide
Coefficient of Friction	0.05-0.08**	0.2-0.25†	0.42‡	--	--
Thermal Conductivity (W/m*K)	543	70	42.6	30	85
Hardness (GPa, Knoop)	49.8	1.8	0.2	1.8	2.4
Compressive Strength (GPa)	6.9-7.6	2.68	--	--	2.5
Young's Modulus (GPa)	841	669-696	205	296	434
Tensile Strength (MPa)	1,300-1,600	334	415	520	500

**Tabelle 2: Physikalische und mechanische Eigenschaften von Lager-Materialien (US Synthetic Bearings, 2014)**

Durch den Einsatz verschiedener Lagertypen, kann erstens geprüft werden ob unterschiedliche Materialien (beispielsweise Keramik-Wälzkörper: siehe Abbildung 7) einen

erwähnenswerten Einfluss auf die Wärmeleitung, im Vergleich zu Stahl-Wälzkörpern, haben und zweitens ob eine andere Bauform das Ergebnis verändert.



**Abbildung 7: Hybridlager (SKF, 2015)**

## 4. Entwicklung und Auswahl eines Prüfstandkonzepts

Dieses Kapitel befasst sich mit der Analyse des vorhandenen Prüfstands, dem Ableiten der erforderlichen Anforderungen sowie dem Entwickeln und Auswählen eines Konzepts bis hin zur Konstruktion.

### 4.1. Analyse der Ausgangssituation

Mit dem Projekt „Wärmeleitprüfstand von Wälzlagern im Vakuum“ wurde am Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik der TU Graz begonnen. Die Basis dafür schufen die Bachelorarbeiten von Herrn Florian Kopeinig und Herrn Stefan Riepan (Kopeinig, 2012) (Riepan, 2013). Sie entwickelten das grundlegende Modell eines solchen Prüfstandes und begannen mit der mechanischen Fertigung. Herr Peter Haidl optimierte, im Zuge seiner Masterarbeit, den bis zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Prüfstand, stellte die Magnetkupplung fertig und nahm ihn zum ersten Mal in Betrieb (Haidl, 2014). Im nachfolgenden Bild ist das erste, verwirklichte Konzept zu sehen.

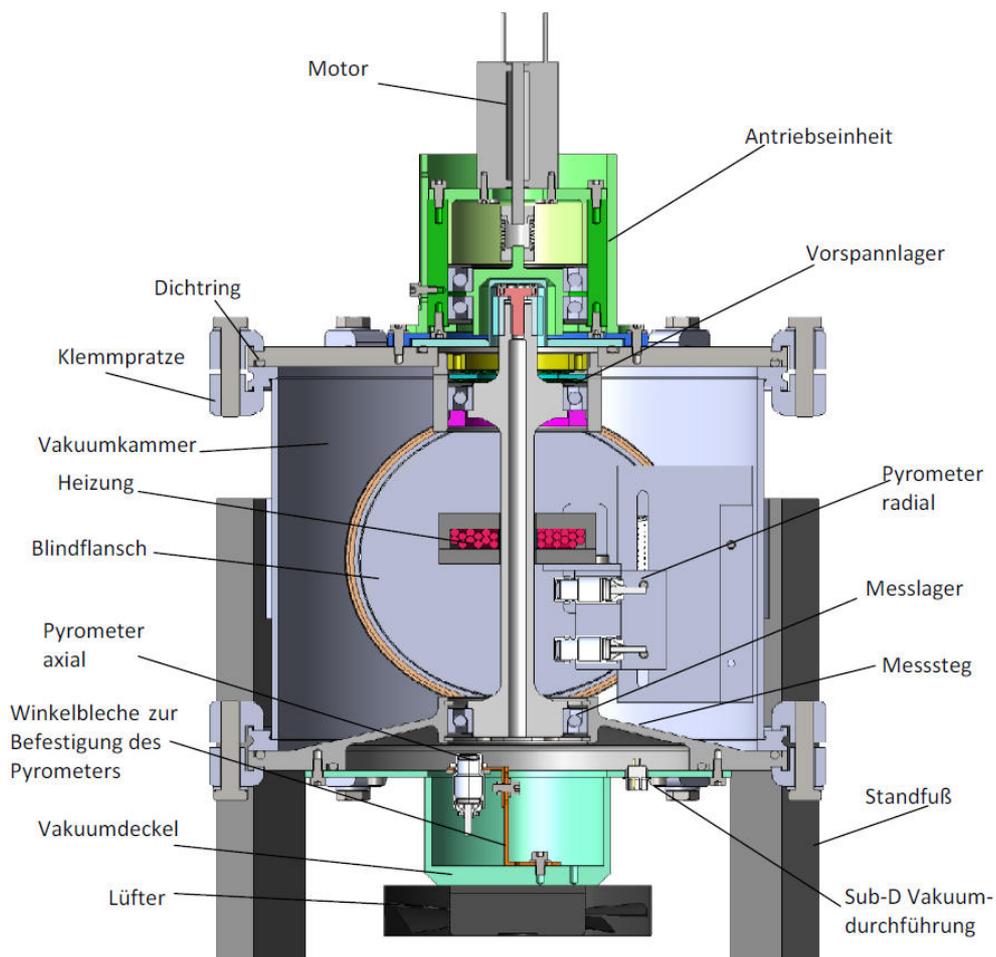


Abbildung 8: Erstes verwirklichtes Konzept des Prüfstands (Kopeinig, 2012, S. 54)

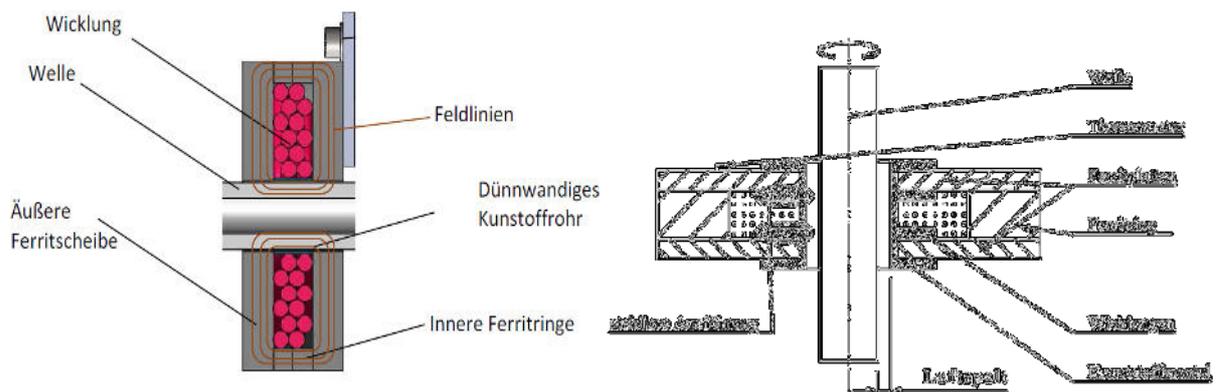
Durch diese Arbeiten wurden folgende Grundelemente des Prüfstands festgelegt, welche in weiterer Folge (zum Teil in einer etwas abgeänderten Form) in dem aktuellen Prüfstand verwendet werden.

**Vakuumkammer:** Ist eine aus nichtrostendem Edelstahl 1.4301, fremdgefertigte (*Pfeiffer Vacuum*) und vakuumdichte Kammer. Laut Hersteller ist sie bis in den Hochvakuumbereich einsetzbar. Die Deckel werden mittels Dichtungen, Zentrierringen und Klemmen befestigt. Abbildung 9 zeigt diese Vakuumkammer.



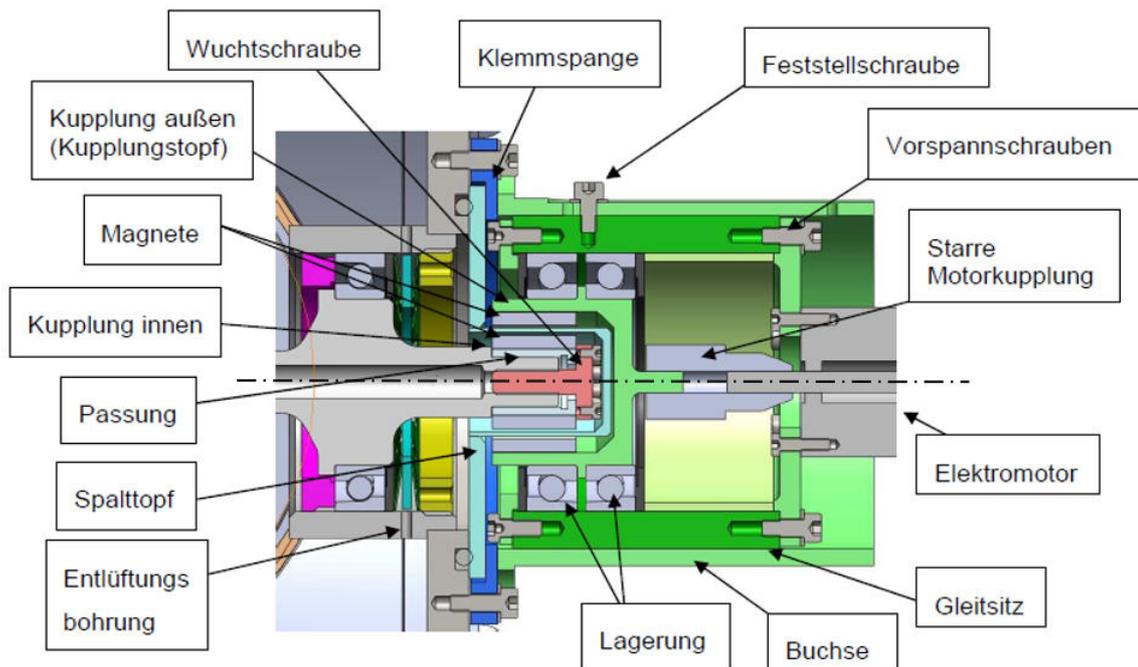
**Abbildung 9: Vakuumkammer**

**Induktionsheizung:** In der nachfolgenden Abbildung 10 sind das Prinzip und die erste verwirklichte Version der entwickelten Induktionsheizung zu sehen. Näheres dazu in Kapitel 8.



**Abbildung 10: Prinzip Induktionsheizung (Kopeinig, 2012, S. 44f) und Version 1 (Haidl, 2014, S. 62)**

**Magnetkupplung:** Die Magnetkupplung wurde selbst entwickelt, gebaut und in Betrieb genommen. Es gab jedoch einige Probleme mit der Klebeverbindung der Magnete, sowie der Zentrierung. Siehe Abbildung 11.



**Abbildung 11: Magnetkupplung Version 1 (Riepan, 2013, S. 46)**

Durch detailliertes Analysieren des Zusammenbauvorgangs, der Konstruktion und der durchgeführten Versuchsabläufe (nach der Übernahme des Prüfstands) wurden folgende Probleme bzw. Komplikationen festgestellt. Zur besseren Übersicht werden mehrere Teilbereiche eingeführt.

### **1. Magnetkupplung und Antriebseinheit**

Als Antriebseinheit waren zwei verschiedene Motoren im Einsatz. Einerseits ein wassergekühlter Modellbau-Synchronmotor, welcher für den hohen Drehzahlbereich verwendet wurde (Drehzahlbereich 5.000-15.000 upm) und andererseits ein Schrittmotor welcher den Einsatz bei den niedrigen Drehzahlen zu leisten hatte (Drehzahlbereich <5.000 upm). Die aufgezeichneten Messungen zeigten außerdem, dass der Wärmeleitwert im niedrigen Drehzahlbereich (0 – 100 upm) keiner genaueren Auflösung bedarf. Genaueres zu den verwendeten Motoren und der Kupplung in der Masterarbeit von Herrn Haidl. (Haidl, 2014)

Die verwendete Magnetkupplung wies nach den ersten Testläufen einige schwerwiegende Probleme hinsichtlich Betriebstemperatur auf. Die benutzten Magnete wurden auf die Welle bzw. auf das Gegenstück geklebt. Durch eine unzulässig hohe Erwärmung der Klebeverbindung und unter dem Einfluss der Fliehkraft lösten sich einige Magnete bei einer Drehzahl von ca. 15.000 upm und verursachten eine Schädigung der Kupplung sowie des Prüfstands. Abbildung 12 zeigt den Schaden am Innenläufer. Der Magnet haftet ausschließlich infolge des Magnetismus an der Welle.



**Abbildung 12: Versagen der Magnetkupplung**

### **2. Heizungssystem**

Die eingebaute Induktionsheizung funktionierte bei den einzelnen Versuchen einwandfrei, jedoch führte die konstruktive Ausführung zu einigen Problemen hinsichtlich Adaptierbarkeit des Prüfstands. Die Heizung wurde nach dem Einbau der Welle in der Vakuumkammer gewickelt und fixiert. Dies hatte zur Folge, dass weder die Welle noch die Heizung selbst aus der Kammer herausgenommen werden konnten, ohne die Heizung zu zerstören bzw. komplett abzuwickeln. Es ist allerdings sehr wichtig, dass hier eine gewisse Flexibilität gewahrt wird, damit man verschiedenste Umbauarbeiten bezüglich des zu testenden Lagers vornehmen kann. Ein anderer wichtiger Punkt ist der benötigte Platzbedarf der Heizung. Es stellte sich als äußerst schwierig heraus, Einstellungen und Adjustierungen der Sensoren und Temperaturfühler durchzuführen, da die Induktionsheizung den frei zugänglichen Raum in der Vakuumkammer blockierte.

### **3. Messsystem**

Die Messung erfolgte mittels berührungsloser Pyrometer und berührender Pt-1000 Widerstandsthermometer. Die Signale der Pyrometer wurden mit der am IME vorhandenen Hardware (Anhang 17.18) ausgewertet und die Signale der Widerstandsthermometer mittels einer selbst gebauten Brückenschaltung weiterverarbeitet und ausgewertet. Das Problem hierbei sind die Störeinflüsse welche auf das Messsystem wirken. Erstens wurden keine geschirmten Leitungen verwendet. Durch die Induktionsheizung werden hochfrequente Störsignale induziert, was ein starkes Rauschen zur Folge hat. Dadurch musste die Heizung immer abgeschaltet werden, wenn eine Messung durchgeführt wurde. Zweitens ist die Platine auf der sich die selbstgebaute Schaltung (siehe Kapitel 6.1) befindet viel zu eng und unübersichtlich gestaltet, was wiederum zu Komplikationen führte. Näheres dazu in Kapitel 6.1.

## 4.2. Anforderungen an das überarbeitete Konzept

Der nächste Schritt nach der ausführlichen Analyse des vorhandenen Prüfstands, ist nun die Erarbeitung eines Konzepts, welches die erkannten Probleme und Komplikationen behebt und ebenso etwaige weitere Verbesserungen enthält. Die nachfolgende Tabelle 3 zeigt zum Zweck der Übersichtlichkeit die analysierten Anforderungen an den Prüfablauf und die davon abgeleiteten Anforderungen an die mechanischen Komponenten. Anschließend wird auf die Komponenten genauer eingegangen und dazu der Prüfstand wieder in mehrere Teilbereiche unterteilt.

<b>Anforderungen an den Prüfablauf:</b>	
→	Automatisierte Datenerfassung
→	Automatisierte Drehzahlsteuerung
→	Automatisierte Parametersteuerung
	Abgeleitete Anforderungen
<b>Anforderungen an die mechanischen Komponenten:</b>	
→	Funktionierende/problemlose Kupplung
→	Motor welcher den gewünschten Drehzahlbereich abdeckt
→	maschinendynamisch vorteilhaft gestaltete Lageraufhängung
→	Verwendung geeigneter Materialien (aus thermischer- u. mechanischer Sicht)

**Tabelle 3: Abgeleitete Anforderungen**

### 1. Magnetkupplung und Antriebseinheit

Um den praktischen Versuchsablauf zu verbessern ist es vorteilhaft den gesamten, geforderten Drehzahlbereich mit nur einer Antriebseinheit abzudecken. In einem anderen Prüfstand, dem Berstprüfstand (Burgholzer, 2014) ist eine HSC Spindel der Firma *Mechatron* (Datenblatt im Anhang 17.10) im Einsatz. Mehrere Inbetriebnahmen brachten die Erfahrung, dass solch eine Spindel eine sehr zuverlässige Leistung erbringt und daher wurde sie als geeignete Antriebseinheit ausgewählt.

Mit dieser Spindel wurden im Zuge vergangener Projekte bereits Erfahrungen gesammelt, was dazu führt, dass etwaige „Anfangsprobleme“ bereits bekannt sind. Abbildung 13 zeigt die beschriebene HSC Spindel.



**Abbildung 13: HSC – Spindel (Mechatron GmbH , 2015)**

Da bei der bisher verwendeten Magnetkupplung schwerwiegende Probleme aufgetreten sind, wurde beschlossen eine Kupplung von einem externen Hersteller zuzukaufen. Als erstes wurde eine Magnetkupplung mit Spalttopf (Abbildung 14) ins Auge gefasst. Eine ähnliche Kupplung ist auch bereits im Berstprüfstand in Verwendung.



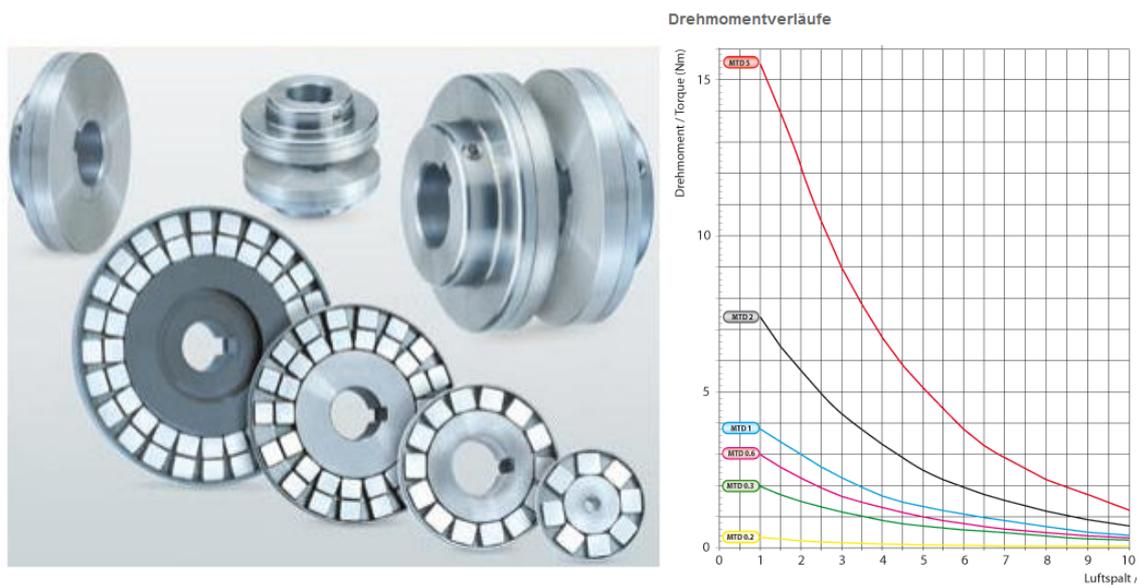
**Abbildung 14: Magnetkupplung mit Spalttopf (DST Magnetic Couplings, 2015)**

Nach einem Versuch den Berstprüfstand in einem höheren Drehzahlbereich zu betreiben, wurde die Kupplung zerstört, da die Resonanz nicht durchfahren werden konnte. Die Magnetkupplung – Spindel Kombination erreichte bei ca. 16.000 upm eine unüberwindbare Eigenform welche durch extrem hohe Schwingungsamplituden zu dem erwähnten Schaden führte. Dies führt zu der Erkenntnis, dass entweder die Verbindung zwischen Kupplungsaußenrotor und Spindel überarbeitet werden muss, oder eine andere Kupplungsvariante eingesetzt wird. Näheres zur maschinendynamischen Betrachtung im Kapitel 5.1.

Es wurde aus mehreren Gründen gegen dieses Magnetkupplungsmodells entschieden.

- Aufwendiges Umkonstruieren der Verbindung
- Allgemein sehr teure Kupplung
- Mehrkosten für eine neue Kupplung mit den notwendigen Spezifikationen

Die nun verwendete Kupplung ist eine Magnetscheibenkupplung mit der Bezeichnung MTD-0.3 der Firma *Mobac* (Abbildung 15, Anhang 17.12). Sie ist um einiges kompakter und kräftiger vor allem nicht so stark aus wie die Variante des Berstprüfstands. Durch die zusätzlich geringe Masse ergibt sich ein deutlicher Vorteil hinsichtlich der biegekritischen Drehzahl.



**Abbildung 15: Magnetscheibenkupplung & Drehmomentverlauf (Mobac GmbH, 2015)**

Im Vergleich zur Magnetkupplung mit Spalttopf weist diese ein etwas geringeres, übertragbares Drehmoment auf, welches mit dem Luftspalt variiert (siehe Abbildung 15). Das gelieferte Moment von ca. 1,5 Nm bei einem Luftspalt von 2,5 mm ist allerdings ausreichend für die geforderte Anwendung. (Mobac GmbH, 2015)

## 2. Heizungssystem

Gefordert ist ein kompaktes „Heizmodulsystem“ welches ohne großen Aufwand, komplett entfernt werden kann um somit den benötigten Platzbedarf für anfallende Adjustierung und Bauteilwechsel zu garantieren. Um ein einfaches Ein- und Ausbauen der Welle bzw. der Heizung zu gewährleisten, ist es nötig die Konstruktion dementsprechend zu verändern. Trotzdem soll die bisher erreichte maximale Heizleistung weiterhin gegeben sein. Näheres zur Umgestaltung der Induktionsheizung in Kapitel 8.

### **3. Messsystem**

Die Anforderungen an das Messsystem sind klar erkennbar. Es soll möglich sein einen Versuchsablauf durchzuführen, ohne die Induktionsheizung dabei abstellen zu müssen und vor allem ohne, dass die Messung durch eine induzierte Spannung beeinflusst und somit verfälscht wird. Dies ist nur erreichbar, wenn das Messsystem grundlegend verändert wird. Näheres dazu im Kapitel 6.

### **4. Weitere Anforderungen an das Konzept**

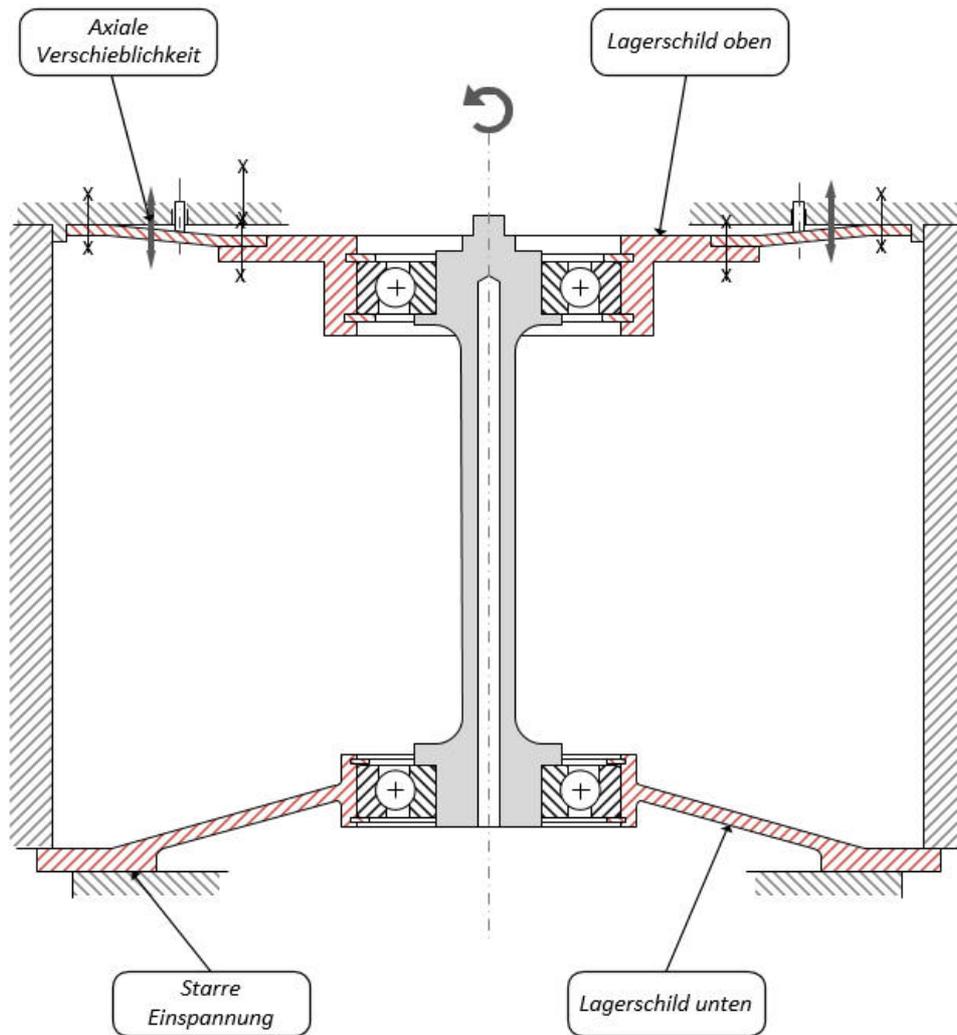
Ein weiterer Punkt ist die Vorspannung der Lager bzw. der Einfluss verschiedener axialer Kräfte auf das Wärmeverhalten des zu testenden Lagers. Wie Peter Haidl in seiner Masterarbeit (Haidl, 2014) erwähnt, ist es sehr schwer den Einfluss abzuschätzen, geschweige denn, genaue Aussagen darüber zu treffen. Da auch keine Literatur vorhanden ist, welche auf diese Situation eingeht, ist es zwingend notwendig Versuche mit unterschiedlicher Vorspannung durchzuführen und damit eine konkrete Aussage über den Einfluss treffen zu können. Verschiedene Ansätze dazu werden im nachfolgenden Punkt behandelt (Kapitel 4.3).

## **4.3. Abgeleitete Konzepte**

Nachdem die Ausgangssituation gründlich analysiert und die Anforderungen an das neue Konzept klar erarbeitet wurden, ist der nächste Schritt nun die Entwicklung eines Konzepts, welches jede der geforderten Aufgaben erfüllen kann.

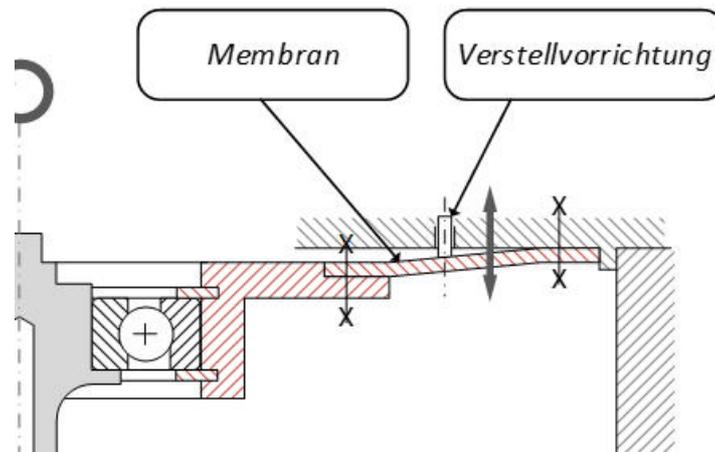
### **4.3.1. Konzept 1**

Bei dieser Variante wird versucht die vorhandenen Elemente, wie *Lagerschild oben* und *unten* (vergleiche Abbildung 16) vom ursprünglichen Prüfstand, nur leicht zu modifizieren und entsprechend zu adaptieren. Auch die bisher verwendete Lagersituation wird beibehalten. Wie in Abbildung 16 zu sehen ist, ist der *Messflansch (Lagerschild unten)* starr mit dem Gehäuse verbunden und so ausgelegt, dass eine möglichst steife Konstruktion entsteht. Hier werden auch die Messungen mittels Widerstandsthermometer durchgeführt.



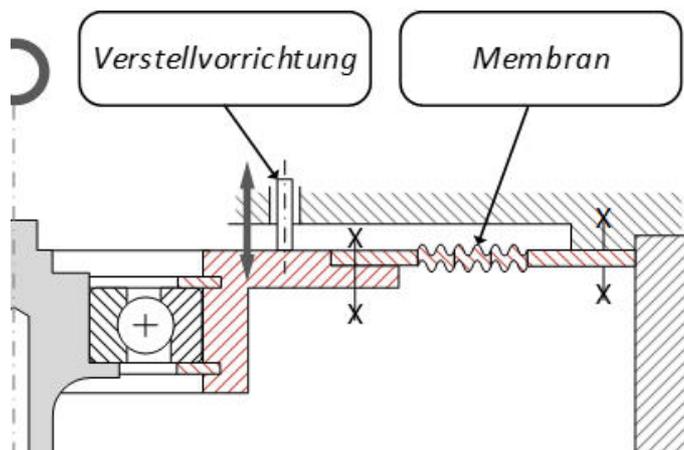
**Abbildung 16: Konzept 1**

Um die Vorspannung der Lager verändern zu können, wird das *Lagerschild oben* umgebaut. Die ursprünglich ebenfalls starre Konstruktion wird geteilt und eine Membran hinzugefügt. Die Membran ist eine ringförmige Scheibe, welche, im Vergleich zur Dicke des restlichen Lagerschilds, sehr dünn und somit nachgiebig ist. Durch eine Verstellvorrichtung (Stellschraube, beweglicher Bolzen,...) wird eine Kraft auf die Membran ausgeübt, was schließlich zu einer Veränderung der Vorspannkraft führt. In Abbildung 17 ist die Detailansicht des umkonstruierten *Lagerschilds oben* zu sehen.



**Abbildung 17: Detail 1 (Konzept 1)**

Die Charakteristik dieser Vorrichtung kann auch noch durch Verwendung unterschiedlicher Membrane beeinflusst werden. Zum einen muss es kein vollständiger Kreisring sein, sondern kann durchaus Ausnehmungen besitzen, was die Nachgiebigkeit verändert. Zum anderen kann auch die Form selbst variieren. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 18 zu erkennen. Hier ist die Membran als Mäander ausgeführt.



**Abbildung 18: Detail 2 (Konzept 1)**

**Charakteristika des Konzepts:**

**Vorteile:**

- ✓ Die Lagerschilde sind fix mit dem Gehäuse verbunden. Die Wärme kann somit von der Welle, über die Lagerschilde und dem Gehäuse abfließen.
- ✓ Funktionstrennung: Messflansch getrennt von der Vorspannungseinstellung und der Anbindung an die Antriebseinheit
- ✓ Große Messstrecke (Abstand zwischen Pt-100 Sensoren → siehe Kapitel 6)

Nachteile:

- ! Nichtlineares Verhalten der Membran
- ! Schwierig auszulegen

Der größte Nachteil dieser Überlegung ist, dass die Membran durch ihre geometrische Steifigkeit ein stark nichtlineares Verhalten aufweist. Ein solches Verhalten ist schwierig auszulegen bzw. aufwendig bei der Verwendung. (Willner, 2003)

### 4.3.2. Konzept 2

Bei diesem Konzept wird versucht eine Funktionstrennung durchzuführen. Das bedeutet, dass eine Seite für den Antrieb genutzt wird und die andere Seite für die Messung. Das *Lagerschild oben* ist fest mit dem Gehäuse verbunden und möglichst steif ausgeführt. Hier ist auch die Verbindung zur Antriebseinheit. Durch positive Erfahrung aus anderen Projekten wird oben außerdem ein Lagerpaar (Schrägbügel in zusammengepasster „Face to Face“ Anordnung) verwendet (Abbildung 19). Die Vorteile, welche durch die Verwendung eines Lagerpaars entstehen werden in Kapitel 5.2 behandelt.

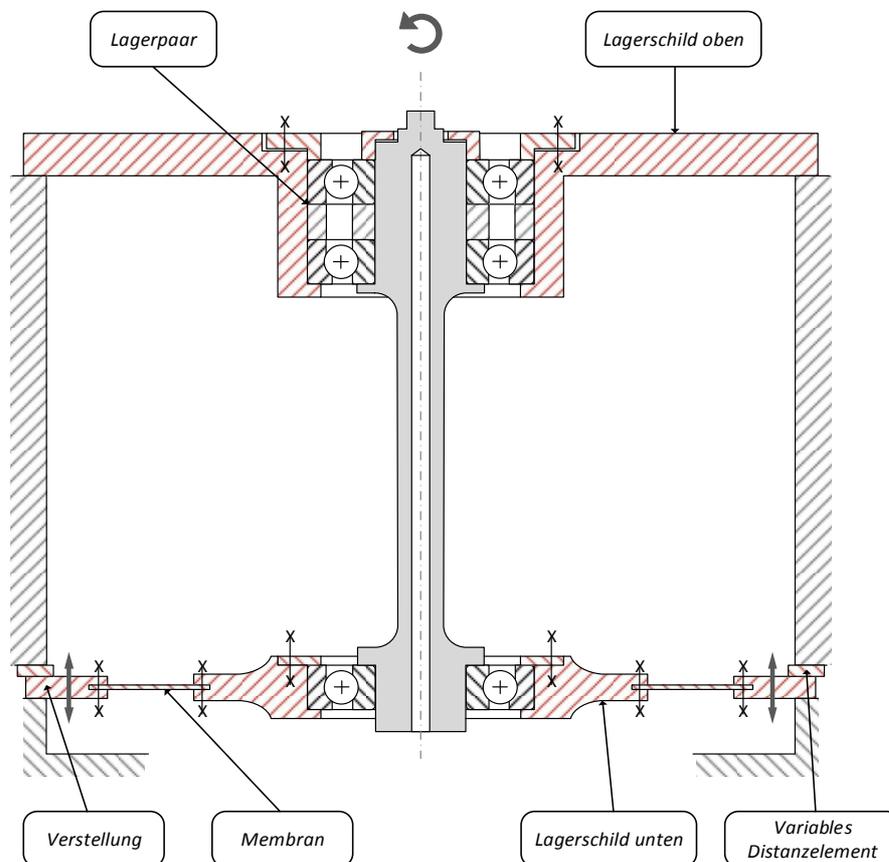


Abbildung 19: Konzept 2

Das *Lagerschild unten* (=Messflansch) wird geteilt und eine Membran hinzugefügt. Diese ist ebenso wieder fest mit dem Gehäuse verbunden. Durch beilegen variabler Distanzelemente zwischen Gehäuse und *Lagerschild unten* kann der Abstand zwischen den zwei Lagerschilden verändert werden. Dadurch ändert sich die Spannung der Membran was dazu führt, dass sich die Vorspannung der Lager verändert. Die Temperaturmessungen werden ebenso hier durchgeführt.

Somit ist eine Funktionstrennung erreicht. Lagerpaar-Seitig eine steife, feste Verbindung mit Anschluss zur Antriebseinheit und auf der Messflanschseite eine flexible Aufhängung, an der die Vorspannungseinstellungen vorgenommen werden können und die Messungen durchgeführt werden.

### **Charakteristika des Konzepts:**

Vorteile:

- ✓ Funktionstrennung: Antriebsseite (fest, steif) / Messseite (flexibel, veränderbar)
- ✓ Die Lagerschilde sind fix mit dem Gehäuse verbunden. Die Wärme kann somit von der Welle, über die Lagerschilde und dem Gehäuse abfließen.

Nachteile:

- ! Nichtlineares Verhalten der Membran
- ! Die Messstrecke (siehe Kapitel 6) für die Temperatursensoren ist konstruktionsbedingt sehr klein, wodurch sich ein kleiner Temperaturunterschied ergibt.
- ! Durch den Einbau der Membran in den Messflansch ergeben sich einige Probleme hinsichtlich der Temperatur. Durch den kleinen Querschnitt der Membran entsteht ein Temperaturstau was zu unzulässig hoher Erwärmung der Lager führen würde.

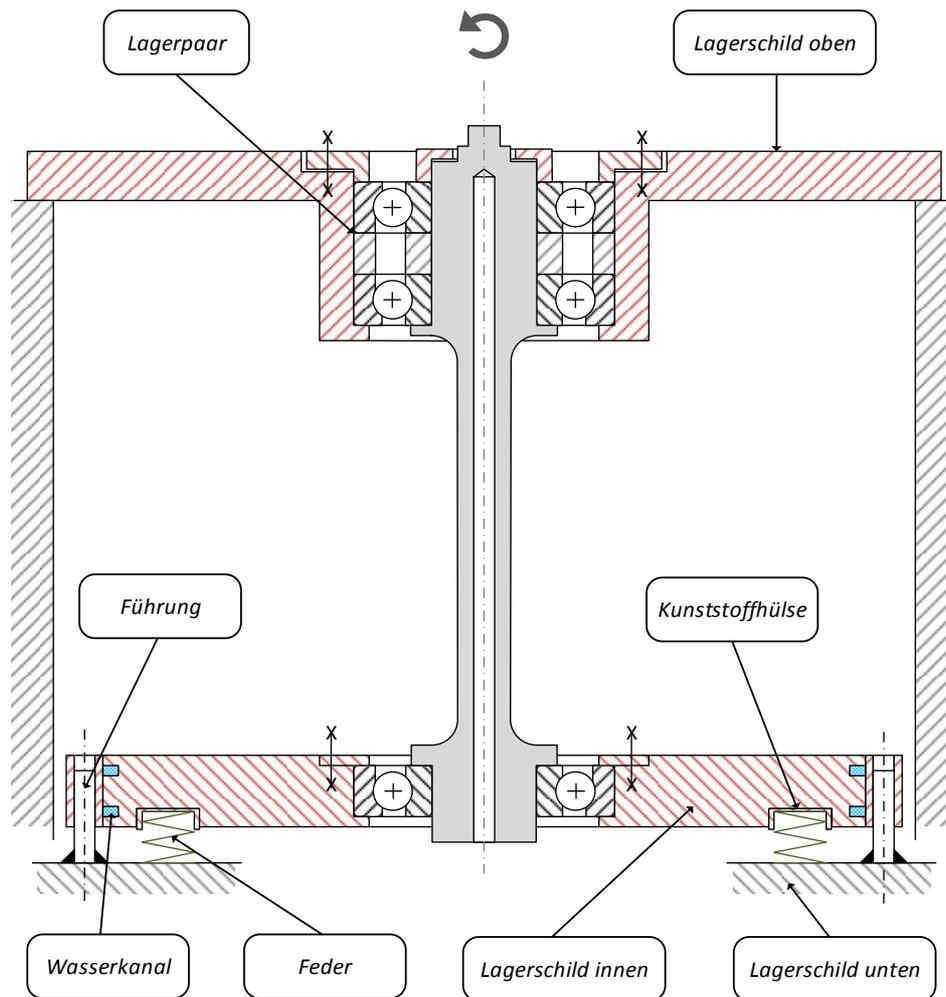
Hier ist auch wieder das nichtlineare Verhalten der Membran ein sehr großer Nachteil. Zusätzlich kommt noch die Problematik des Temperaturstaus dazu. Es kann versucht werden dies zu umgehen, indem man die Membran aus einem Material, mit einem hohen Wärmeleitwert fertigt, jedoch wirkt sich dies wieder schlechter auf den ohnehin schon kleinen Temperaturgradienten, welcher durch die kurze Messstrecke kriert wird, aus.

### 4.3.3. Konzept 3

Mit Konzept 3 wurde versucht die Funktion der Membran durch eine alternative Konstruktion zu ersetzen und somit das problematische, nichtlineare Verhalten zu Umgehen. Dabei ist zu beachten, dass eine Membran sowohl radial steif als auch axial nachgiebig ist. Die neue Konstruktion muss also diese Anforderungen ebenso erfüllen wie eine vergleichbare Membran.

Wie Abbildung 20 zeigt wird das *Lagerschild unten* zu diesem Zweck umfunktioniert und übernimmt nur mehr die Funktion eines Gehäusedeckels. Außerdem wird die Konstruktion um das *Lagerschild innen* erweitert. Dieses ist nicht mehr fest mit dem Gehäuse verbunden und durch den Einsatz unterschiedlicher Federn kann die Vorspannung variiert werden. Die radiale Steifigkeit und axiale Nachgiebigkeit wird durch Führungsstifte (*Führung*) erreicht, welche fest mit dem *Lagerschild unten* verbunden sind und in den dafür vorgesehenen Bohrungen des *Lagerschilds innen* eingeführt werden.

Damit die Wärme nicht über die Federn abfließen kann und somit die Messung beeinflusst, werden zusätzliche Kunststoffhülsen zwischen Federn und Lagerschilden gelegt, welche als thermische Isolatoren wirken (Kunststoff besitzt eine sehr schlechte Wärmeleitung im Vergleich zur Wärmeleitung des Messflansches). Jedoch muss die Wärme auf irgendeinen Weg, am Ende des Messflansches, abgeführt werden, um eine thermische Senke zu erreichen. Da allerdings keine direkte Verbindung zum Gehäuse besteht, muss eine zusätzliche Konstruktion dafür sorgen, dass die Wärme abgeleitet wird. Dies geschieht mit Hilfe von eingearbeiteten Kühlkanälen, in denen Wasser als Kühlmedium fungiert, wodurch die Senke auch eine gute Regelbarkeit aufweist (durch Variation der Kühlmitteltemperatur).



**Abbildung 20: Konzept 3**

Das *Lagerschild* oben ist wiederum sehr steif ausgeführt und fest mit dem Gehäuse verbunden. Außerdem ist auch hier ein Lagerpaar eingesetzt, um eine optimale und stabile Anbindung an die Antriebseinheit zu gewährleisten.

Eine Funktionstrennung ist ebenfalls wieder gegeben.

### **Charakteristika des Konzepts:**

Vorteile:

- ✓ Funktionstrennung: Antriebsseite (fest, steif) / Messeite (axial flexibel, veränderbar)
- ✓ Eines der Lagerschilde ist fix mit dem Gehäuse verbunden. Die Wärme kann somit von der Welle, über das Lagerschild und Gehäuse abfließen.
- ✓ Lineares Verhalten der Federn und somit der Vorspannkraft
- ✓ Große Messstrecke (Abstand zwischen Pt-100 Sensoren)
- ✓ Zusätzliche Messmöglichkeit der Abgeführten Wärme mit Hilfe des Kühlmittels
- ✓ Regelbarkeit der thermischen Senke über die Kühlmitteltemperatur

Nachteile:

- ! Mehraufwand durch zusätzliche Kühlkanäle
- ! Problematik betreffend axialer Führung (Erklärung folgt im nächsten Absatz)

Der größte Vorteil dieses Konzepts ist sicherlich das Wegfallen der Membran und mit diesem das nichtlineare Verhalten der Vorspannung. Mit den eingesetzten Federn wird erstens ein lineares Verhalten der Vorspannung erreicht und zweitens kann mit dem Verwenden von grob ausgelegten Federn der prinzipielle Einfluss der Vorspannung ermittelt werden. Außerdem ist zu erwähnen, dass niedersteife Federn, bei wärmedehnungsbedingter Längsverschiebung, die Vorspannung nur wenig verändern. Die Kühlkanäle sind einerseits ein fertigungstechnischer Mehraufwand, andererseits bietet sich damit die Möglichkeit die Temperatur des Kühlmediums zu messen und dadurch eine weitere Kontrollgröße zu erhalten.

Eine nicht zu unterschätzende Schwierigkeit stellt allerdings die Führung dar. Sie muss eine radiale Steifigkeit sowie eine axiale Führung gewährleisten. Durch Erwärmung dehnt sich allerdings das *Lagerschild innen* in radialer Richtung aus. Dies hat zur Folge, dass die axiale Führung nicht mehr wie gefordert funktioniert und im schlimmsten Fall sehr stark verspannt, was zu einem Feststecken führen kann. Dadurch ist eine axiale Beweglichkeit nicht mehr gegeben.

### **4.3.4. Konzept 4**

Ein wichtiger Punkt der vorherigen Konzepte ist, dass mindestens eine Seite (*Lagerschild oben*, *Lagerschild unten*) sehr steif ausgeführt ist. In Konzept 4 wird diese Komponente außer Acht gelassen und die gesamte Konstruktion nachgiebig aufgehängt.

Es ist wieder ein zusätzlicher *Lagerschild innen* von Nöten, welcher ebenso keine fixe Anbindung an das Gehäuse besitzt. Das *Lagerschild unten* dient dabei als Gehäusedeckel. Die Vorspannung kann gleich wie in Konzept 3 mittels Variation von Federn eingestellt werden. An der Außenseite des *Lagerschilds innen* werden nachgiebige Komponenten (O-Ringe) angebracht, welche es ermöglichen, radiale Bewegungen und Ausdehnungen (durch unwuchtbedingte Schwingungen oder Erwärmung hervorgerufen) auszugleichen. Außerdem übernehmen diese nachgiebigen Komponenten die Führung des *Lagerschilds* an der Innenseite des Gehäuses und dienen als thermische Isolatoren. In Abbildung 21 ist die eben beschriebene Konstruktion dargestellt.

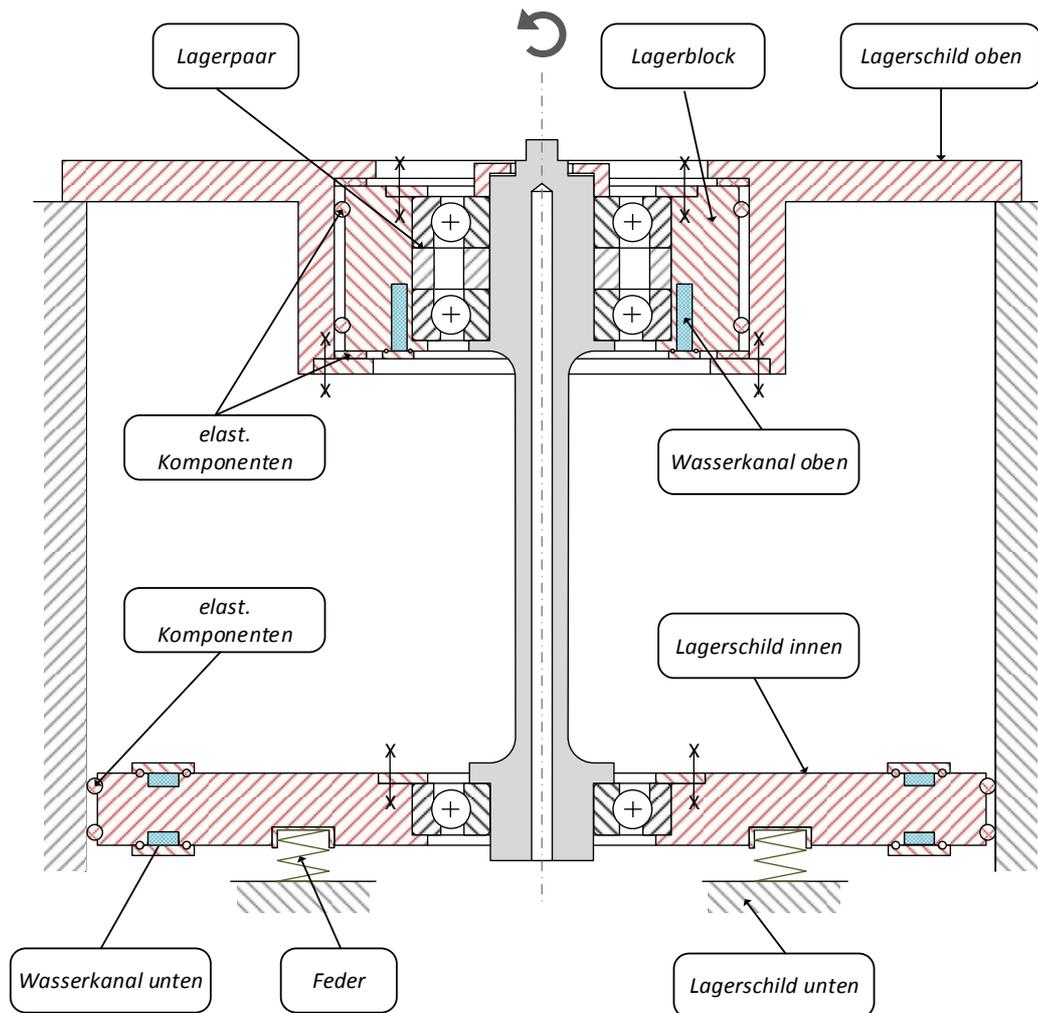


Abbildung 21: Konzept 4

Das *Lagerschild oben* wird in diesem Konzept ebenso geteilt, um auch hier eine erforderliche nachgiebige Aufhängung zu gewährleisten. Die Lager sind in den *Lagerblock* eingepresst, welcher wiederum mittels nachgiebiger Komponenten (O-Ringe, Flachdichtungen) an das *Lagerschild oben* angebunden ist.

Das gesamte „Innenleben“ (*Hohlwelle*, *Lagerschild innen*, *Lagerblock*, usw.) ist nun nachgiebig aufgehängt und fähig etwaige auftretende Unwuchten und Bewegungen auszugleichen. Ein weiterer wichtiger Aspekt der nachgiebigen Elemente sind die hervorragenden dämpfenden Eigenschaften (im Vergleich zur Dämpfung des Gehäuses) welche sich positiv auf das Schwingungsverhalten der Welle auswirken. Eine Funktionstrennung ist in dem Sinn gegeben, dass oben die Antriebseinheit sitzt und unten alle Messungen und Adjustierungen erfolgen.

Da das *Lagerschild innen* keinen ausreichenden wärmeleitenden Kontakt zum Gehäuse besitzt, muss die Wärme auf einem anderen Weg abgeführt werden, um einen Temperaturstau zu vermeiden. Dies geschieht mit der Hilfe von Kühlkanälen. Das *Lagerschild oben* ist nun auch nicht mehr mit dem Gehäuse verbunden und benötigt ebenso einen Kühlkanal, um die entstehende Wärme abzuführen und somit die Lager vor übermäßigen Wärmeeinfluss zu schützen. Kunststoffhülsen fungieren wiederum als thermischer Isolator und verhindern, dass die Wärme über die Federn abfließen kann und somit das Messergebnis beeinflusst wird.

### **Charakteristika des Konzepts:**

Vorteile:

- ✓ Modifizierte Funktionstrennung: Antriebsseite (flexibel) / Messseite (flexibel, veränderbar)
- ✓ Radial niedersteife Aufhängung gewährt einen Ausgleich von Unwuchten und Bewegungen
- ✓ Positive dämpfende Eigenschaften der nachgiebigen Elemente
- ✓ Lineares Verhalten der Federn und somit der Vorspannkraft
- ✓ Große Messstrecke (Abstand zwischen Pt-100 Sensoren)
- ✓ Zusätzliche Messmöglichkeit mit Hilfe des Kühlmittels
- ✓ Regelbarkeit der thermischen Senke über die Kühlmitteltemperatur

Nachteile:

- ! Mehraufwand durch zusätzliche Kühlkanäle
- ! Aufwendigere Konstruktion

Positiv bei diesem Konzept ist der flexible Aufbau, welcher Spielraum hinsichtlich der maschinendynamischen Aktionen zulässt. Die Konstruktion ist einer bereits Bestehenden nachempfunden, welche jedoch einen anderen Einsatzzweck bekleidet. Hier sei auf das IECON Paper (Recheis, et al., 2013) verwiesen, in welchem verschiedenste nachgiebige Konzepte beschrieben werden. Nichtsdestotrotz ist dies ein guter Beweis dafür, dass solch ein nachgiebig aufgebautes Konzept durchaus funktioniert.

Als nachteilig ist der höhere Konstruktionsaufwand zu sehen, welcher durch die geteilten Lagerschilde und die, für die Wärmeabfuhr nötigen, Kühlkanäle hervorgerufen wird.

### 4.3.5. Ausgewähltes Konzept

Nach ausführlichen Überlegungen wurde aus folgenden Gesichtspunkten zu Gunsten des **Konzepts 4** entschieden. Die Konzepte 1-3 beinhalten jeweils mindestens einen Faktor, welcher schwer zu bestimmen ist bzw. bei welchem das Verhalten schwierig vorherzusagen ist.

- Für die variable Vorspannung werden Federn und keine Membran verwendet. Diese haben den großen Vorteil eines linearen Verhaltens. Weiters weisen sie nur eine geringe Vorspannungsänderung bei einer wärmedehnungsbedingten Längsverschiebung auf. Außerdem sind sie leicht zu ersetzen, auszutauschen oder zu verändern.
- Der erhöhte Konstruktionsaufwand ist natürlich ein Nachteil, allerdings ergibt sich durchaus ein neuer Nutzen daraus. So werden beispielsweise die Kühlmitteltemperaturen gemessen was einen zusätzlichen Referenzmesspunkt ergibt.
- Der Aufbau ist kompakt und flexibel gestaltet.
- Nachgiebige Lageraufhängungen wurden bereits in anderen Anwendungen erprobt. (Recheis, et al., 2013)
- Auftretende Bewegungen werden von den nachgiebigen Komponenten ausgeglichen. Dies ist beispielsweise beim Anfahrvorgang, in der Nähe von Eigenfrequenzen, oder bei, durch wirkende Unwuchten hervorgerufenen Bewegungen von Relevanz.
- Die guten dämpfenden Eigenschaften der nachgiebigen Elemente (im Vergleich zur Dämpfung des Gehäuses) wirken sich positiv auf das Betriebsverhalten (hinsichtlich Schwingungen) aus.
- Eigenfrequenz sowie rotordynamisches Verhalten können durch Variation der Elastomere verändert werden.

## 5. Vorauslegung und Simulation

Dieses Kapitel befasst sich mit dem Abschätzen der auftretenden Resonanzfrequenzen sowie mit dem Auslegen der Lagerung des ausgewählten Konzepts. Abbildung 22 zeigt nochmals den Aufbau dieses Konzepts (näheres dazu in Kapitel 4.3.4).

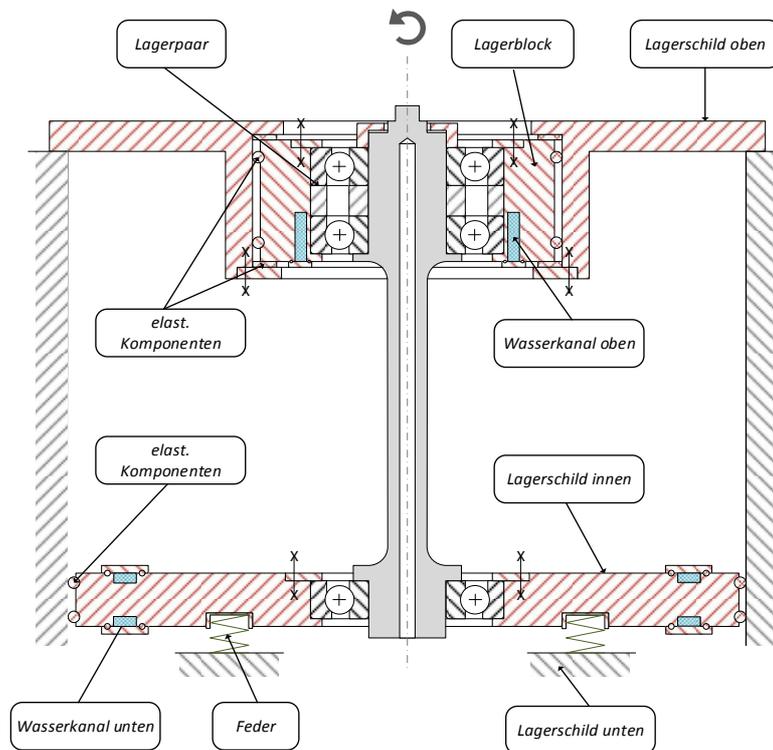
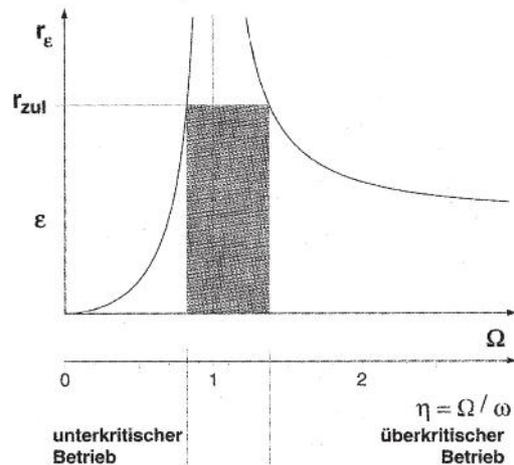


Abbildung 22: Konzept 4

### 5.1. Maschinendynamische Betrachtungsweise

Bei der maschinendynamischen Betrachtung eines drehenden Bauteils gibt es prinzipiell zwei Betriebsarten, den *unterkritischen* Betrieb und den *überkritischen* Betrieb (Abbildung 23). Die Grenze zwischen den beiden Bereichen ist gekennzeichnet durch die sogenannte Resonanzfrequenz. Ist die Erregerfrequenz (Frequenz mit der die Welle angetrieben wird) gleich der Resonanzfrequenz, so tritt Resonanz auf. Das bedeutet, dass die Schwingungsamplitude im Extremfall (= im ungedämpften Fall, also ohne Energieverluste) bis ins Unendliche ansteigen würde.

In der Praxis zeichnet sich dies so ab, dass je näher man der Resonanzfrequenz kommt, die Schwingungsamplitude immer größer wird und die Welle immer stärker zu schwingen beginnt. Dies kann bis hin zur Schädigung führen. Um in den überkritischen Bereich zu kommen, muss also versucht werden, die genannte Resonanzfrequenz so schnell wie möglich zu durchfahren und somit ein Aufschwingen des Systems zu vermeiden.



**Abbildung 23: Unterkritischer/Überkritischer Betrieb (Gasch, Nordmann, & Pfützner, 2006)**

Die Durchführung von Messungen am Lager, in unmittelbarer Nähe der Resonanzfrequenz ist zu vermeiden, da hohe Bauteilbelastungen auftreten (in Erster Instanz werden nur die Biegeschwingungen betrachtet). Weiters ist hinzuzufügen, dass das Überwinden der Resonanzfrequenz mehr Antriebsleistung benötigt, da hier viel Energie für die Schwingung verbraucht wird und dies bei einen zu schwach dimensionierten Motor zu Problemen (siehe Beispiel im nächsten Absatz) führen kann.

Bei einem Versuch an der TU Graz mit einem zu schwachen Motor die Resonanz zu durchfahren, kam es durch die auftretenden Schwingungen zur Zerstörung der Kupplung (Magnetkupplung mit Spalttopf). Ein Großteil der Antriebsleistung wurde in Schwingungsenergie umgewandelt, wodurch der Außenläufer der Kupplung eine so große Exzentrizität erfuhr, dass ein Kontakt entstand und dies in weiterer Folge zum Bersten des Spalttopfes führte. In der Abbildung 24 ist die zerstörte Kupplung zu erkennen.



**Abbildung 24: Zerstörung durch Resonanz (Burgholzer, 2014, S. 65)**

Aus diesem Grund sollte die Resonanzfrequenz möglichst niedrig gehalten werden, um sie leichter überwinden zu können. (Hering, Martin, & Stohrer, 2012) (Gasch, Nordmann, & Pfützner, 2006) (Burgholzer, 2014)

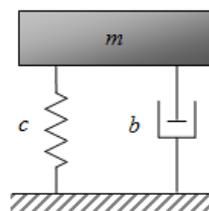
Der Aufbau des ursprünglichen Modells dieses Prüfstands war möglichst steif ausgeführt. Es wurde also versucht, eine möglichst hohe Eigenfrequenz anzustreben.

Das neu erarbeitete Modell ist nun gegensätzlich aufgebaut (hinsichtlich des steifen Aufbaus). Das gesamte System wird so nachgiebig wie möglich gestaltet. Durch diese nachgiebige Aufhängung erreicht man folgende Vorteile:

1. Die Wuchtgüte der drehenden Teile muss nicht mehr so hoch sein, da auftretende Unwuchten von den nachgiebigen Elementen reduziert werden.
2. Die nachgiebigen Elemente weisen den Vorteil eines dämpfenden Verhaltens auf, was wiederum Vorteile hinsichtlich auftretender Schwingungen bringt.
3. Durch die Verwendung von elastischen Verbindungselementen ist die Welle inklusive Messflansch thermisch entkoppelt vom Gehäuse.
4. Durch die elastische Aufhängung wird eine axiale Verschiebbarkeit erreicht, welche angestrebt wurde, um in späterer Folge die Vorspannung messen zu können.

Zur Abschätzung der Resonanzfrequenzen wurde eine Eigenfrequenzsimulation der Welle mit der sich darauf befindlichen Magnetkupplungshälfte durchgeführt. Es wurde entschieden eine FE-Simulation durchzuführen, da hier ein genaueres Ergebnis zu erwarten ist, als dies ohne die Hilfe eines Simulationsprogramms möglich wäre. Das verwendete Programm (siehe Abbildung 27 und Abbildung 28) wurde im Buch „Dynamics Of Rotating Machines“ (Friswell, Penny, Garvey, & Lees, 2012) angeboten und mithilfe von *Matlab* ausgeführt.

Die Welle und die Magnetkupplung wurden als erstes in *Matlab* unter Anwendung von textbasierter Befehlseingabe nachmodelliert (siehe Abbildung 27). Die Welle (blau dargestellt) ist dabei biegeweich und die Magnetkupplung (gelb dargestellt) entspricht einer starren Scheibe. Im nächsten Schritt wurden die Lagerstellen hinzugefügt (rot dargestellt). Diese Lagerstellen sind Feder-Dämpfer Systeme (Abbildung 25) welche die elastische Aufhängung simulieren.

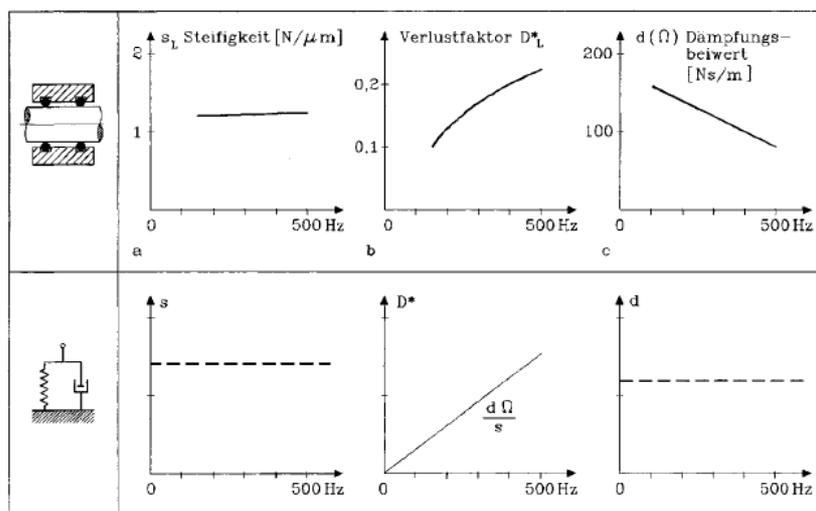


**Abbildung 25: Beispiel Feder-Dämpfer-System (Mathematical Engineering, 2015)**

Alle Werte, wie z.B.: die Steifigkeit und der Dämpfungsbeiwert, sowie Dichte und Elastizitätsmodul der Welle können hierbei beliebig verändert werden.

**Angenommene Steifigkeiten und Dämpfungen:**

Da dieses Programm nur mit konstanten Werten arbeitet, wurden mittlere Steifigkeiten und Dämpfungsbeiwerte für die Elastomer-Lagerung angenommen. Abbildung 26 zeigt die mittels eines Prüfstands (elektrodynamischer Shaker) ermittelten Werte einer vergleichbaren O-Ring Lagerung, sowie die Werte eines idealen Feder-Dämpfer Systems. (Gasch, Nordmann, & Pfützner, 2006)



**Abbildung 26: Literaturangaben für Steifigkeiten und Dämpfungsbeiwerte (Gasch, Nordmann, & Pfützner, 2006, S. 130)**

Aus diesen Diagrammen wurden nun folgende Werte entnommen:

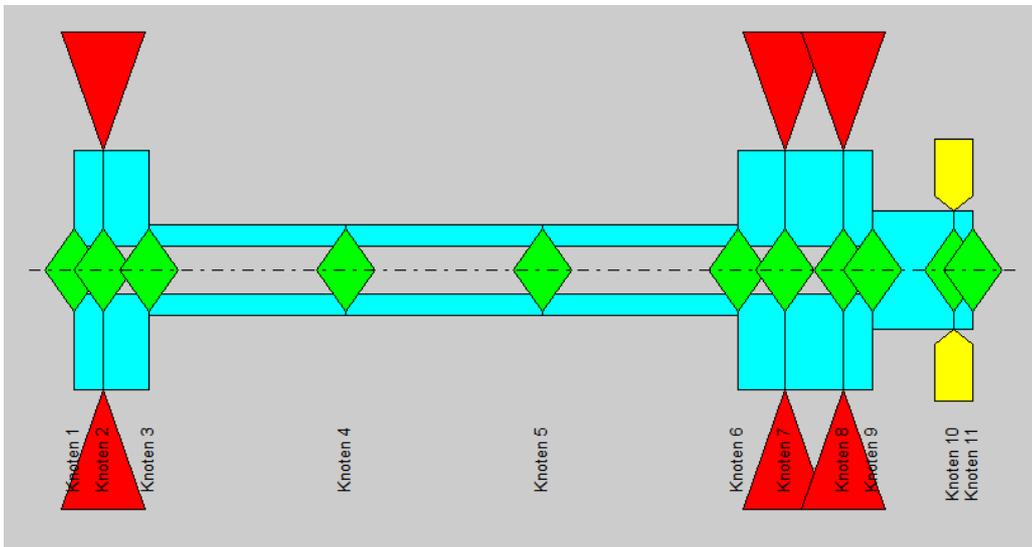
Angenommener Wert für die Steifigkeit  $s_L = 1,2 \text{ N}/\mu\text{m}$

Angenommener Dämpfungsbeiwert  $d = 110 \text{ Ns}/\text{m}$

Die Drehzahl, welche zur Ermittlung der Steifigkeit und Dämpfung erforderlich ist, ist mit 20.000 upm oder ca. 333 Hz gewählt worden. Dies entspricht einer Drehzahl, bei der voraussichtlich hohe Belastungen auftreten werden, da hier etwa die erste Eigenfrequenz vermutet wird.

Die Steifigkeiten der Lager selbst wurden hierbei vernachlässigt. Dies hat den Grund, dass beim Vergleich von Lager und Elastomeren die Lager eine deutlich höhere Steifigkeit aufweisen und dadurch als unendlich steif angenommen werden können. Genauso verhält es sich im Vergleich von Gehäuse zu Elastomer. Außerdem ist die Gesamtsteifigkeit einer

Reihenschaltung von Steifigkeiten immer kleiner als die kleinste Einzelsteifigkeit. (Dresig, 2006)



**Abbildung 27: Modelliertes System**

Nach Eingabe aller erforderlichen Daten, kann die Simulation durchgeführt werden und man erhält ein Campbelldiagramm (siehe Abbildung 28). Hier ist die Drehfrequenz in Hz über der Rotordrehzahl in U/min aufgetragen. Wie an der blauen Linie zu erkennen ist, wurde die Drehzahl linear gesteigert. Die erste Resonanzfrequenz ist nun bei dem Schnittpunkten abzulesen und befindet sich bei ca. 20.000 upm, die zweite bei ca. 22.000 upm.

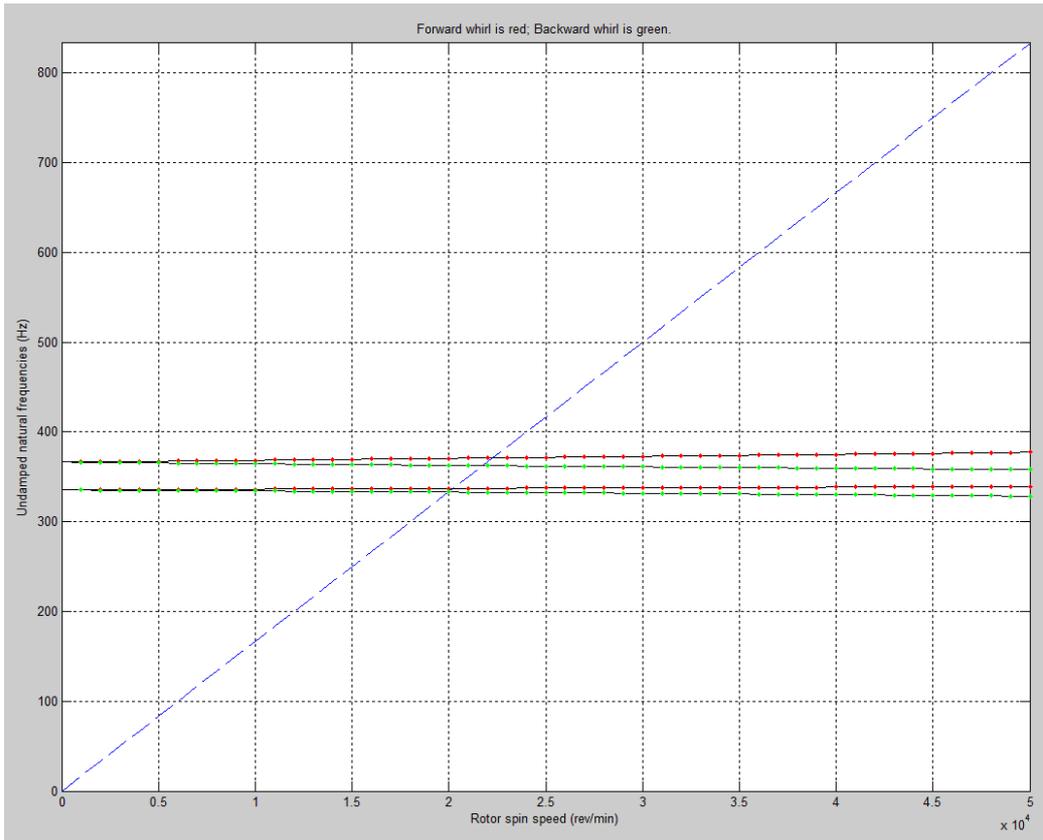


Abbildung 28: Campbelldiagramm: Ergebnis der Eigenfrequenzsimulation

## 5.2. Lagerauslegung

Bei dem ursprünglichen System des Prüfstands wurde eine angestellte Lagerung verwendet. Hierbei wurde ein Lager definiert gegen das Andere, in einer X-Anordnung, verspannt. Abbildung 29 zeigt eine X-Anordnung und eine O-Anordnung im Vergleich.

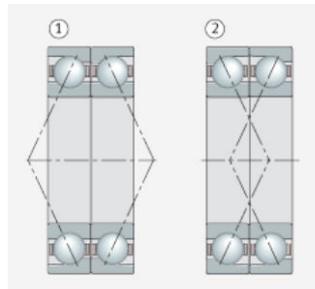
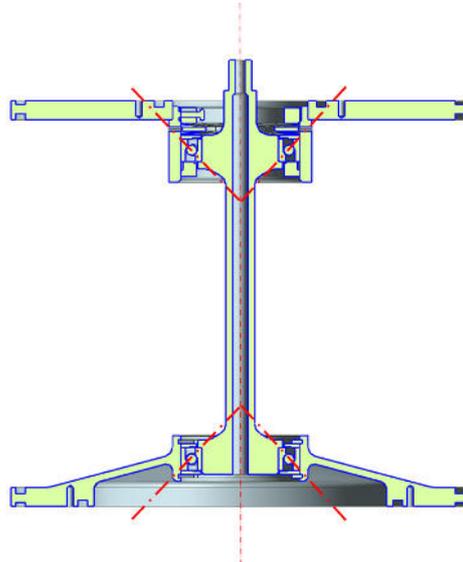


Abbildung 29: O-Anordnung (1) und X-Anordnung (2) (Schaeffler, 2015)

Die O-Anordnung kann ein größeres Kippmoment aufnehmen, da die Druckmittelpunkte einen größeren Abstand haben. Dadurch weist diese Ausführung ein steiferes Verhalten im

Gegensatz zur X-Anordnung auf. Beim ursprünglichen Prüfstand wurde aus konstruktiven Gründen und um eine einfachere Montage zu gewährleisten eine X-Anordnung gewählt. (Schaeffler, 2015)

Bei der vorhandenen Konstruktion werden dabei zwei Spindellager (=Schrägkugellager mit engeren Toleranzen) eingesetzt, welche in Abbildung 30 zu erkennen sind.

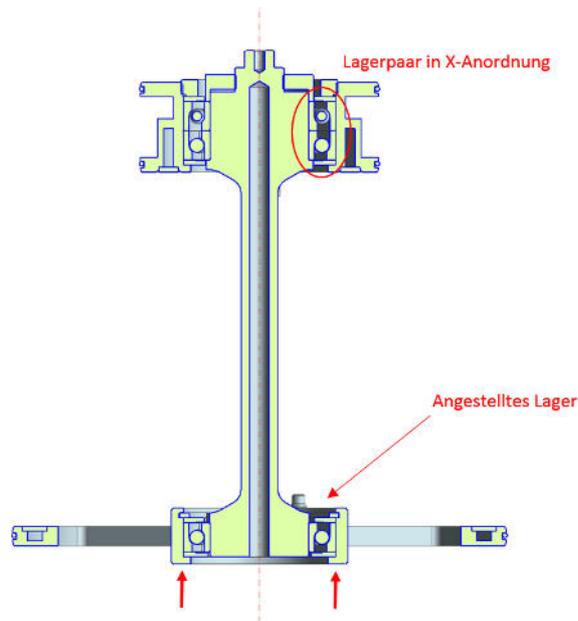


**Abbildung 30: Lagersituation des ursprünglichen Prüfstand (Haidl, 2014, S. 49)**

Die verwendeten Spindellager (Innendurchmesser 40mm) sind Hochgeschwindigkeitslager und haben die Bezeichnung SKF 71908 CEGA/P4A. Zur Erklärung der Lagerbezeichnung:

- SKF.....ist der Name des Herstellers
- 71908...Basiskurzzeichen (7 steht für einreihiges Schrägkugellager)
- C.....ist das 1. Nachsetzzeichen und gibt den Druckwinkel an = 15°
- E.....ist das 2. Nachsetzzeichen und gibt die Bauform an = „high speed“ Ausführung
- GA.....ist das 3. Nachsetzzeichen und bezeichnet Lager mit geringer Vorspannung
- P4A.....ist das 4. Nachsetzzeichen und gibt die Maßgenauigkeit nach ISO-Toleranzklasse 4 und Laufgenauigkeit besser als ISO-Toleranzklasse 4 an

Das verbesserte Lagerkonzept, welches in Abbildung 31 zu erkennen ist, besteht ebenfalls aus einer angestellten Lagerung, allerdings kommt hier auf einer Seite ein Lagerpaar in X-Anordnung (höhere Flexibilität; lässt minimalen Winkelversatz zu) zum Einsatz. Dieses Lagerpaar fungiert in dieser Form als Festlager und das zu vermessende Lager wird dagegen angestellt. Der Einsatz dieser Anordnung hat sich in anderen Projekten schon als geeignet erwiesen und aufgrund der vorhandenen Erfahrung wurde schließlich dieses Lagerkonzept gewählt. Außerdem wird dadurch eine Funktionstrennung erreicht, was so aussieht, dass die „Antriebsseite“ die des Festlagers und die „Testseite“ die des angestellten Messlagers ist, wo auch die Vorspannung verändert werden kann.



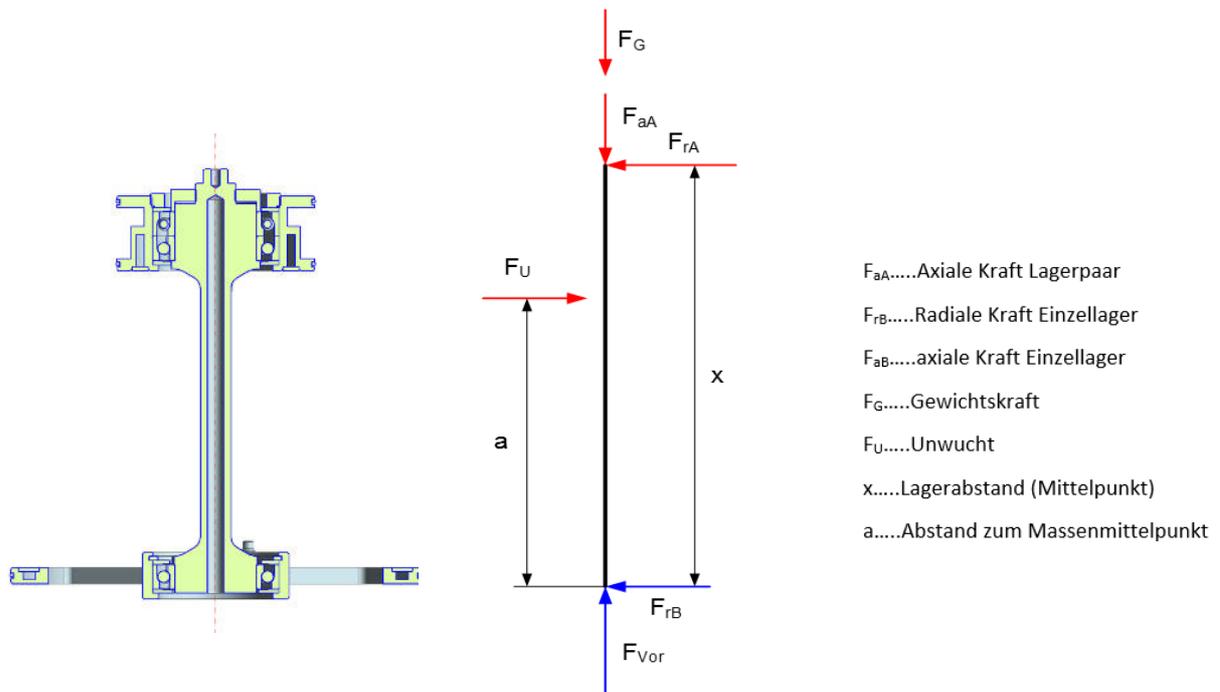
**Abbildung 31: Aktuelle Lagersituation**

Die beiden Lager des Lagerpaars sind Spindellager (Innendurchmesser 40mm) mit der Bezeichnung SKF 71908 CDGA/P4A. Diese Schrägkugellager besitzen eine niedrigere Grenzdrehzahl (ca.20.000 upm bei Fettschmierung) als die CEGA-Ausführung und sind kostengünstiger. Als Messlager wird ebenfalls ein Spindellager SKF 71908 CDGA/P4A verwendet.

Rückblickend wäre es auch möglich gewesen das Lagerpaar (siehe Abbildung 31) mit kleineren Lagern auszuführen. Dass trotzdem größere Lager mit einem Innendurchmesser von 40mm verwendet werden, hat folgende Gründe.

1. Es wurden bei der ursprünglichen Lagerung aus Symmetriegründen zwei gleich große Lager verwendet.
2. Außerdem soll eine Vergleichbarkeit zu den bereits durchgeführten Messungen des ursprünglichen Prüfstands möglich sein.
3. Des Weiteren wurde versucht Teile, welche bereits im vorhandenen Prüfstand eingesetzt wurden, wiederzuverwenden (unter anderem auch die Welle) um Kosten zu sparen. Durch die fortschreitende Konzeptionsphase sind schließlich fast alle Komponenten verändert worden, sodass auch der Einsatz von kleineren Lagern theoretisch möglich gewesen wäre.

Es wurde auch eine Lebensdauerberechnung der Lager durchgeführt, obwohl bei den geringen, auftretenden Kräften (geringe Masse der Welle -> geringe Unwucht) es abzusehen war, dass die Lebensdauer unkritisch ist. Die folgende Abbildung 32 zeigt die vereinfachte Annahme für die Berechnung der Lagerkräfte. Die Lagerstelle A ist dabei das Lagerpaar und die Lagerstelle B das Einzellager.



**Abbildung 32: Kräftesituation an den Wälzlagern**

Über eine angenommene Wuchtgüte von  $G=2,5$  (entspricht in etwa der Rohwuchtgüte eines kleinen Drehteils) wurde die Exzentrizität berechnet und unter Berücksichtigung von Sicherheiten eine „worst case“ Exzentrizität von max. 0,2mm ermittelt. Mit diesem Wert kann anschließend auf eine wirkende Unwucht zurückgerechnet werden. Die Ergebnisse sowie die Berechnung selbst sind im Anhang 17.1 zu sehen. Wie vorhin schon geschätzt befindet sich die nominelle Lebensdauer der Lager in einem Bereich von  $10^7$  -  $10^8$  Stunden und ist damit unkritisch.

### **Einfluss eines Lagerpaars auf die Eigenfrequenz:**

Durch das Verwenden eines Lagerpaars als Festlager (siehe Abbildung 27) wird die Resonanzfrequenz des Systems stark beeinflusst. Die Frequenz steigt mit dieser Anordnung von ca. 14.000 upm auf ca. 20.000 upm. Da die Lager in einem Drehzahlbereich bis 15.000 upm getestet werden, ergibt sich somit auch in frequenztechnischer Betrachtungsweise ein Vorteil beim Einsatz von 2 Lagern. Ohne dem Lagerpaar wäre es demnach nicht möglich Messungen bei einem Drehzahlbereich von ca. 15.000 upm durchzuführen. In der folgenden

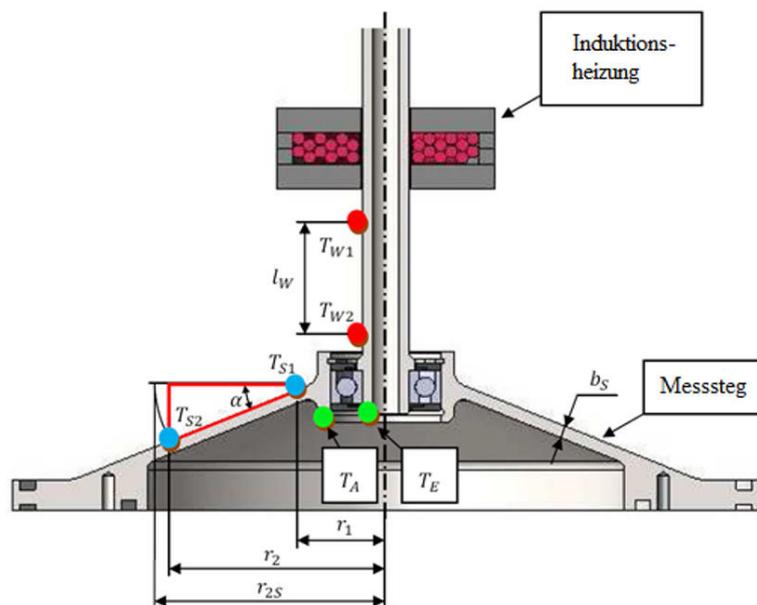


## 6. Messmethode und Messanordnung

In diesem Kapitel wird das bisher verwendete Messsystem und die Anordnung der Sensorik begutachtet, verbessert und teilweise neu ausgelegt. Dies hat weiterführend auch einen Einfluss auf die Gestaltung einiger Bauteile.

### 6.1. Analyse der ursprünglichen Messmethode

Wie in Kapitel 4.1 schon beschrieben, besteht das derzeitige Messkonzept aus berührenden und berührungslosen Temperatursensoren. Zuzüglich werden der Druck und die Drehzahl gemessen. Die nachfolgende Grafik (Abbildung 34) zeigt die ursprüngliche Messmethode, Stand 2013.



**Abbildung 34: Ursprüngliches Messkonzept (Haidl, 2014, S. 67)**

Die rot gekennzeichneten Messpunkte  $T_{W1}$  und  $T_{W2}$  beschreiben den zufließenden Wärmestrom und werden jeweils berührungslos mittels Pyrometer (siehe Anhang 17.18) gemessen.

Die blauen Punkte  $T_{S1}$  und  $T_{S2}$  sind Temperaturmesspunkte mit welchen in weiterer Folge der abfließende Wärmestrom dargestellt wird. Hier wird mit Hilfe von Pt-1000 Widerstandsthermometern berührend gemessen. Zur Steigerung der Genauigkeit werden, in Umfangsrichtung symmetrisch aufgeteilt, drei solcher Messungen durchgeführt.

Die grünen Punkte  $T_E$  und  $T_A$  zeigen die Temperatur am Lagerinnen- und Lageraußenring.  $T_E$  wird mit einem Pyrometer vermessen.  $T_A$  wird, von der Stegseite kommend, mit den erhaltenen Werten  $T_{S1}$  und  $T_{S2}$  linear extrapoliert. (Haidl, 2014)

Die Signale der Widerstandsthermometer werden über eine selbst gebaute Brückenschaltung (Abbildung 35) weiterverarbeitet. Die gemessenen Werte werden nun als Spannung dargestellt und müssen noch mittels einer Messhardware in eine entsprechende Temperatur umgewandelt werden. (Haidl, 2014)

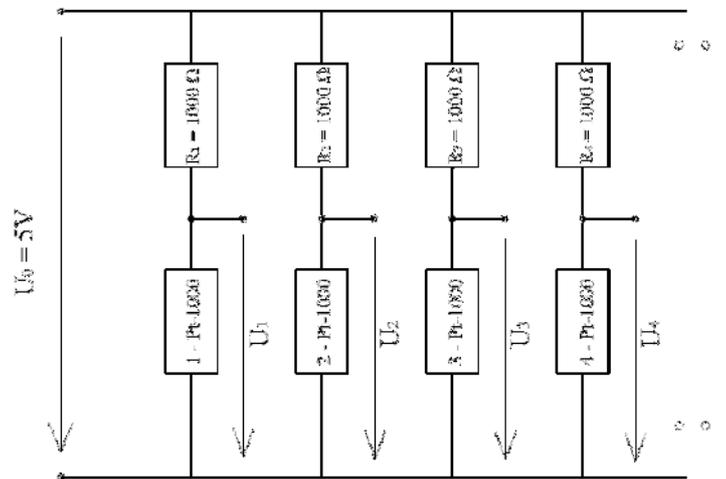


Abbildung 35: Brückenschaltung (Haidl, 2014, S. 70)

Bei praktischen Anwendungen wurde festgestellt, dass das angewandte Messkonzept einige Probleme aufweist, welche unbedingt behoben werden müssen, um ein verwertbares Messergebnis zu erhalten.

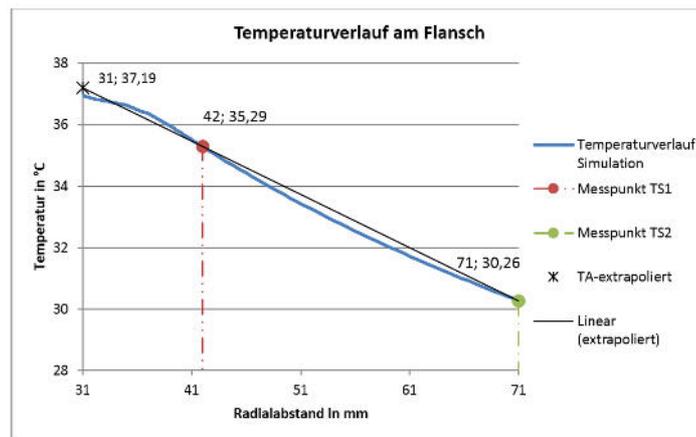
1. Das größte Problem ergibt sich durch die Induktionsheizung. Ist diese in Betrieb (das bedeutet die Welle wird beheizt) so wird nicht nur die Welle, sondern auch die ganze Sensorik beeinflusst. Es wird eine Spannung in die Verkabelung induziert, was ein starkes Störsignal zur Folge hat. Aus diesem Grund wurden Messungen, nur mit inaktiver Induktionsheizung, durchgeführt. Dies begrenzt natürlich die Dauer einer Messung drastisch, da durch Abkühlen ein instationärer Zustand vorliegt.
2. Die selbst gebaute Brückenschaltung weist bei genauerer Betrachtung mehrere kleine Fehlerquellen auf, welche summa summarum doch einen nicht zu vernachlässigenden Fehler ergeben.

Der Wert der Widerstände ist nicht zu 100% genau und müsste für ein optimales Ergebnis vermessen werden. Des Weiteren stellen die Lötstellen einen nicht definierbaren Übergangswiderstand dar, da sie manuell gelötet wurden und somit alle unterschiedlich sind. Schlussendlich hat auch hier die Induktionsheizung einen störenden Einfluss.

3. Der Messflansch wurde beim ursprünglichen Konzept als konische Scheibe ausgeführt, was einerseits das genaue Anbringen der Widerstandsthermometer

erschwert und andererseits dadurch die Berechnung des Wärmeleitwerts unnötig verkompliziert wird. Die konische Form wurde für eine ausreichende axiale Steifigkeit gewählt, welche jetzt, auf Grund einer neuen Lagersituation nicht mehr von Nöten ist.

4. Ein weiterer kleiner Fehler ergibt sich durch die Extrapolation der Temperatur  $T_A$  am Außenring des zu prüfenden Wälzlagers, da hierzu ein hundertprozentig lineares Verhalten angenommen wird (siehe Abbildung 36).



**Abbildung 36: Extrapolation  $T_A$  (Haidl, 2014, S. 75)**

5. Die Drehzahlmessung wurde mittels eines Kontrastsensors durchgeführt. Hierzu wurde eine Aluminium-Kunststoffolie als Kontrast auf der Welle angebracht. Das Problem ist das durch die Heizung hervorgerufene starke Rauschen. Durch dieses ist eine Automatisierung (Auswertung und Regelung) nicht möglich. (Haidl, 2014)

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es mehrere kleine Aspekte zu verbessern gibt und vor allem den Störeinfluss der Induktionsheizung entgegengewirkt werden muss, um eine verwertbare und aussagekräftige Messung durchführen zu können.

## 6.2. Verbessertes Messkonzept

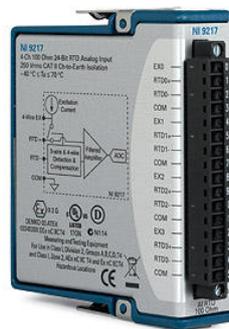
Aufgabe ist es, die im vorhergehenden Kapitel aufgezählten Probleme auszumerzen und somit ein stabiles und einfaches Messkonzept zu erstellen.

### Problematik der Brückenschaltung:

Die selbstgebaute Brückenschaltung ist das Bauteil mit den meisten Problemstellen. Der Aufwand, welcher benötigt würde, um diese Brückenschaltung so zu fertigen, dass sich die

Fehler auf ein Minimum reduzieren, wäre unverhältnismäßig hoch in Hinsicht auf die trotzdem noch vorhandenen Fehlerquellen, welche nicht beseitigt werden können. Aus diesem Grund kommt ein Zukaufteil zum Einsatz.

Es wird nun ein 4-Kanal, 100 $\Omega$  RTD, 24-Bit Analog Input Modul von *National Instruments*, welches 2 Temperaturdifferenzen pro Modul auswerten kann (siehe Anhang 17.17) verwendet. Diese Module haben den großen Vorteil, dass unerwünschte Störeinflüsse und Rauschen neutralisiert werden. Somit können auch während die Induktionsheizung die Welle aufheizt, Messungen durchgeführt werden. Die nachfolgende Abbildung 37 zeigt ein solches Modul.



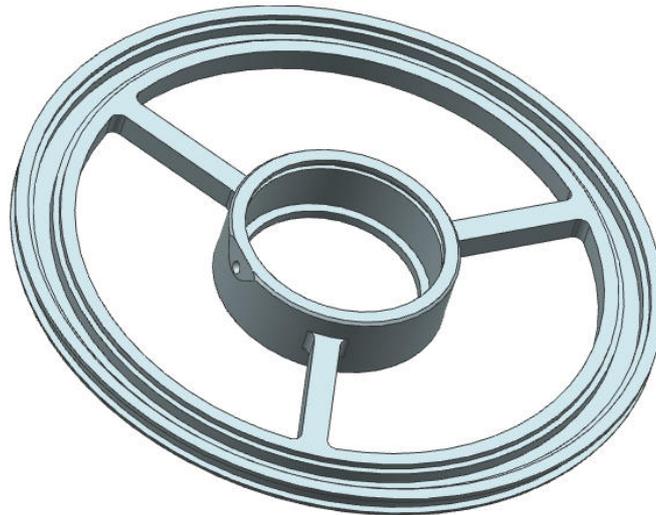
**Abbildung 37: NI 9217 Modul, (National Instruments, 2010)**

### **Geschirmte Messleitungen:**

Um ein allgemeines, unerwünschtes Induzieren einer Spannung durch die Induktionsheizung zu vermeiden, werden generell geschirmte Kabel verwendet. Die Pyrometer besitzen bereits geschirmte Messleitungen und es zeigte sich, dass sie keinen störenden Einflüssen durch Induktion unterliegen.

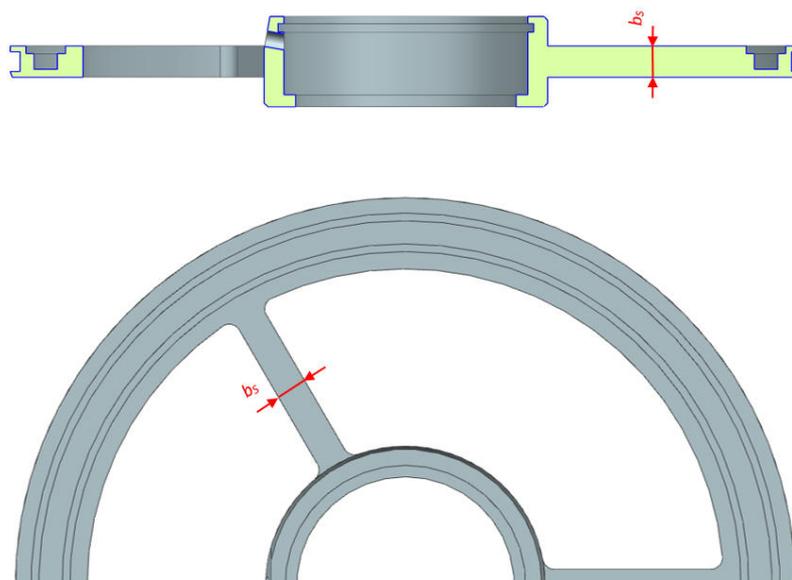
### **Messflanschgestaltung:**

Der Messflansch wurde entsprechend der gewonnenen Erkenntnisse umkonstruiert. Erstens ist er nun nicht mehr konisch ausgeführt sondern geradlinig und es wurde darauf geachtet, dass die Messlänge  $l_s$  (siehe Abbildung 40) zwischen den zwei Widerstandsthermometern maximiert wird (erhöht den Temperaturgradienten). Zweitens ist der Flansch keine Vollscheibe mehr, sondern als Speichenrad (Abbildung 38) ausgeführt, das den großen Vorteil eines definierten Messsteges hat.



**Abbildung 38: Umkonstruierter Messflansch**

Auf einem quadratischen Querschnitt (Abbildung 39) mit den Maßen 8x8 mm werden nun Pt-100 Widerstandsthermometer aufgeklebt. Der Umstieg auf Pt-100 erfolgt, zumal die neu errungenen Auswertmodule den Einsatz der selbigen fordern. Außerdem gestalten sich die nachfolgenden Berechnungen des Wärmeleitwerts (siehe Kapitel 10.2) mit solch einem Querschnitt um einiges einfacher. Des Weiteren befindet sich eine zusätzliche Bohrung im Flansch, mit deren Hilfe es möglich ist, die Temperatur am Lageraußenring  $T_A$  zu messen und somit die Interpolation zu umgehen. Genaueres zur Konstruktion des Messflansch im Kapitel 8.4.



**Abbildung 39: Querschnitt Messsteg**

### Drehzahlmessung:

Die Drehzahlmessung erfolgt nun nicht mehr mittels Kontrastsensors, sondern wird mit Hilfe der Auswertesoftware über den Antrieb (Spindel) ermittelt.

### Druckmessung:

Das Verfahren der Druckmessung ist das gleiche wie bei der ursprünglichen Konfiguration und wird mittels eines aktiven Pirani-Vakuumsensors durchgeführt. Nähere Informationen im nachfolgenden Kapitel 10.

### Anordnung der Messsensorik:

Die Sensoren werden nun ähnlich wie in der ursprünglichen Situation angeordnet. Abbildung 40 zeigt die Anordnung der verschiedenen Temperatursensoren.

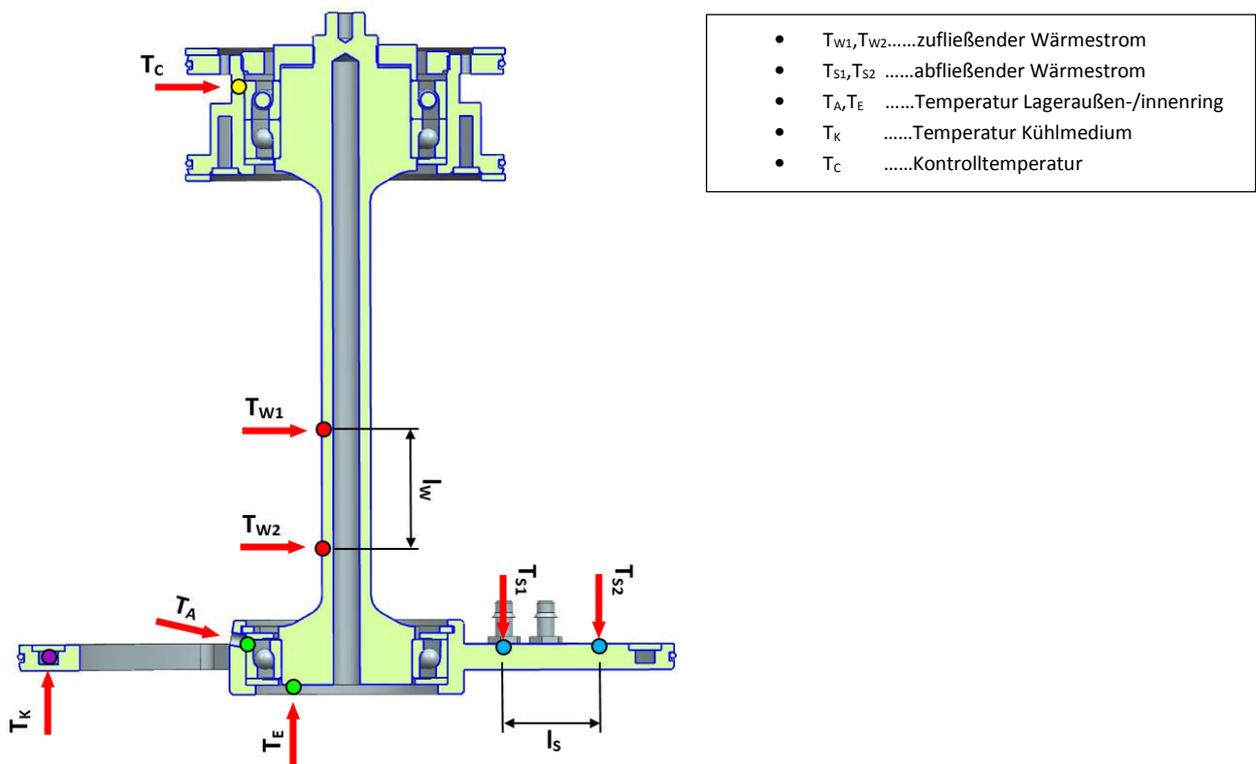


Abbildung 40: Anordnung Temperatursensoren

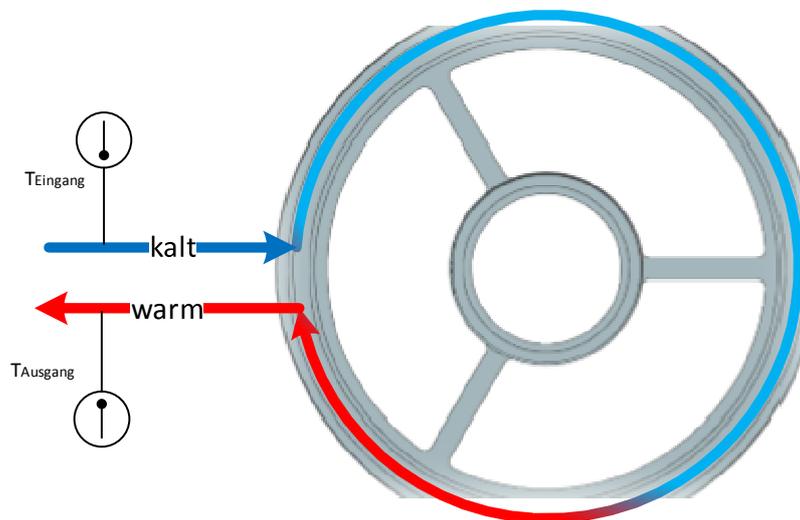
Die roten Punkte  $T_{W1}$  und  $T_{W2}$  beschreiben wieder den zufließenden Wärmestrom und werden genauso wie bei der „alten“ Anordnung mittels Pyrometer (Anhang 17.18) gemessen. Der Abstand  $l_w$  zwischen den Sensoren bleibt ebenso unverändert.

Die blauen Punkte  $T_{S1}$  und  $T_{S2}$ , durch welche der abfließende Wärmestrom gemessen wird, befinden sich auf einem geometrisch eindeutig definierten Messsteg. Es kommen Pt-100 Widerstandsthermometer zum Einsatz und der Abstand  $l_s$  wurde erweitert. Es werden drei in Umfangsrichtung symmetrisch aufgeteilte Messungen der Temperaturgradienten durchgeführt, um etwaige Messungenauigkeiten zu reduzieren.

Die grünen Punkte  $T_E$  und  $T_A$  entsprechen auch hier den Temperaturen am Lagerinnen- und Lageraußenring.  $T_E$  wird mit einem Pyrometer gemessen.  $T_A$  wird nun nicht mehr interpoliert sondern mit einem Pt-100-Element ermittelt.

Der violette Punkt  $T_K$  in Abbildung 40 symbolisiert die Temperaturmessung, des zur Kühlung notwendigen Mediums. Die Wassertemperatur wird vor dem Eintritt und beim Austritt des Messflansches bestimmt. Abbildung 41 zeigt diesen Vorgang und auch den qualitativen Temperaturverlauf der Umströmung.

Um den Wärmeleitwert zu bestimmen, ist es nicht nötig die Wassertemperatur zu messen, da bereits genügend andere Messpunkte vorhanden sind. Jedoch ist es zwingend notwendig den Flansch zu kühlen und so bietet es sich an, diese Messung durchzuführen und dadurch eine Vergleichstemperatur zu erhalten. Außerdem kann in weiterer Folge mit deren Hilfe die abgeführte Wärmemenge errechnet werden.



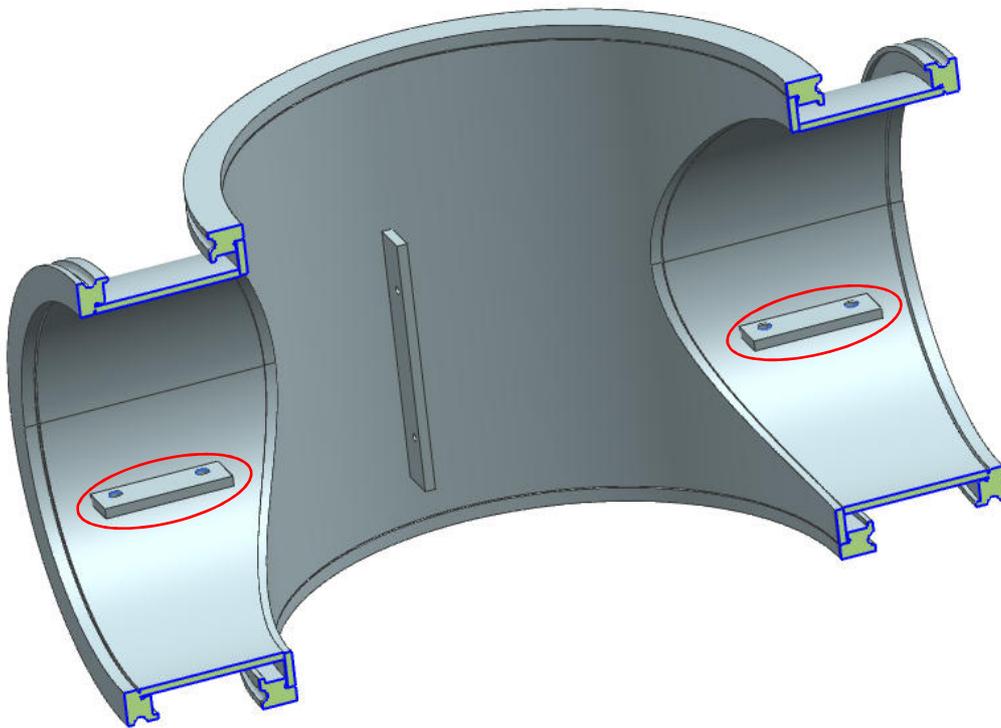
**Abbildung 41: Messung Kühlsystem**

Der gelbe Punkt  $T_C$  zeigt die Temperatur am Lageraußenring der oberen Lager. Diese Temperatur wird zur Berechnung des Wärmeleitwerts nicht benötigt und dient nur zur Überwachung der Temperatur bei dem Lagerpaar. Hier wird ebenfalls ein Pt-100 Widerstandsthermometer verwendet.

## 7. CAD – Konstruktion und Optimierung

Nachdem das Konzept 4 ausgewählt und gründlich ausgearbeitet wurde, steht als nächstes die CAD-Konstruktion am Programm. Mit deren Hilfe erhält man einen sehr guten Überblick über den Aufbau, die Funktionsweise und alle Komponenten. Diese sind zu erkennen und es können, bis zu diesem Zeitpunkt noch nicht in Betracht gezogene Optimierungen vorgenommen werden.

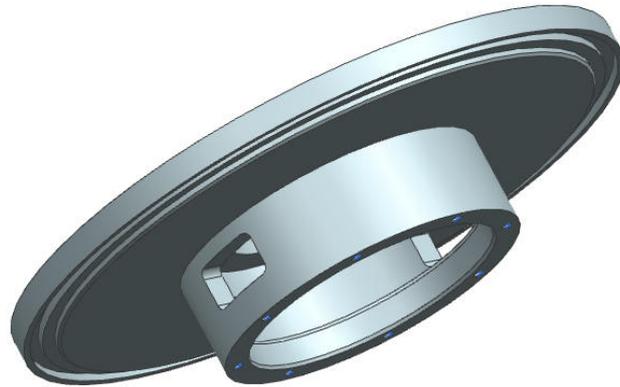
Wie in Kapitel 4.1 erwähnt werden einige Elemente des ursprünglichen Prüfstands weiter verwendet. Als Ausgangsbau teil der Konstruktion dient die zu verwendende Vakuumkammer. Siehe folgende Abbildung 9 und Abbildung 42.



**Abbildung 42: Halbschnitt Vakuumkammer**

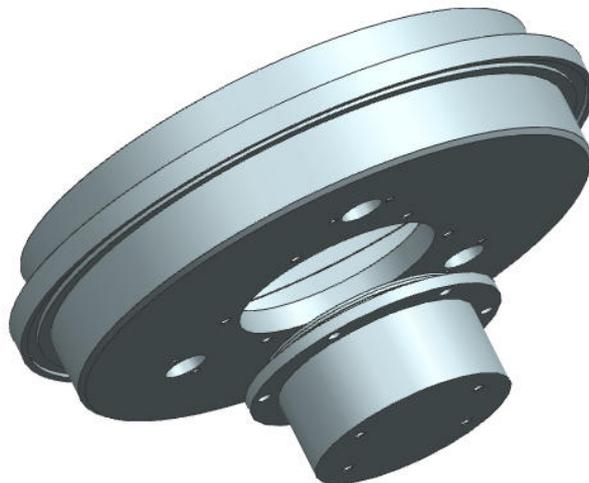
Der erste Schritt ist das Hinzufügen von Einschweißteilen (in Abbildung 42 rot gekennzeichnet), welche später für die Montage der Induktionsheizung erforderlich sind (siehe Kapitel 8).

Nun werden die beiden Lagerschilde hinzugefügt. Abbildung 43 zeigt das *Lagerschild oben*. Dieses ist eine Schweißkonstruktion und besitzt eine Zentrierfläche (siehe Abbildung 45). Die beiden Ausnehmungen auf der Seite werden zur vollständigen Evakuierung der Kammer benötigt.



**Abbildung 43: Lagerschild oben**

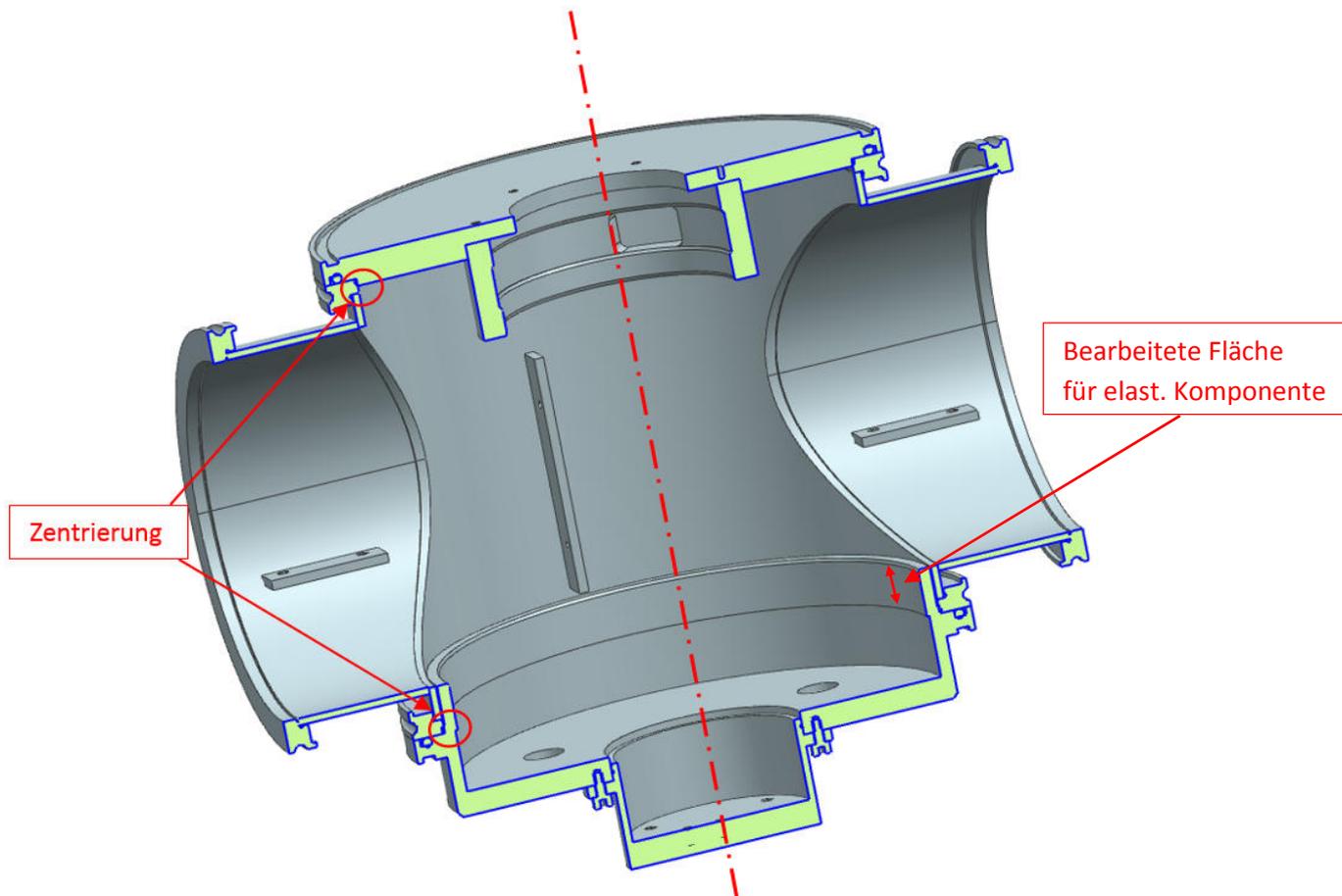
Abbildung 44 zeigt das *Lagerschild unten*. Dieses besteht aus zwei Teilen, welche miteinander verschraubt werden. Es besitzt ebenso eine Zentrierfläche (siehe Abbildung 45). Die drei größeren Bohrungen sind für die später hinzukommenden Federn vorhanden. Das Bauteil ragt ein Stück in das Gehäuse hinein (siehe Abbildung 45). Dies hat den Grund, dass den elastischen Komponenten des *Lagerschilds innen* eine entsprechende Oberflächengüte in Bezug auf Rauheit (Ra 0,4) und Rundheit zur Verfügung gestellt wird und damit eine axiale Beweglichkeit unterstützt wird.



**Abbildung 44: Lagerschild unten**

Der Halbschnitt Abbildung 45 zeigt den Zusammenbau von den beiden Lagerschilden mit der Vakuumkammer. Die rot gekennzeichneten Flächen sind die Zentrierflächen. Es ist von

großer Wichtigkeit, dass die Lagerschilde konzentrisch zueinander liegen, da die Lagersitze eine genaue Koaxialität zueinander erfordern.



**Abbildung 45: Einbau Lagerschild oben & Lagerschild unten**

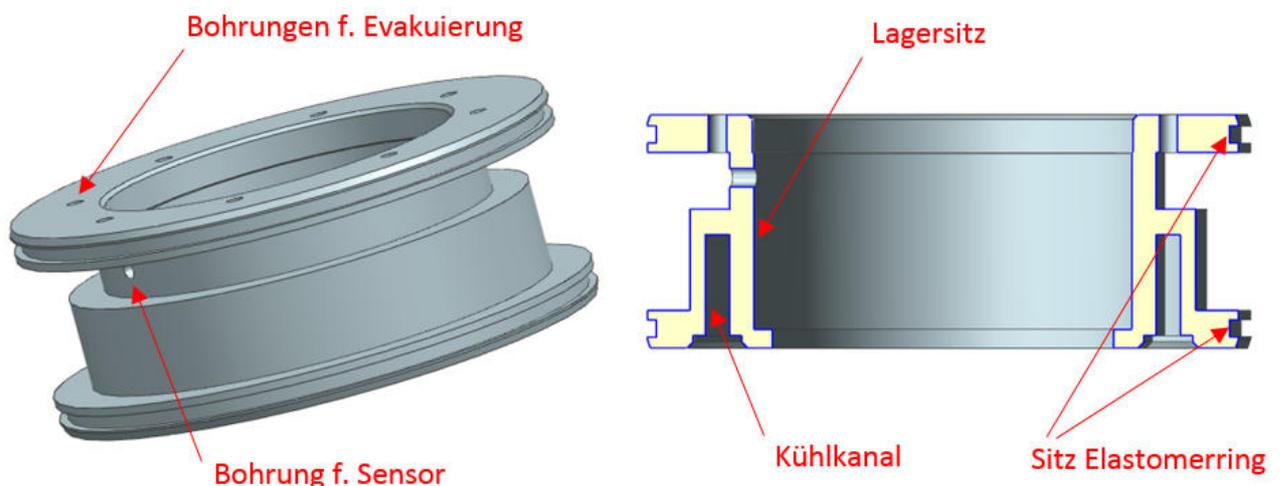
Als nächster Schritt folgt das Zusammenstellen der nachgiebigen Aufhängung des Prüfstands. Diese setzt sich aus den folgenden Bauteilen zusammen.

- Lagerblock (Abbildung 46)
- Lagerschild innen (Abbildung 47)
- Hohlwelle (Abbildung 49)
- Spannscheibe (zum Fixieren der Lager)
- Wellenmutter (zum Fixieren der Lager)
- 3x Wassermantel
- 2x Schrägkugellager 71908 CDGA/P4A (Anhang 17.9)
- 1x wechselbares „Prüfkugellager“ (in diesem Fall Schrägkugellager 71908 CDGA/P4A) (Anhang 17.9)

- Sicherungsring
- 4x Fettschutzscheibe
- Drucknippel (für den Kühlmitteltransport)
- Diverse O-Ringe
- Flachdichtungen

Der *Lagerblock* (Abbildung 46) ist eines der komplexeren Teile der Konstruktion. Er ist das Verbindungselement zwischen Welle inklusive Lagern und dem Gehäuse (*Lagerschild oben*). Außerdem werden hier die elastischen Komponenten, also die O-Ringe und Flachdichtungen angebracht. Die Bohrung in Radialrichtung ist für die Sensorik erforderlich (Kapitel 6.2). Die Ausnehmung auf der Unterseite ist der Kühlkanal. Hier wird die Wärme an das durchfließende Kühlmedium abgegeben und aus der Kammer abtransportiert. Die Bohrungen auf der Oberseite sind für die vollständige Evakuierung vorhanden. Wären diese nicht vorhanden, so würde die verbleibende Luft über die Lager abgesaugt werden, was zur Folge hat, dass das Schmierfett aus den Lagern gezogen werden würde.

Aus maschinendynamischer Sicht ist es erforderlich, dass der Lagerblock möglichst leicht ausgeführt wird (um die Trägheit des Systems zu verringern). Daher wird einerseits Aluminium 7075 verwendet, welches nicht nur den Gewichtsvorteil gegenüber Edelstahl hat, sondern auch Wärme gut leitet und diese somit schnell weiter transportieren kann. Andererseits wird Material eingespart, was an den seitlichen Ausnehmungen zu erkennen ist. Dies erbringt eine zusätzliche Gewichtsreduktion.



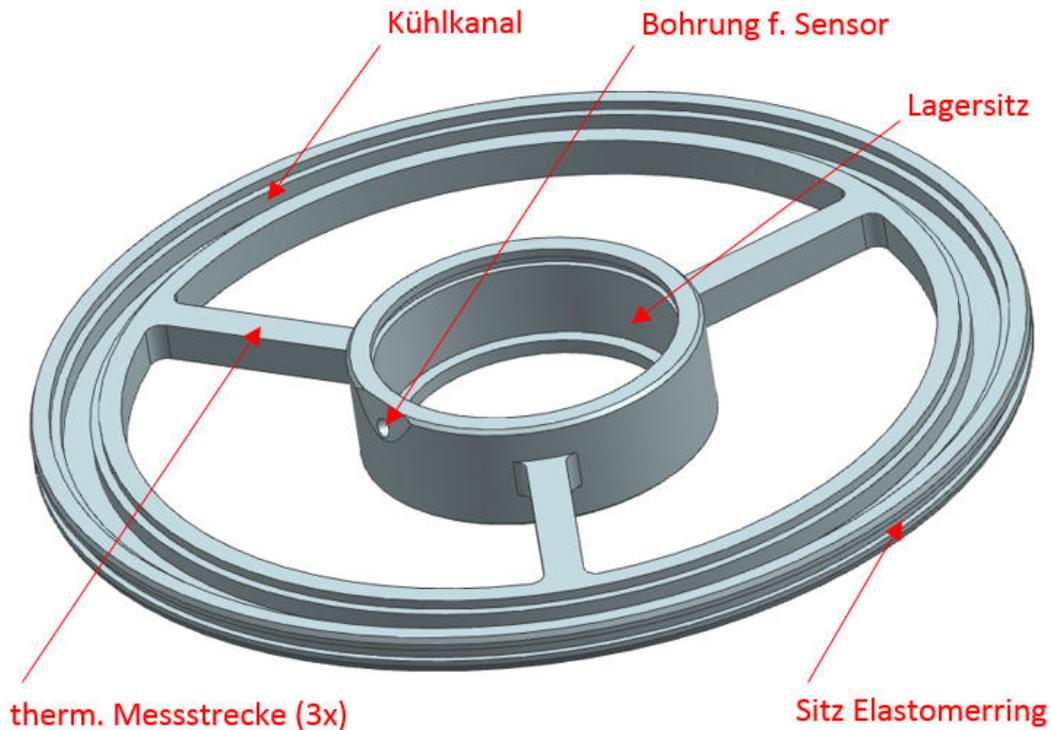
**Abbildung 46: Lagerblock & Halbschnitt Lagerblock**

Die Entwicklung des *Lagerschilds innen* weist einige Komplikationen auf. Es soll, wie der *Lagerblock*, aus maschinendynamischer Sicht eine möglichst geringe Masse besitzen, was den Einsatz eines leichten Materials wie etwa Aluminium fordert. Gegensätzlich ist es von größter Wichtigkeit einen hohen Temperaturgradienten sicherzustellen, um brauchbare Messgenauigkeiten zu erhalten. Dies wiederum erfordert den Einsatz eines Materials mit einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit, wie beispielsweise Edelstahl 1.4301 (Anhang 17.3).

Nun muss ein Kompromiss zwischen leichter Konstruktion und großen Temperaturgradienten gefunden werden. Die Ausgangsform des *Lagerschilds innen* war eine aus Edelstahl 1.4301 gefertigte Vollscheibe. Die Lösung dieses Dilemmas ist die Konstruktion eines Speichenrads (siehe Abbildung 47). Die folgenden Punkte begründen diese Wahl:

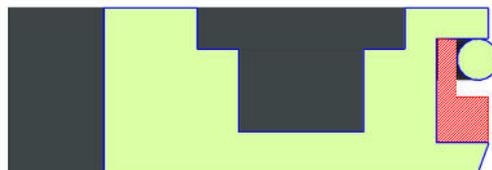
1. Durch das Wegnehmen von Material, zur Erzeugung der Speichen, wird Gewicht eingespart.
2. Eine winkelsymmetrische Anordnung ist wichtig, um thermische Senken zu vermeiden.
3. Ein definierter, quadratischer Querschnitt vereinfacht die Durchführung der Messung sowie die weiteren Berechnungen (siehe Kapitel 10.2).
4. Es entsteht durch die Ausführung der Speichen ein geringer Querschnitt über den die Wärme geleitet wird. Dadurch erhöhen sich die Temperaturgradienten, weshalb ein Material wie Aluminium 7075, mit einem 10-fach größeren Wärmeleitwert als Edelstahl 1.4301, verwendet werden kann. Genaueres dazu siehe Kapitel 10.2.

Somit ist ein Messflansch aus Aluminium 7075 mit definiertem Querschnitt und geeignet hohem Temperaturgradienten entstanden. Weiters befindet sich auf der Oberseite des Bauteils ein Kanal für die Kühlung (um den Wärmestrom vom Messflansch weiterzuleiten und somit einen Temperaturstau zu vermeiden) sowie eine seitliche Bohrung, welche zur Temperaturmessung des Lageraußenrings benötigt wird (siehe Kapitel 6.2). An der Außenseite ist eine Nut zur Anbringung der elastischen Komponenten vorhanden.



**Abbildung 47: Lagerschild innen**

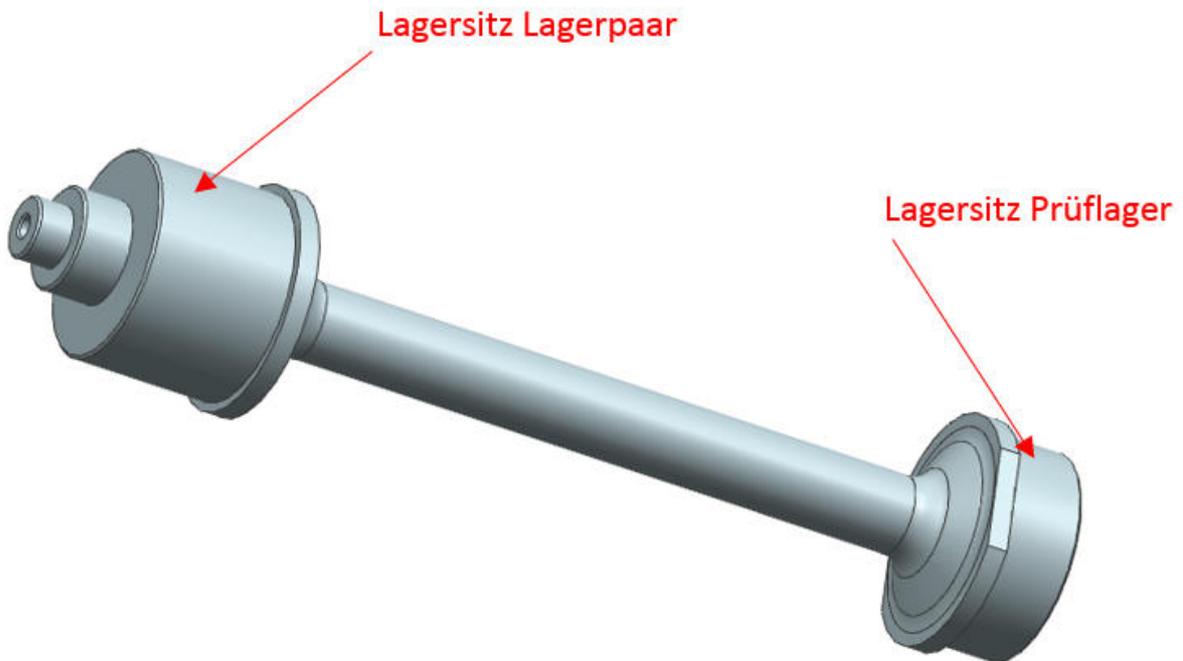
Damit die Möglichkeit besteht verschiedene O-Ringe und O-Ring-Dicken zu verwenden, wird eine größere Nut als nötig in das Lagerschild gedreht und je nach verwendeten O-Ring die Nutabmessungen mittels beilegen unterschiedlicher Elemente (z.B.: eine Stahlhülse) verändert. Somit kann die Nachgiebigkeit des Lagersitzes in radialer Richtung und somit die Eigenfrequenz des Systems beeinflusst werden. Das Prinzip ist in der folgenden Abbildung 48 zu erkennen.



**Abbildung 48: Nutsituation Lagerschild\_innen (Detailansicht)**

Abbildung 49 zeigt die zum Einsatz kommende *Hohlwelle* (Edelstahl 1.4301). Hier werden die Lager aufgespresst, welche schlussendlich mit dem Lagerblock und dem Lagerschild innen verbunden werden. Außerdem ist die Welle mit der Antriebseinheit verbunden, um das zu testende Lager auf die gewünschte Drehzahl zu bringen. Die Beheizung und die Messung des zufließenden Wärmestroms mittels Pyrometern (siehe Kapitel 6.2) erfolgen ebenfalls an der Welle. Der Grund, warum die Welle hohl ist, lässt sich wieder mit Hilfe des

Temperaturgradienten erklären. Auch hier ist es für das Erreichen eines brauchbaren Messergebnisses notwendig einen ausreichend hohen Temperaturunterschied zwischen den beiden Pyrometermesspunkten zu generieren. Dies erfolgt durch Minderung des Wellenquerschnitts, weshalb eine Bohrung hinzugefügt wird.



**Abbildung 49: Hohlwelle**

Die nachfolgenden zwei Abbildungen (Abbildung 50 und Abbildung 51) zeigen Explosionsdarstellungen der *Hohlwelle* inklusive sämtlicher Anbauteile, wie *Lagerblock*, *Lagerschild innen*, nachgiebige Elemente, usw. Zum Zweck der Übersichtlichkeit wurde das Gesamtbauteil in zwei Teile unterteilt.

Die schwarz eingefärbten Elemente sind die nachgiebigen Komponenten, wie z.B.: O-Ringe oder Flachdichtungen.

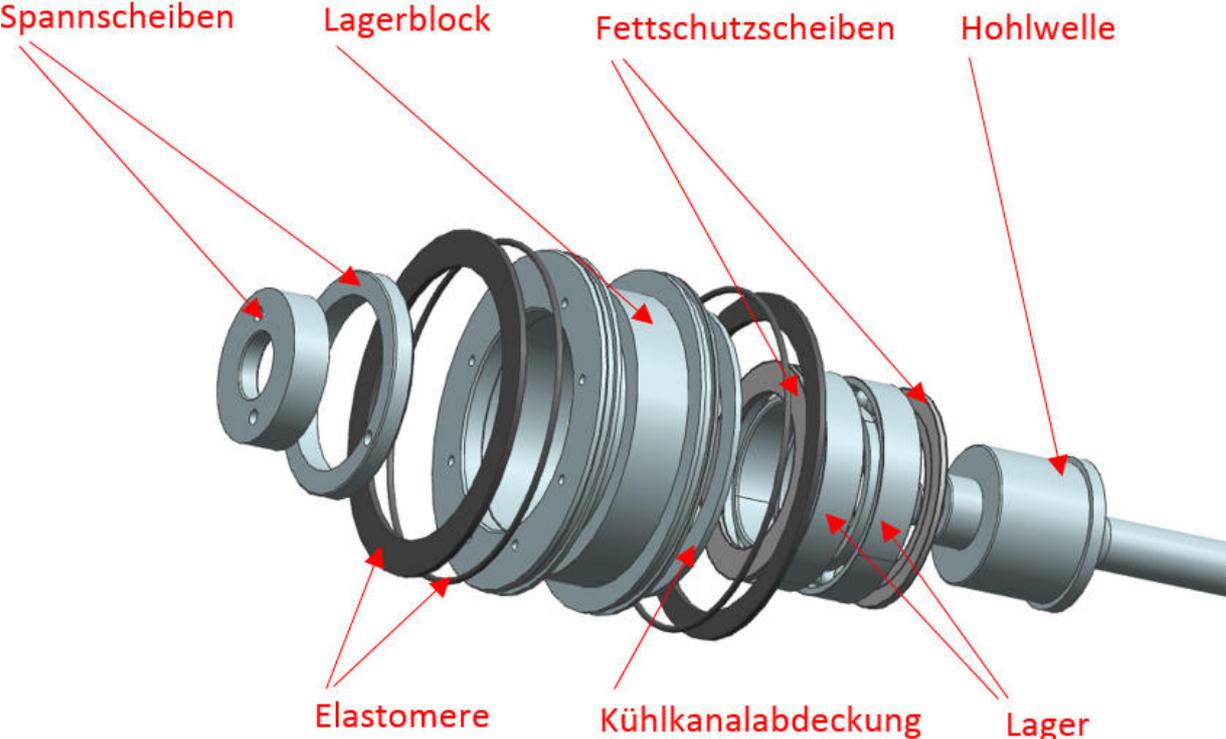
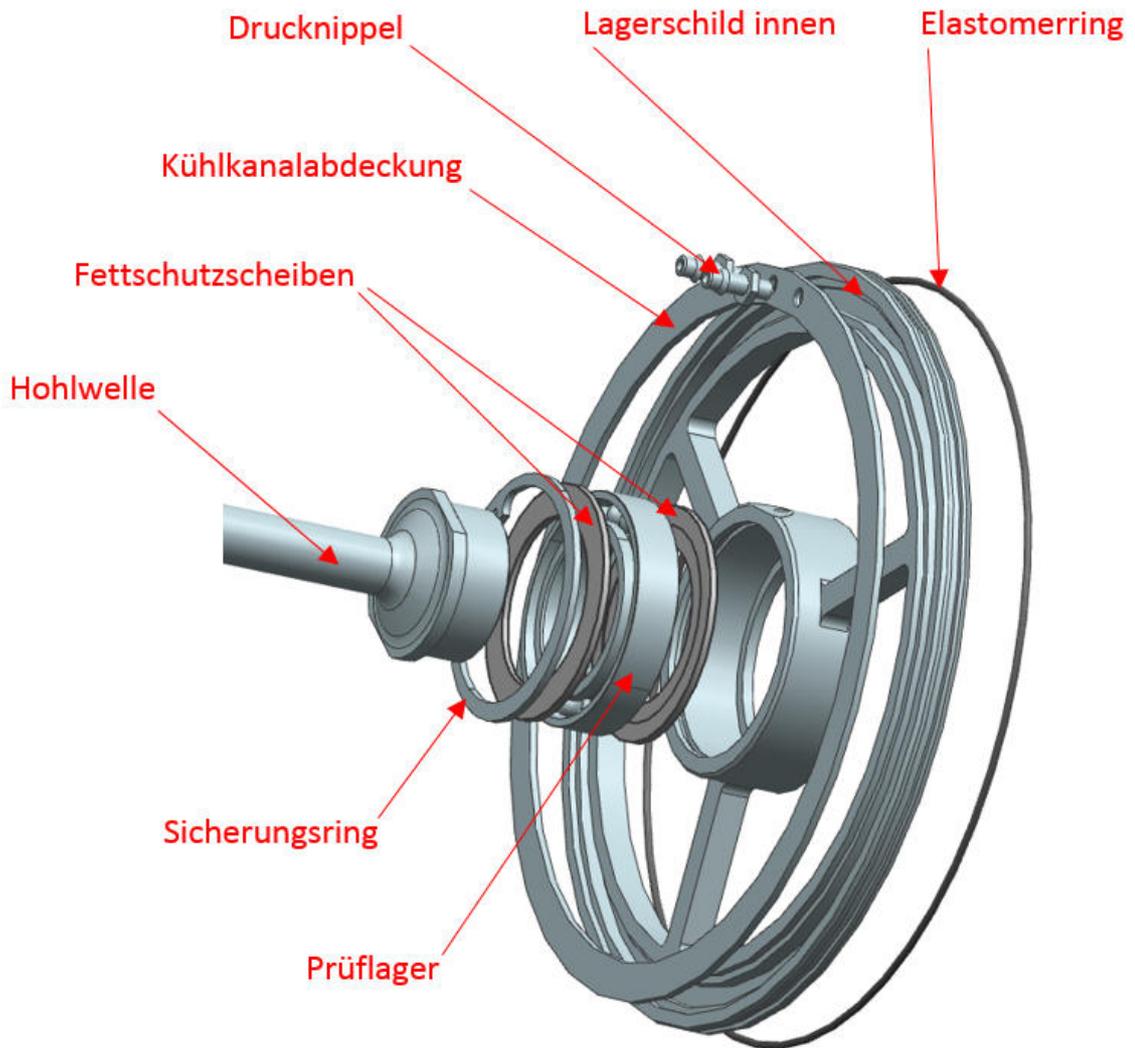
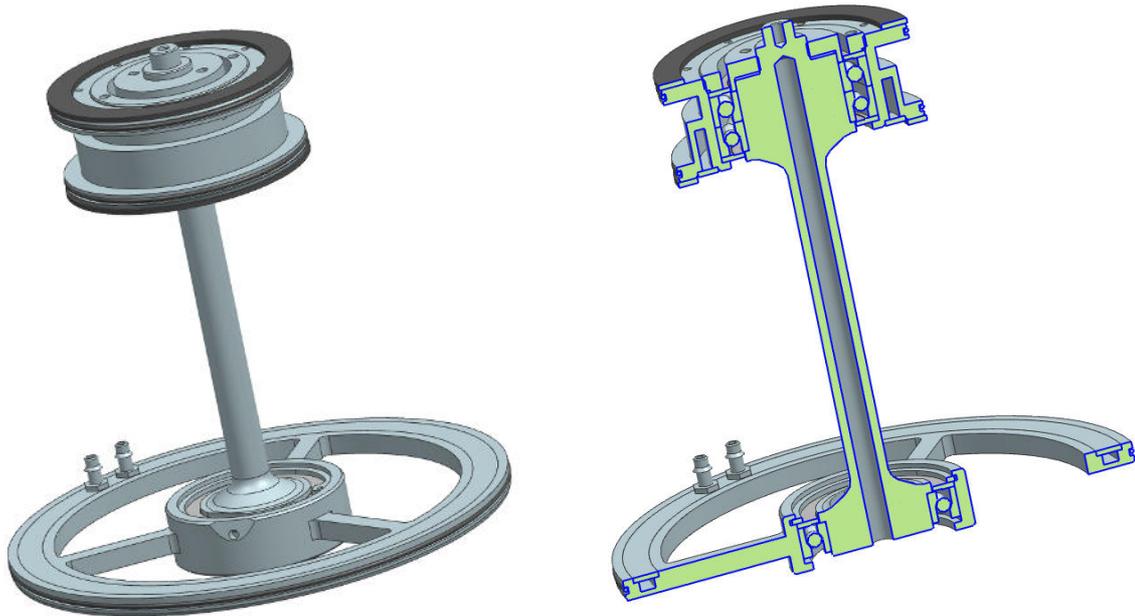


Abbildung 50: Explosion Lagerblock mit Welle



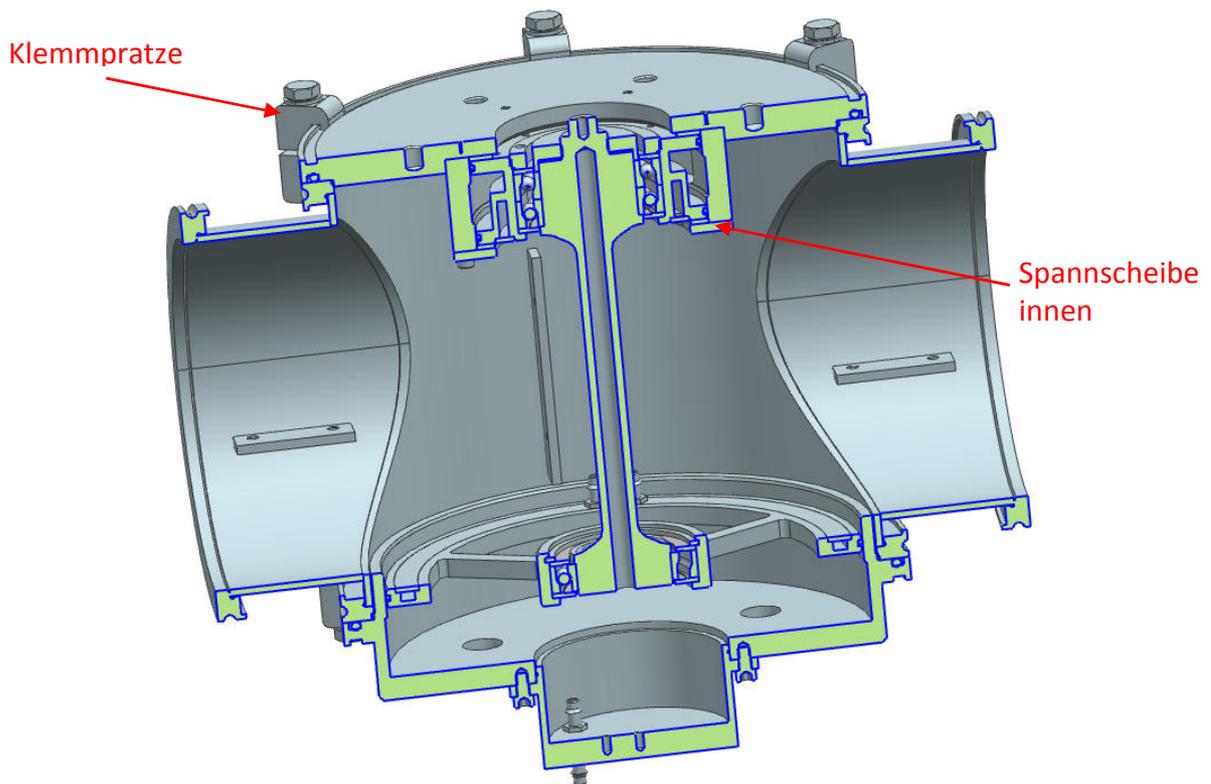
**Abbildung 51: Explosion Lagerschild innen mit Welle**

In Abbildung 52 ist abschließend noch die gesamte Baugruppe zusammengebaut zu sehen. Einerseits in einer Vollansicht und andererseits im Halbschnitt um die Strukturen besser erkennen zu können.



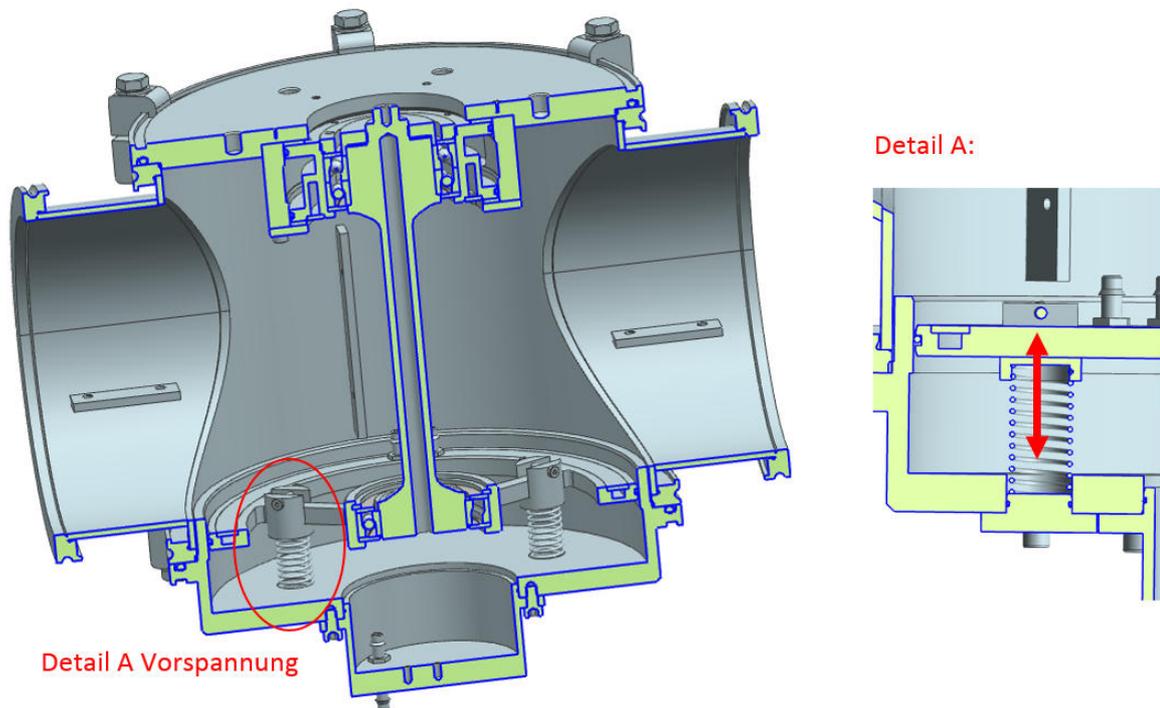
**Abbildung 52: Zusammenbau von Hohlwelle, Lagern und wassergekühlten Lagersitzen mit nachgiebiger Elastomer-Aufhängung**

Im nächsten Schritt werden alle bis jetzt erwähnten und erklärten Bauteile zusammengefügt. Hierbei kann man die Elemente des in Kapitel 4.3.5 ausgewählte Konzepts sehr gut erkennen. Wie in Abbildung 53 ersichtlich ist, wurde der eben beschriebene Zusammenbau (*Hohlwelle, Lager, Lagersitze,...*) zur Vakuumkammer hinzugefügt und mit einer *Spannscheibe innen* und Schrauben befestigt. Das *Lagerschild oben* und das *Lagerschild unten* werden mittels „*Klemmpratzen*“ an der Vakuumkammer fixiert.



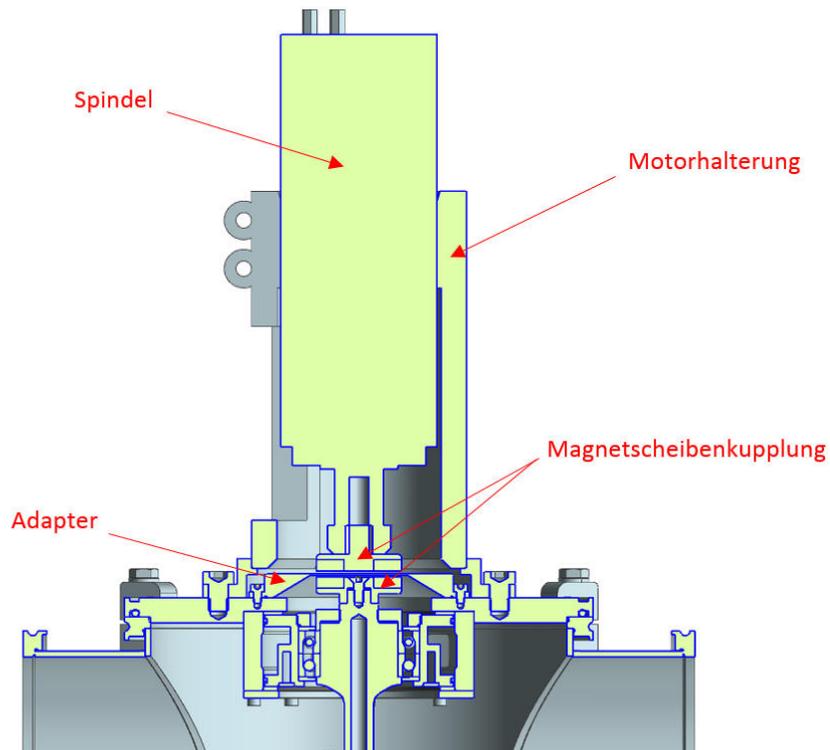
**Abbildung 53: Zusammenstellung Vakuumkammer und Aufhängung**

Anschließend werden die Elemente zur Einstellung der Vorspannung angebracht. Dies wird in Abbildung 54 illustriert. Die Bauteile sind drei Adapter aus Kunststoff, welche eine zu vernachlässigende Wärmeleitung im Vergleich zum Messsteg aufweisen und mittels einer Schraube am Steg des Messflansches fixiert werden. Außerdem werden drei austauschbare Druckfedern und jeweils ein Vakuumdichter Deckel benötigt. Durch Auswechseln der Federn (stärkere, schwächere Federn) kann die Vorspannung variiert werden. Eine Feineinstellung wird erreicht, indem man geeignete Plättchen in verschiedenen Stärken zulegt. Somit ist eine einfache Grob- und Feinjustierung möglich.



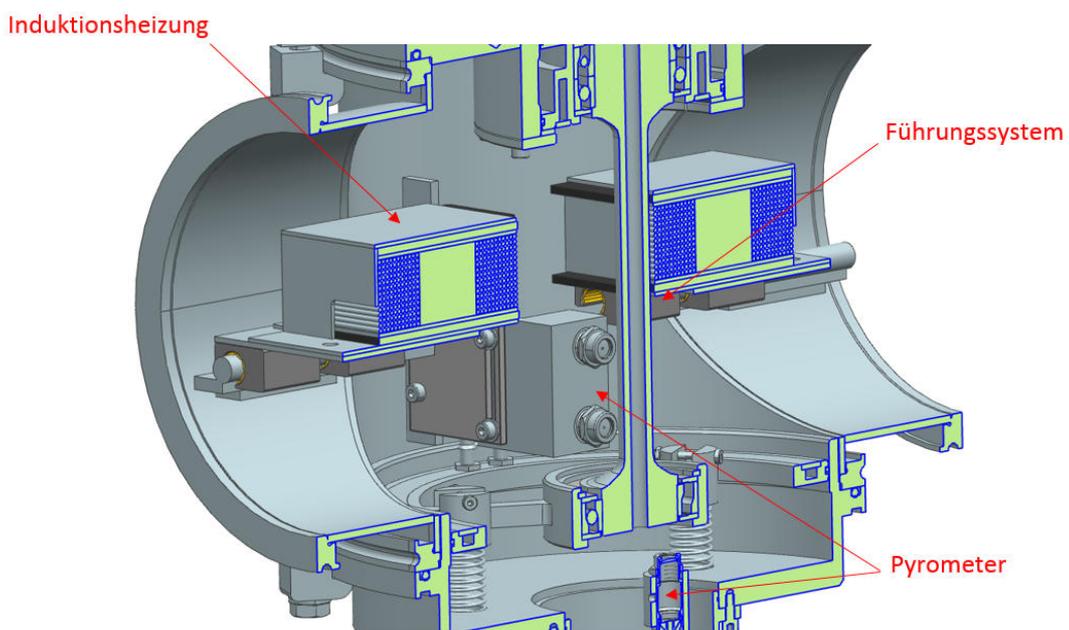
**Abbildung 54: Einfügen der Vorspannelemente**

Nun wird die Antriebseinheit zum System hinzugefügt. Sie besteht aus den zwei Hälften einer Magnetscheibenkupplung, einer Antriebsspindel mit der dazugehörigen Halterung und einem Adapter, welcher als Spalttopf fungiert. Die Magnetkupplungshälfte am Ende der Welle wird mittels einer M5 Senkkopfschraube stirnseitig befestigt. Der Adapter hat eine Doppelfunktion. Erstens dichtet er das Gehäuse gegen die Umgebung ab (im Gehäuse herrscht Vakuum während des Messbetriebs) und zweitens trennt er die beiden Magnetkupplungshälften. Je größer der Spalt zwischen den beiden Hälften wird, umso kleiner wird das Moment, welches übertragen werden kann (Anhang 17.12). Die andere Hälfte der Kupplung wird in die Spindel eingespannt und diese wiederum in die Motorhalterung, welche am Lagerschild oben befestigt wird. Die folgende Abbildung 55 zeigt die eben beschriebene Antriebseinheit.



**Abbildung 55: Antriebseinheit**

Als nächstes werden die Induktionsheizung mit dem Führungssystem und die Pyrometer angebracht (Abbildung 56). Somit kann die Welle beheizt und die Temperaturmessungen durchgeführt werden. Detaillierte Informationen über die Induktionsheizung und der Sensorik in den folgenden Kapiteln: Kapitel 8 (Induktionsheizung) und Kapitel 6.2 (Sensorik).



**Abbildung 56: Prüfstand mit bereits eingebauten Komponenten**

Schlussendlich müssen noch die beiden seitlichen Deckel angebracht werden, um die Vakuumkammer zu vollenden. In diesen beiden Deckeln befinden sich sämtliche Durchführungen für die elektrischen Komponenten, sowie der Anschluss für die Vakuumpumpe. Drucknippel für die Durchführung der Wasserversorgung der Kühlkanäle sind ebenso in diesen seitlichen Deckeln verbaut (sowie am *Lagerschild unten innen*). Die elektrischen Durchführungen bestehen aus SUB-D Steckern, welche jeweils 25 Pins besitzen und in eine gefräste Ausnehmung mittels Epoxydharz eingeklebt werden. Somit ist eine einfache, kostengünstige und vakuumdichte Steckverbindung vorhanden. Mehr dazu in Kapitel 9.3. Außerdem werden noch die bereits vorhandenen Füße angebracht. Abbildung 57 zeigt den kompletten Prüfstand.

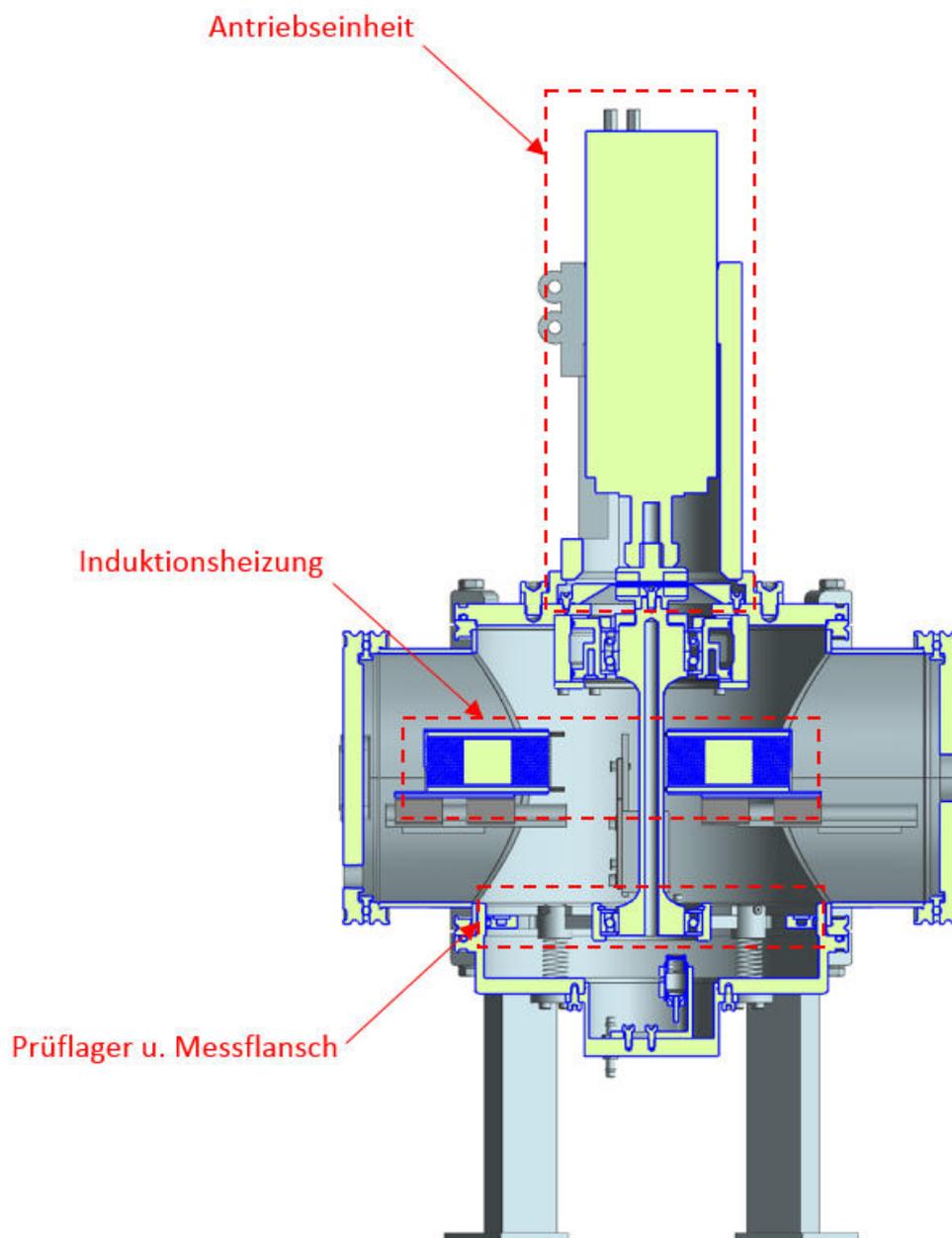


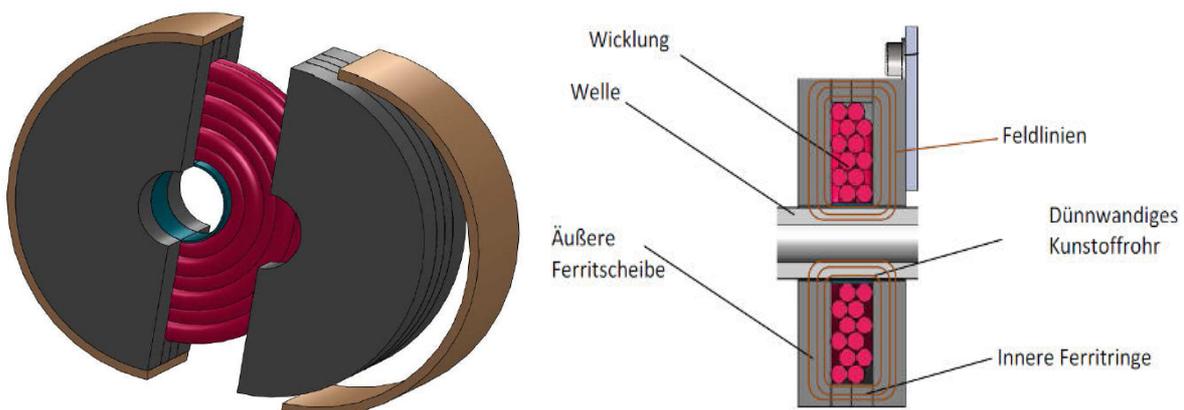
Abbildung 57: Gesamter Aufbau

## 8. Entwicklung einer Induktionsheizung

In diesem Kapitel wird die Induktionsheizung, welche in der ursprünglichen Prüfstandskonfiguration (Stand 2013) verwendet wurde, analysiert, verbessert und auf die neuen Gegebenheiten angepasst.

### 8.1. Analyse der Ausgangssituation

Die Erwärmung der Welle mittels einer Induktionsheizung geschieht nach folgendem Prinzip: In der Welle werden Wirbelstromverluste erzeugt, welche die Welle erwärmen. Dies erfolgt über ein sich zeitlich rasch änderndes elektromagnetisches Feld. Es muss darauf geachtet werden, dass die Feldlinien axial durch die Welle verlaufen, um kein ungewolltes Bremsmoment zu erzeugen (Wirbelstrombremse). Mit Hilfe von Ferritplatten werden die Feldlinien gerichtet durch die Welle geleitet. Abbildung 58 zeigt nochmals die Grundaufbau der Heizung. (Kopeinig, 2012)



**Abbildung 58: Grundaufbau Induktionsheizung (Kopeinig, 2012, S. 44f)**

Wie in Kapitel 4.1 schon erwähnt, wurde die Induktionsheizung rund um die, zuvor in die Vakuumkammer eingebaute, Welle gewickelt. Der Wickelvorgang gestaltete sich als sehr aufwendig, da praktisch kein verfügbarer Platz vorhanden war, um manuelle Arbeiten innerhalb des Gehäuses durchzuführen. Außerdem konnte die einmal gewickelte Heizung nur durch Zerstörung (bzw. durch Abwickeln) entfernt werden.

Fazit der Analyse ist, dass die Induktionsheizung an sich sehr gut funktioniert, jedoch der Einsatz in dieser Form einen nicht tragbaren Fertigungsaufwand, sowie eine sehr eingeschränkte Flexibilität aufweist.

## 8.2. Anforderungen an die überarbeitete Version der Heizung

Zur Verbesserung der Übersicht werden die einzelnen Anforderungen an die „neue“ Induktionsheizung nochmals detailliert zusammengefasst und beschrieben.

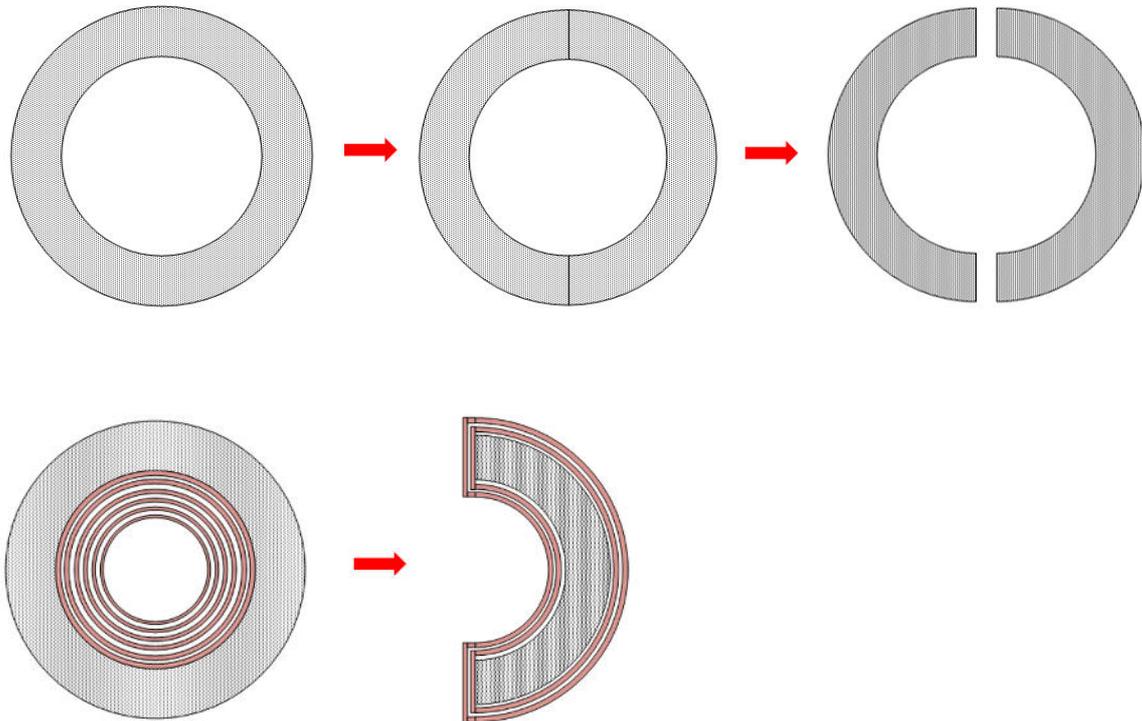
1. **Fertigung außerhalb der Vakuumkammer:** Es ist auf jeden Fall bei der Erstellung eines Konzepts darauf zu achten, dass die Heizung außerhalb der Kammer gewickelt und fertiggestellt werden kann. Erst dann soll sie im Prüfstand montiert werden.
2. **Teilbare Konstruktion:** Wenn das Bauteil nicht mehr aus einem Teil besteht sondern aus vorzugsweise zwei, vereinfacht das den Einsatz, sowie das Handling im Prüfbetrieb. Die Heizung Teilbar zumachen bedeutet aber auch, dass der Trenn- und Fügevorgang öfters durchgeführt wird und somit unkompliziert und schnell vollzogen sein soll.
3. **Entfernen der gesamten Heizung:** Müssen Sensoren neu adjustiert werden, Lager getauscht werden oder ähnliches, so ist es von Vorteil, die Induktionsheizung für diesen Zeitraum komplett aus der Vakuumkammer zu entfernen. Dies soll ebenso einfach und unkompliziert vonstattengehen.

Zusammenfassend kann die Aussage getroffen werden, dass eine kompakte, mehrteilige Induktionsheizung gefordert ist, welche einfach anzubringen und zu entfernen ist.

## 8.3. Abgeleitetes Konzept

Nun, da die Anforderungen klar definiert sind, ist der nächste Schritt ein mögliches Konzept für die Konstruktion der Induktionsheizung abzuleiten. Mit Hilfe des Instituts für *Elektrische Messtechnik und Messsignalverarbeitung* der TU-Graz wurde eine neue Version der Heizung entwickelt.

Als erstes wurde versucht den Ferritring, welcher die Wicklungen bei der ursprünglichen Prüfstandskonfiguration umfasst (siehe Abbildung 58) zu halbieren und separat zu umwickeln. Dadurch ergeben sich zwei Hälften, die später zusammengefügt werden können. Abbildung 59 zeigt die einzelnen Arbeitsschritte.

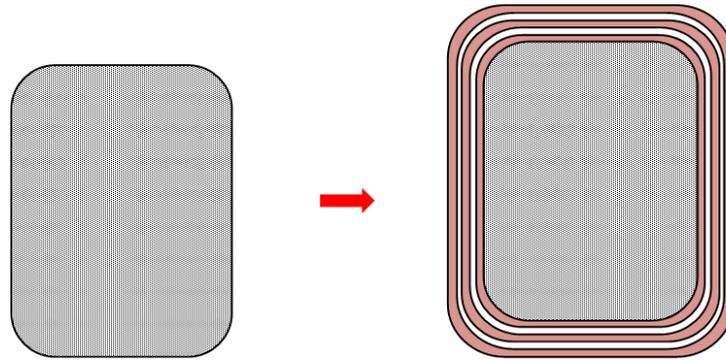


**Abbildung 59: Ferritring Bearbeitung**

Nach genauerer Überlegung stellt man fest, dass es sehr schwierig wird, einen halben Ring so zu umwickeln, dass die Wicklungen alle eng anliegen. Besonders auf der Innenseite und den Ecken ist es sehr problematisch und aufwendig.

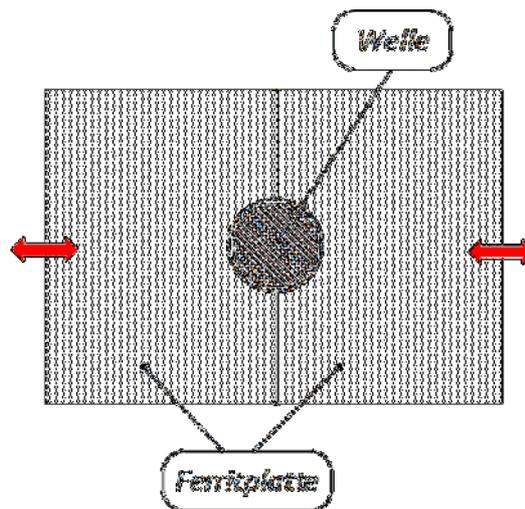
Außerdem muss die Wicklungsdicke (bezogen auf die ursprüngliche Heizung) gleich bleiben, um die gleiche Heizleistung erreichen zu können. Dadurch wird das Heizungselement so groß, dass es aus platztechnischen Gründen nicht mehr in die Vakuumkammer passt.

Da sich der Einsatz eines Halbrings als Ferritkern als sehr problematisch darstellt, wird auf einen etwas einfacher zu umwickelnden Kern ausgewichen. Der neue Kern ist rechteckig und besitzt abgerundete Kanten (Abbildung 60). Das Umwickeln dieses Ferrits stellt sich als äußerst einfach heraus und bringt das erwünschte Ergebnis.



**Abbildung 60: Rechteckiger Ferritkern**

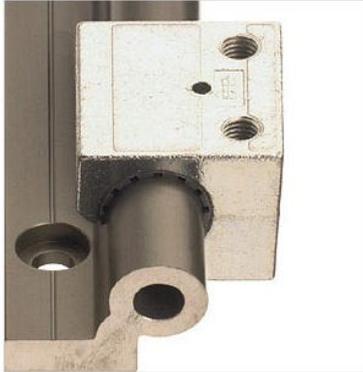
Zur gezielten Lenkung der Feldlinien, müssen Ferritplatten oberhalb und unterhalb der Wicklungen angebracht werden. Die zwei Heizungshälften werden bei der Welle zusammengeführt und zwar so, dass die gerade erwähnten Platten zusammenstehen (siehe Abbildung 61).



**Abbildung 61: Anordnung Ferritplatten**

Um das Zusammenfügen bzw. Trennen einfach zu gestalten, werden Linearführungen eingesetzt. Dies hat den Vorteil, dass die Induktionsheizungshälften einmal an den Führungsschlitten befestigt und dann beliebig in einer Ebene verschoben werden können. Es werden außerdem Gleitschlitten verwendet, welche mittels einer Madenschraube fixiert werden können. Damit ist es möglich die Heizungshälften in die gewünschte Position zu bringen und anschließend ganz einfach zu fixieren. Des Weiteren kann ein solcher Schlitten auch ohne Probleme von der Führungsschiene herunter genommen bzw. wieder hinauf gegeben werden. Dies bedeutet, dass die einzelnen Teile der Induktionsheizung jederzeit

und ohne einen erwähnenswerten Aufwand aus dem Prüfstand entfernt werden können. Das folgende Bild zeigt die verwendete Führungsschiene sowie einen der verwendeten Gleitschlitten.



**Abbildung 62: Führungsschienen mit Gleitschlitten (igus, 2015)**

Somit steht das Konzept für eine kompakte Induktionsheizung, welche wie ein „Modulsystem“ mit geringstem Aufwand verschoben, fixiert oder entfernt werden kann. Noch zu erwähnen ist, dass jedes Heizelement einen Anschluss an ein Netzgerät benötigt und dafür die Leitungen aus der Kammer herausgeführt werden müssen. Für die Durchführungsmethode der Leitung siehe Kapitel 9.3.

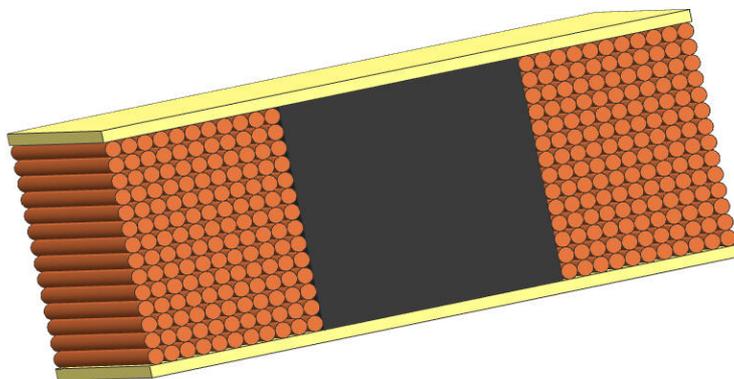
## 8.4. CAD-Konstruktion des ausgewählten Konzepts

Da nun ein Konzept entwickelt wurde, welches alle gestellten Anforderungen erfüllt, kann mit der CAD-Konstruktion der Heizung und der nachfolgenden Fertigung (siehe Kapitel 9.1) begonnen werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird der Aufbau der Induktionsheizung Schritt für Schritt vorgenommen und beschrieben.

Gestartet wird mit den Grundelementen: Dem Ferritkern und den beiden Ferritplatten, welche die Feldlinien in die gewünschte Richtung lenken.

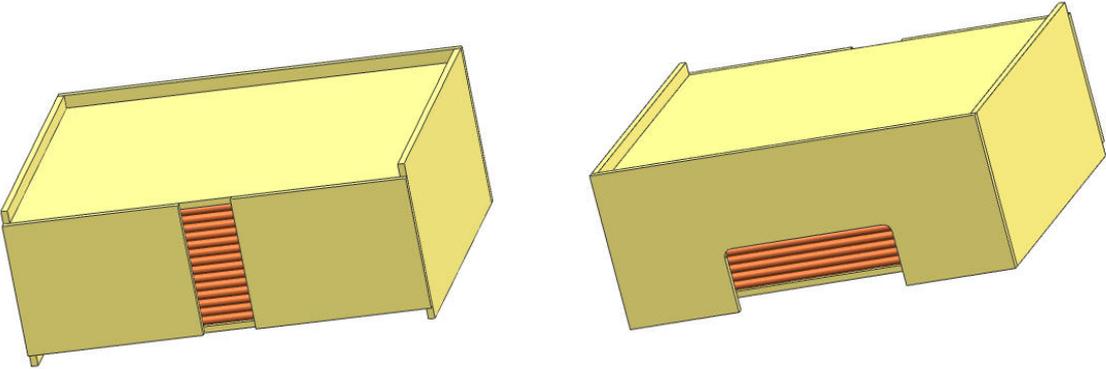
Als nächstes muss ein Gehäuse hinzugefügt werden, welches die Wicklungen einfasst und in Position hält. Dafür werden auf und unter dem Ferritkern Glasfaserplatten befestigt. Diese haben sich beim ursprünglichen Modell bereits bewährt, weshalb wieder auf diesen Werkstoff zurückgegriffen wird.

Es folgt das Umwickeln des Kerns mittels einer 2 mm starken Hochfrequenzlitze. In Abbildung 63 sind die eben beschriebenen Schritte zu erkennen.

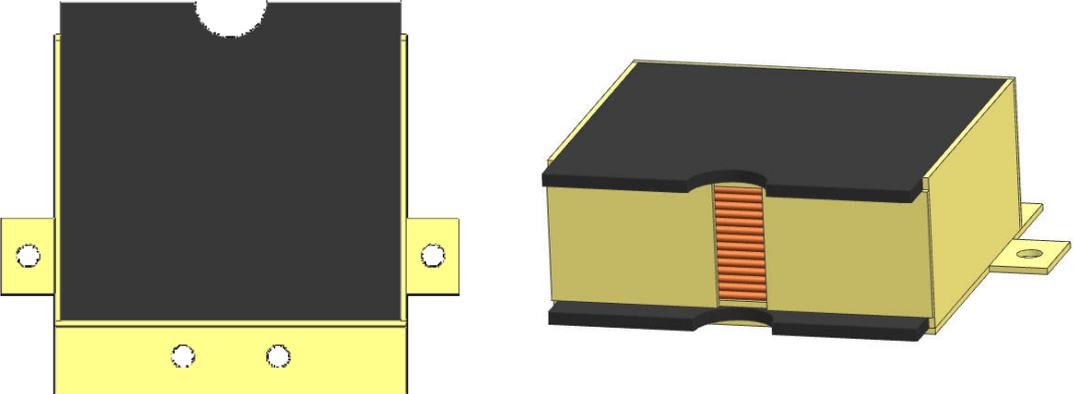


**Abbildung 63: Halbschnitt nach der Wicklung**

Als nächstes wird die Wicklung mittels Glasfaserplatten fixiert und die Ferritplatten hinzugefügt. Um den Spalt zwischen Welle und Ferrit möglichst klein zu halten, wird vorne aus platztechnischen Gründen ein Teilstück freigelassen. Auf der Rückseite ist eine Öffnung um die Litzenanschlüsse herausführen zu können. Abschließend wird noch eine Platte auf der Unterseite angebracht, welche die Verbindung zwischen Heizelement und Lineareinheit darstellt. Siehe Abbildung 64 und Abbildung 65.



**Abbildung 64: Eingefasste Wicklung**



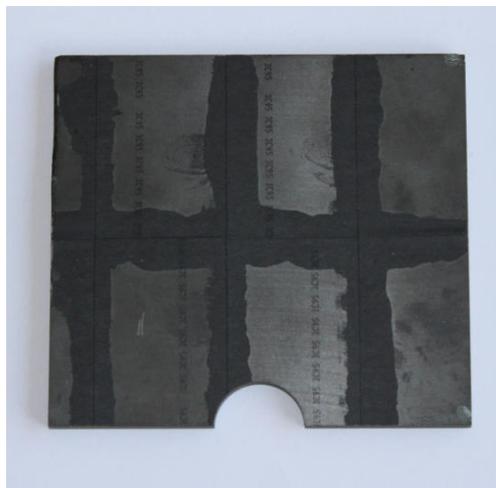
**Abbildung 65: Fertige Induktionsheizung**

## 9. Fertigung und Zusammenbau des Prüfstandes

In diesem Kapitel wird die Vorbereitung, Bearbeitung und Fertigung der einzelnen Komponenten, bis hin zur Fertigstellung des gesamten Prüfstands beschrieben und veranschaulicht.

### 9.1. Fertigung der Induktionsheizung

Die Induktionsheizung wird Schritt für Schritt, wie im Kapitel 8 beschrieben zusammengebaut. Bei der Fertigung der Ferritplatte stellte sich heraus, dass eine Platte in der geforderten Größe nicht standardmäßig verfügbar ist und diese extra gefertigt werden müsste, was wiederum unvermeidbar hohe Kosten und lange Lieferzeiten verursacht hätte. Aus diesem Grund werden Ferritplättchen in Standardgröße mit den Maßen 43 x 38 x 4 mm mittels 2 Komponenten Epoxidkleber (Datenblatt im Anhang 17.5) zusammengeklebt, sodass schlussendlich vier ausreichend große Ferritplatten mit den Maßen von ca. 112 x 86 x 4mm entstehen (Abbildung 66).



**Abbildung 66: Geklebte und bereits zugeschnittene Ferritplatte**

Die geklebten Platten werden anschließend mittels einer Wasserstrahlschneidemaschine auf die entsprechende Form zugeschnitten. Die Bearbeitung durch einen Wasserstrahl ist notwendig, da ein Ferrit ein äußerst hartes und sprödes Material ist und es bei einer konventionellen mechanischen Bearbeitung brechen würde. Die Rundungen des

vorhandenen Ferritblocks werden ebenfalls mittels eines Wasserstrahlschnitts erzeugt. Abbildung 67 zeigt dies.



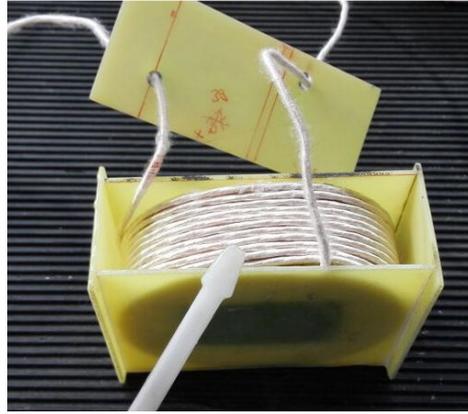
**Abbildung 67: Wasserstrahlschneiden Ferrit**

Nun werden die zugeschnittenen Glasfaserplatten mit dem Ferritkern verklebt. Um den Kleber auszuhärten, kommt das Gebilde für ca. 45 min, bei einer Temperatur von ca. 70 °C in einen Ofen. Abbildung 68 zeigt die mit Klebeband fixierten Bauteile beim Aushärten.



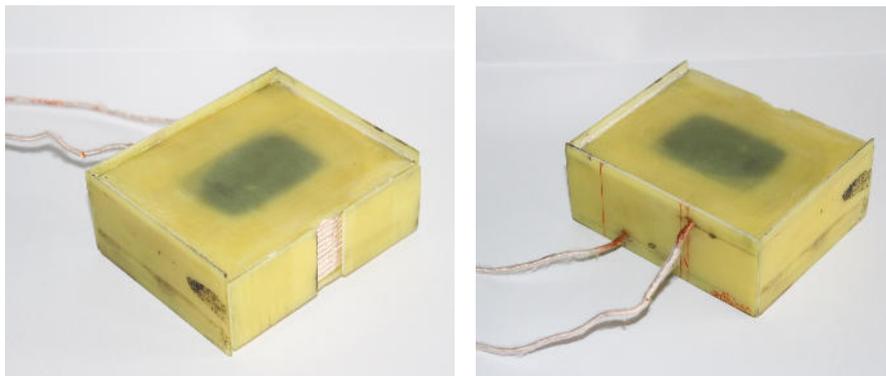
**Abbildung 68: Ankleben der Glasfaserplatten**

Es folgt das Wickeln der Heizung. Hierzu wird die 2 mm starke Hochfrequenzlitze Schicht für Schicht rund um den Ferritkern gewickelt. Es ist erforderlich den Anfang und das Ende genügend lang zu dimensionieren, um später keine Probleme bei der Verkabelung zu erhalten.



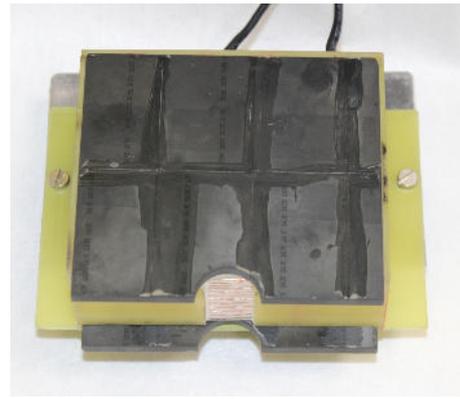
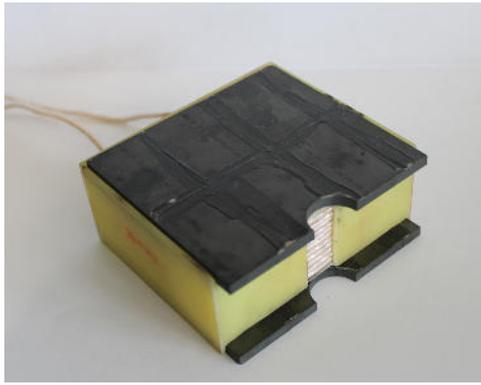
**Abbildung 69: Gewickelte Induktionsheizung**

Als nächstes kommen wieder der Epoxidkleber und die Glasfaserplatten zum Einsatz. Die Wicklung wird eingefasst und somit fixiert. Abbildung 70 zeigt die fertig, ummantelte Wicklungen.



**Abbildung 70: Einfassen der Wicklung**

Nun werden noch die zugeschnittenen Ferritplatten und das Verbindungsstück (Glasfaserplatte mit Löchern für die Verschraubung) angebracht und das kompakte Induktionsheizungsmodul (siehe Abbildung 71) ist vollendet.



**Abbildung 71: Fertiges Induktionsheizungsmodul**

## 9.2. Bearbeitung der Vakuumkammer

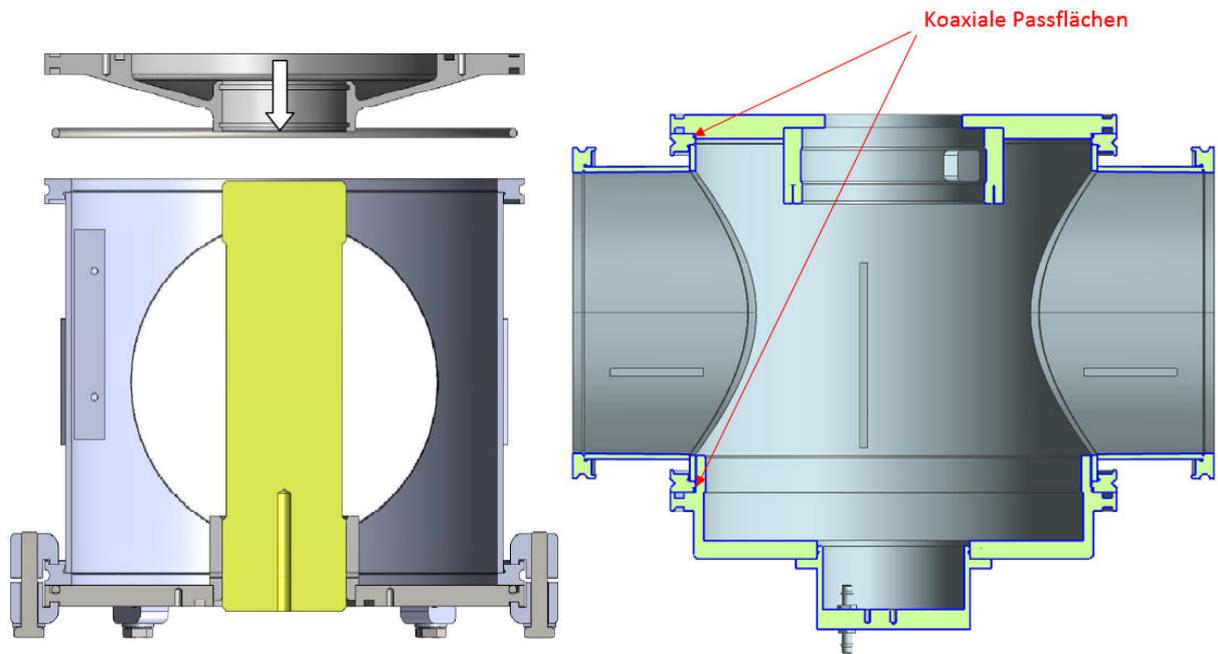
Die Vakuumkammer in der vorhandenen Ausführung ist nicht mehr ausreichend für die Anforderungen des ausgewählten Konzepts. Daher sind spezifische Modifikationen vorzunehmen.

Am Anfang werden jeweils zwei Blechkomponenten pro Seitenteil eingeschweißt (Abbildung 72). Dies ist die Aufnahme für die Schienen der Lineareinheiten und in weiterer Folge für die Induktionsheizung. Es ist darauf zu achten, dass alle Teile eine gemeinsame Ebene bilden, sodass in weiterer Folge die Heizungshälften exakt zusammengeführt werden können.



**Abbildung 72: Einschweißplatten**

Die Zentrierung der „alten“ Lagerschilde im ursprünglichen Prüfstand erfolgte mittels eines Zentrierdorns, siehe (Riepan, 2013) und (Kopeinig, 2012). Da dies allerdings umständlich und für unser Konzept nicht mehr tauglich ist, wurde entschieden die Vakuumkammer nachzubearbeiten und eine Zentrierung der beiden Lagerschilde (*Lagerschild\_oben*, *Lagerschild\_unten*) zueinander hinzuzufügen. Dies wurde von der Firma *Resch Prototyping GmbH* gefertigt. In Abbildung 73 ist links die ursprüngliche Zentrierung mittels Zentrierdorn (Kopeinig, 2012, S. 58) und rechts die Aktuelle mit den zwei koaxialen Passflächen zu sehen.



**Abbildung 73: ursprüngliche Zentrierung (links) (Kopeinig, 2012, S. 58) und "neue" Zentrierung (rechts)**

### **9.3. Fertigung der Stromdurchführungen**

Hier ist vor allem wichtig, eine vakuumdichte Durchführung der Messleitungen zu realisieren. Es gibt bereits fertige Durchführungen der Firma *Lemo*, welche nur mehr in eine vorgesehene Bohrung eingeschraubt werden müssen, jedoch sind diese unverhältnismäßig teuer. Im Ausgangsprüfstand sind Sub-D Stecker im Einsatz, welche so eingeklebt wurden, dass sie vakuumdicht sind. Diese Variante wird beibehalten und etwas verbessert. In zwei Stufen werden zuerst zwei Sub-D Stecker mit Stiftleisten zusammengelötet, anschließend in die vorgesehene Ausfräsung im Deckel eingesteckt, verklebt und mit Epoxydharz (Datenblatt im Anhang 17.6) ausgegossen. Dies gewährt eine vakuumdichte Steckverbindung. In Abbildung 74 ist dies zu erkennen.

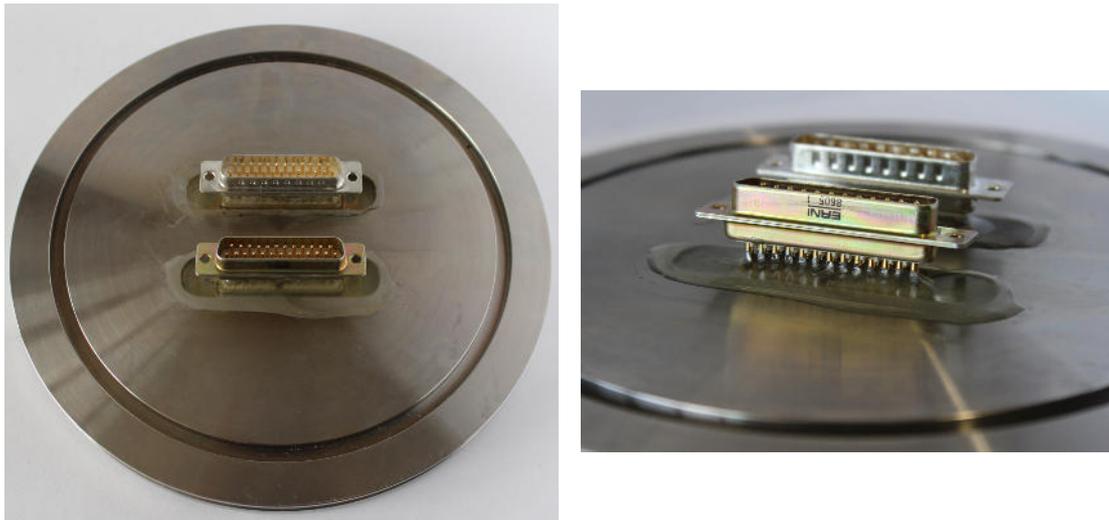


Abbildung 74: Sub-D Durchführung

#### 9.4. Fertigung des Kühlsystems

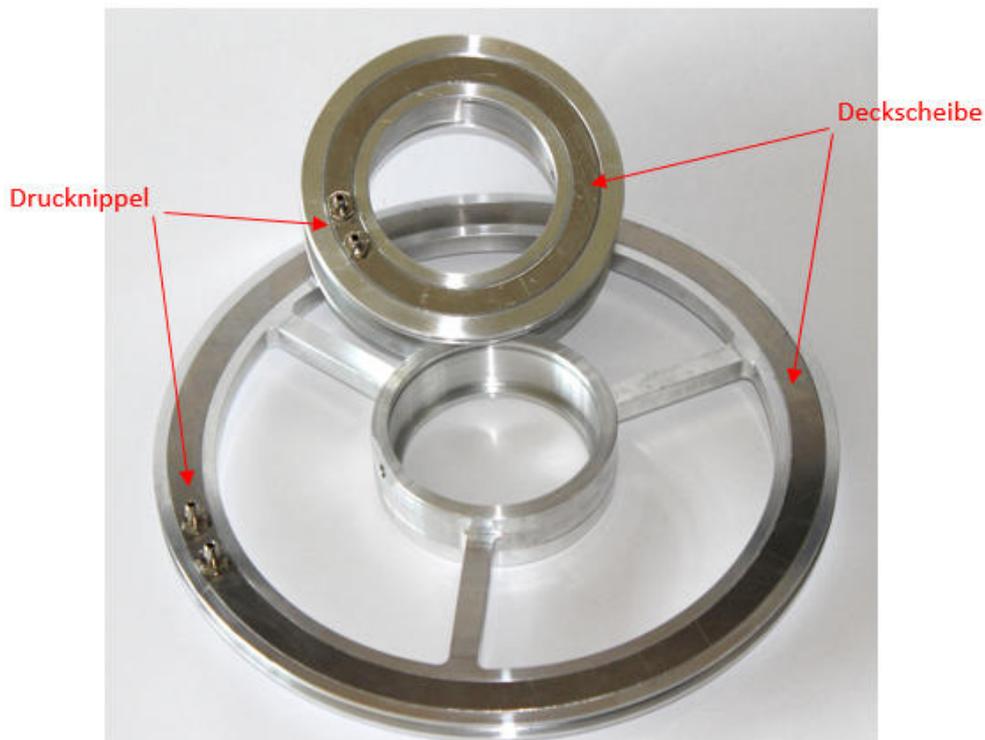
Für die Kühlung ist es ebenso notwendig eine vakuumdichte Durchführung zu garantieren. Dies geschieht mittels M5 Drucknippel, welche in die ausgewählten Deckel bzw. Lagerschilde eingeschraubt und verklebt werden, um die Dichtheit zu gewährleisten. Abbildung 75 zeigt die verwendeten MP-JET Drucknippel.



Abbildung 75: Drucknippel M5 (Modellbau Lindinger, 2015)

Als nächstes werden das *Lagerschild innen* und die lasierzugeschnittenen Deckscheiben der Wasserkanäle zusammengesetzt. Vorerst wird eine Trennwand in den Kanal eingefügt, welche ein Vermischen von zufließenden und abfließenden Kühlmittel verhindern soll. Die Deckscheiben werden nun in die vorgefertigte Nut mittels zwei Komponenten Epoxidkleber eingeklebt. Der Kleber hält einer Belastung von ca.  $2000 \frac{N}{cm^2}$  nach einem Aushärten bei einer Temperatur von ca. 70 °C stand. Die Berechnung der Klebeverbindung ergab eine Spannung von  $10 \frac{N}{cm^2}$ , wodurch die Verwendung dieses Klebers zulässig ist. Es folgen wiederum

Anschlüsse für die Kühlschläuche, welche erneut aus M5 Drucknippel bestehen und auch verklebt werden. Somit sind zwei funktionsfähige Kühlkanäle umgesetzt (Abbildung 76).



**Abbildung 76: Kühlkanäle mit Anschlüsse**

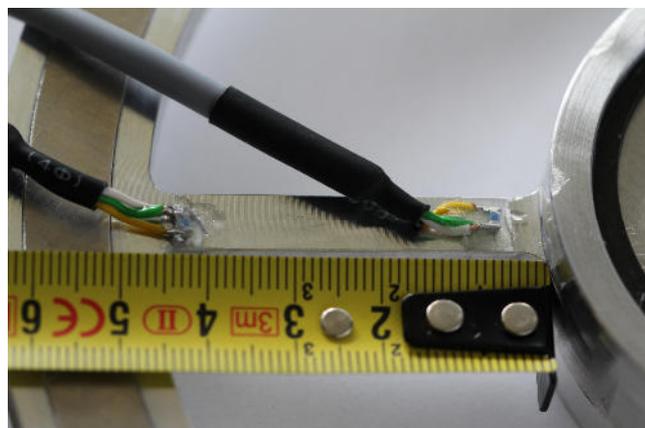
### 9.5. Aufbau / Zusammenbau des Prüfstandes

Nachdem alle Vorbereitungen getroffen wurden (anfertigen der Kühlkanäle, Durchführungen, usw.) kann schließlich mit dem Aufbau des Prüfstands begonnen werden. Gestartet wird mit dem „Innenleben“ (Abbildung 77), welches sich aus *Lagerschild innen*, *Lagerblock*, *Hohlwelle*, usw. zusammensetzt. Die Lager werden erwärmt und auf die Welle gepresst (Passungen der Lagersitze laut Angabe von *Skf*). Anschließend werden *Lagerblock* und *Lagerschild innen* erhitzt, welche wiederum auf die Lager gepresst werden. In erster Instanz werden alle Lager mit vakuumtauglichen Fett von *Skf* geschmiert (siehe Anhang 17.10). An die Pt-100 Widerstandsthermometer wurden bereits geschirmte Leitungen angelötet, welche nun, in einem genau definierten Abstand, an den Messflansch angeklebt werden.



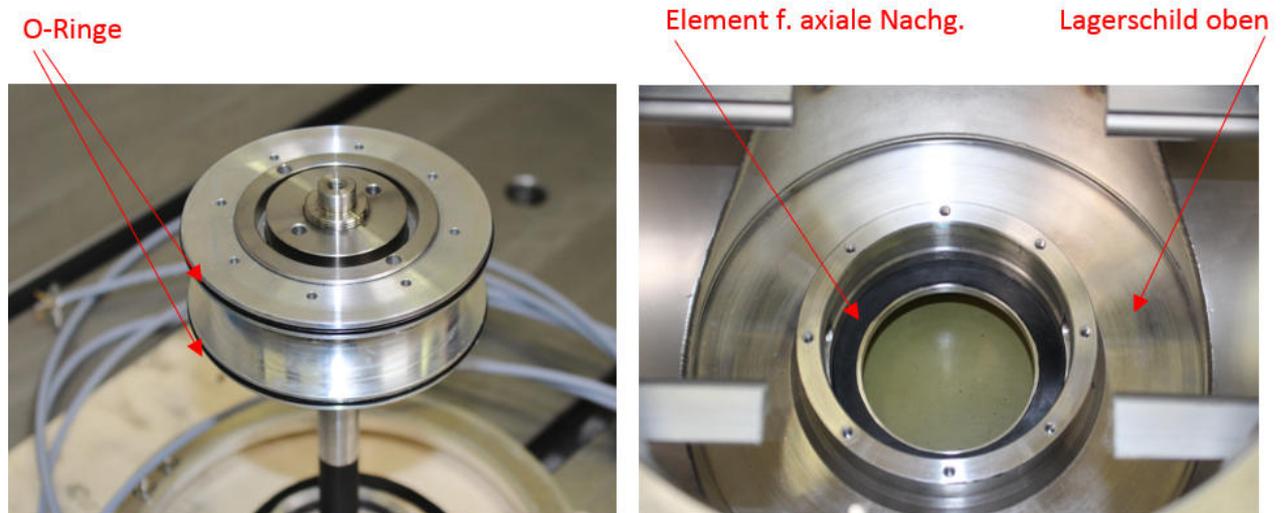
**Abbildung 77: Nachgiebige Aufhängung**

Abbildung 78 zeigt die angeklebten Sensoren im Detail. Als Klebstoff wird wieder UHU® plus Endfest 300 (siehe Anhang 17.5) verwendet, da dieser für die auftretenden Temperaturen geeignet ist. Zur abschließenden Kontrolle werden alle Widerstände der Widerstandsthermometer nochmals vermessen. Dadurch wird kontrolliert ob ein Kurzschluss entstanden ist oder der Sensor durch das Löten bzw. das Ankleben zerstört wurde.



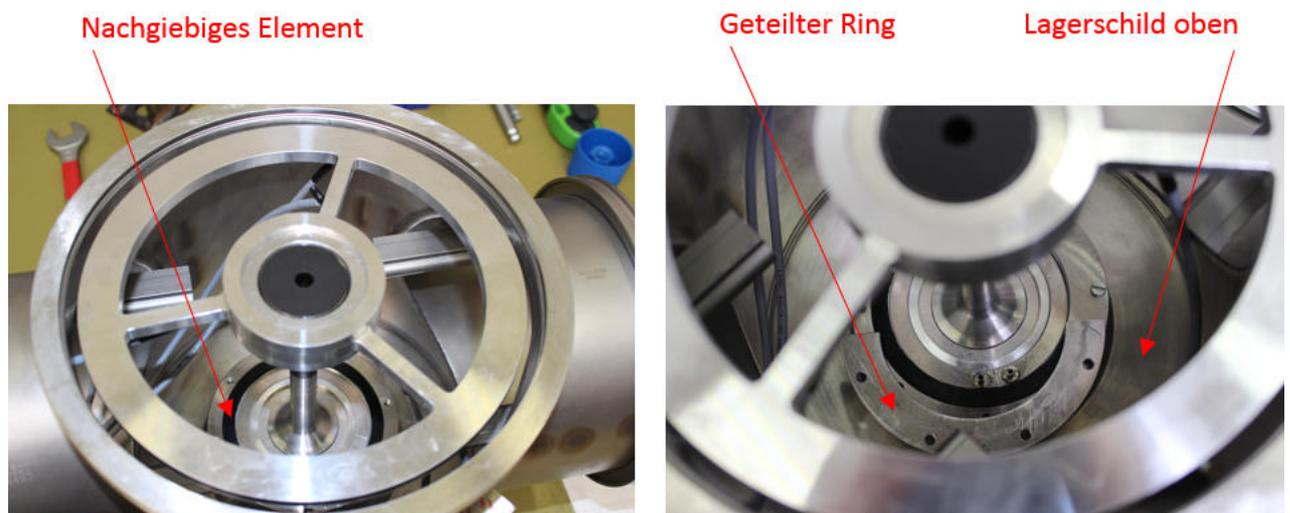
**Abbildung 78: Detailansicht Pt-100**

Als nächsten werden alle nachgiebigen Elemente angebracht. Diese bestehen aus O-Ringen, welche in die vorhandenen Nuten in *Lagerblock* und *Lagerschild innen* montiert werden, sowie Flachdichtungen für die axiale Nachgiebigkeit, welche wiederum in das *Lagerschild oben* eingesetzt werden. Abbildung 79 zeigt das eben Beschriebene.



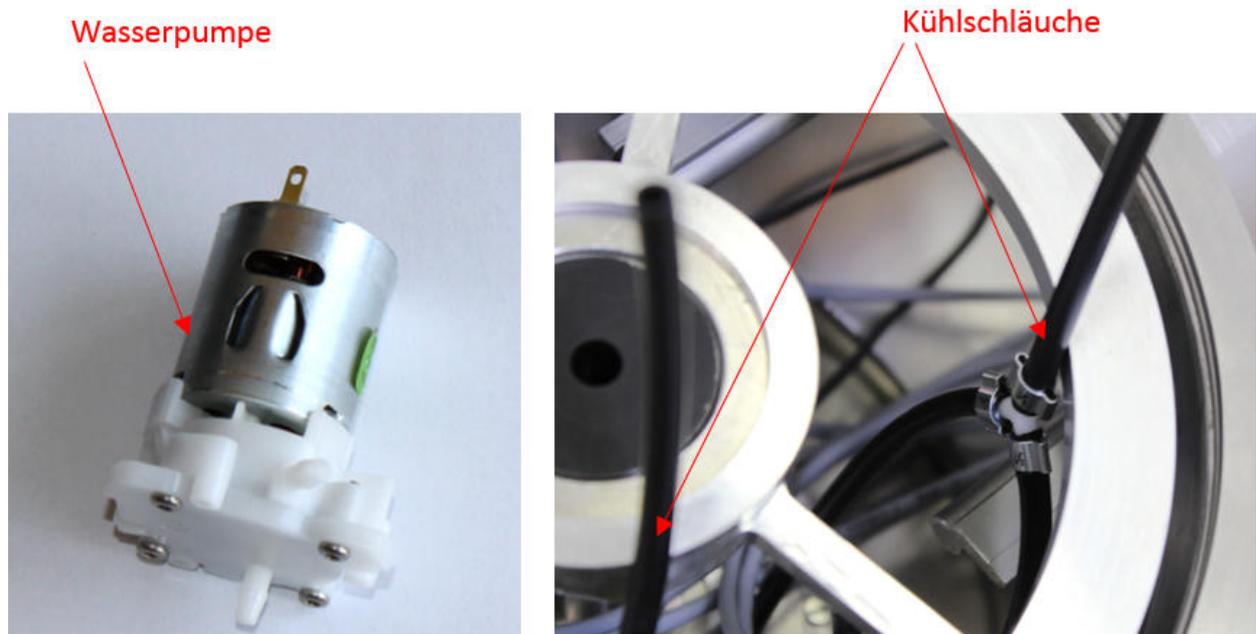
**Abbildung 79: Einsetzen der nachgiebigen Elemente**

Nun wird alles zusammengefügt, indem der *Lagerblock* und das *Lagerschild oben* zusammengesetzt werden und mittels eines geteilten Rings und Schrauben fixiert werden. In Abbildung 80 wird dies gezeigt.



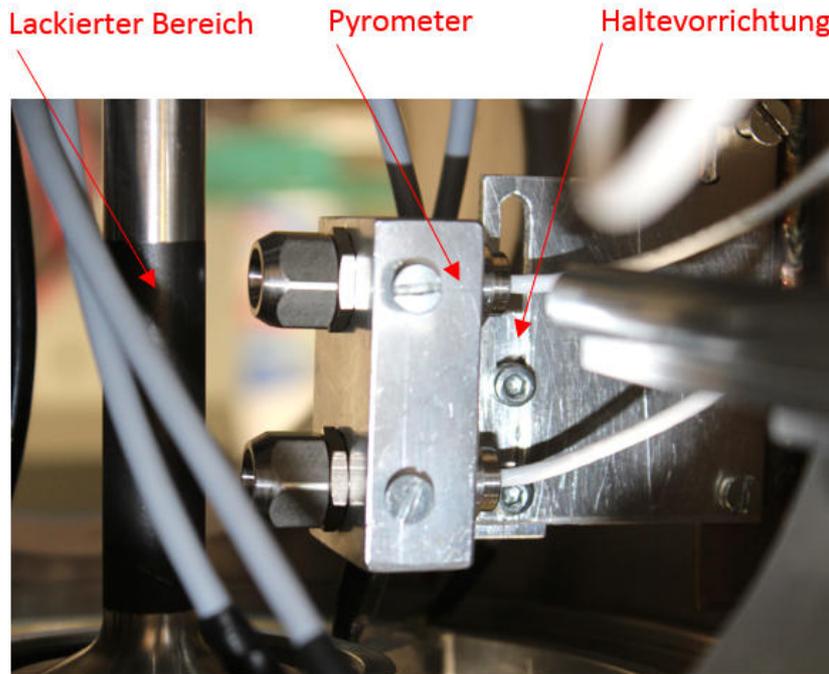
**Abbildung 80: Zusammenfügen von Vakuumkammer und nachgiebiger Aufhängung**

Als nächstes sind die Kühlung und die Pyrometer an der Reihe. Mittels passenden Schläuchen und einer Zahnradpumpe (siehe Anhang 17.14) wird der Kühlkreislauf ausgeführt. Vor dem weiteren Zusammenbau wird die Dichtheit des Systems überprüft (siehe Abbildung 81).



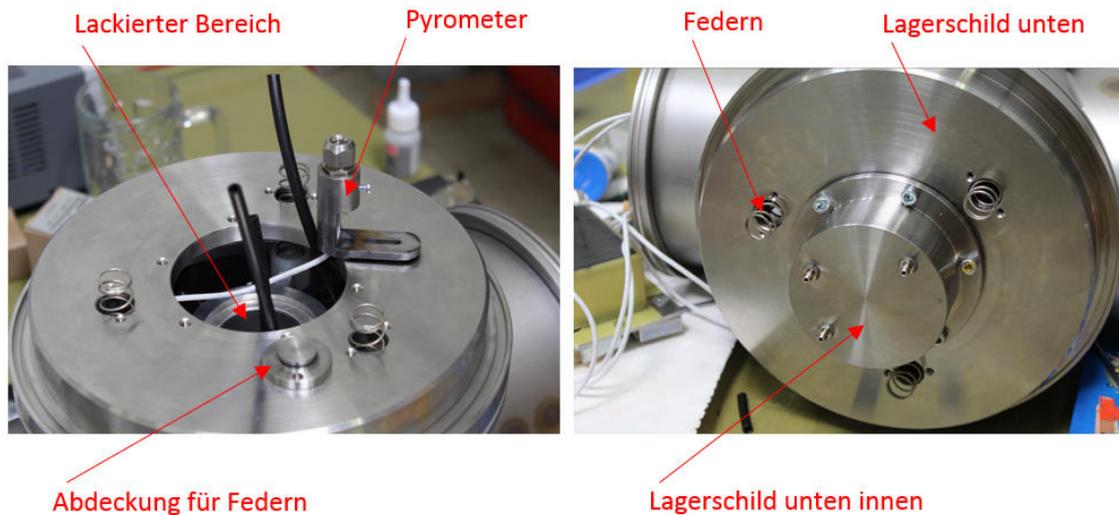
**Abbildung 81: Komponenten des Kühlsystems**

Die beiden Pyrometer (siehe Anhang 17.18), mit welchen der eingehenden Wärmestrom errechnet wird (siehe Kapitel 6.2), werden mittels einer Vorrichtung in der Vakuumkammer fixiert und anschließend so adjustiert, dass sie sich im vorgeschriebenen Abstand zur Welle befinden (optimale Größe des Messfelds). Wie in Abbildung 82 außerdem noch zu erkennen ist, wurde die Welle schwarz lackiert, um einen definierten Emissionsgrad von  $\epsilon = 0,97$  zu erhalten. Das dritte Pyrometer wird im *Lagerschild\_unten\_innen* fixiert und so eingebaut, dass es auf den Schaft der Welle zeigt. Auch hier wurde wieder eine schwarze Farbe (temperaturfest) aufgetragen. In Abbildung 83 ist dieses Pyrometer zu sehen (nicht eingebaut).



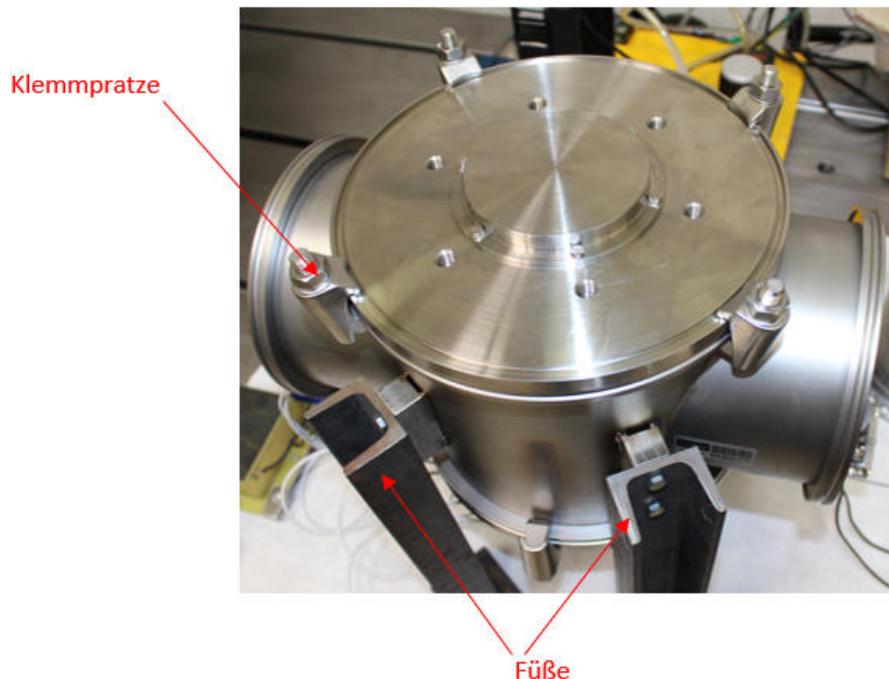
**Abbildung 82: Einbau Pyrometer**

Es folgt das Anbringen des *Lagerschilds unten* (inkl. *Lagerschild\_unten\_innen* und Dichtungsringe) sowie das Einsetzen der Federn. Abbildung 83 zeigt, wie als erstes der *Lagerschild unten* angesteckt wird und dann die Federn untergebracht werden, welche auf den Messsteg drücken und so die Vorspannung der Lager sicherstellen. Gespannt werden die Federn mittels Abdeckungen, die mit Hilfe eines O-Rings dichten und mit jeweils zwei Schrauben befestigt werden. Als nächstes werden die Kühlschläuche an den vorgesehenen Drucknippel im *Lagerschild\_unten\_innen* angebracht und das Pyrometer mittels einer Schraube ebenfalls dort fixiert. Der letzte Schritt ist das Verschrauben von *Lagerschild\_unten\_innen* mit dem *Lagerschild unten* (inkl. O-Ring Dichtung).



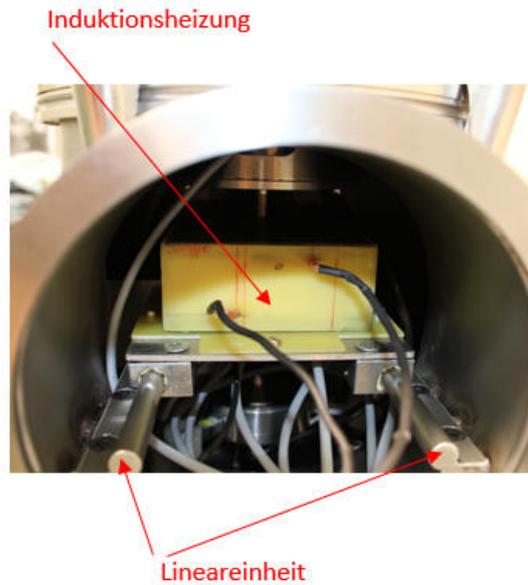
**Abbildung 83: Anbringen des Lagerschilds unten**

Abbildung 84 zeigt nochmals den mit den angebrachten Füßen aufgerichteten Prüfstand sowie die mit „Klemmpratzen“ fixierten Gehäusedeckel.



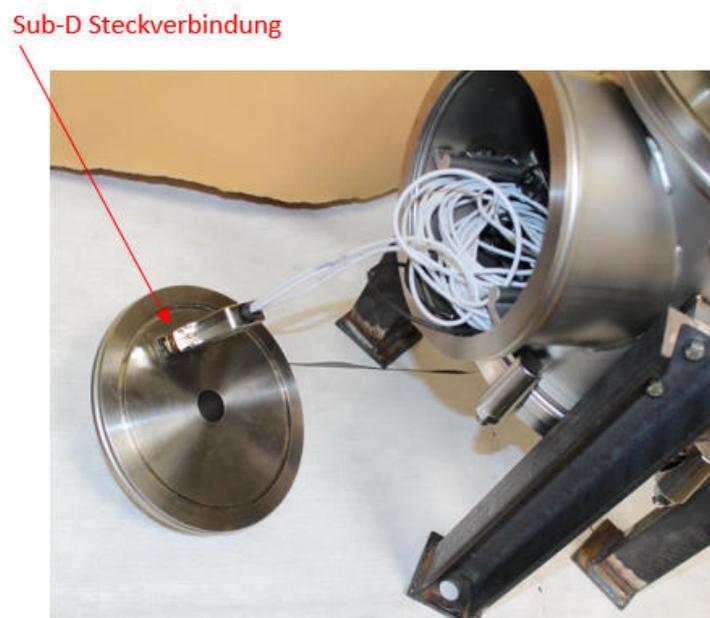
**Abbildung 84: Aufrichten des Prüfstandes**

Als nächstes kommen die Induktionsheizungshälften auf die Lineareinheiten (Abbildung 85). Sie werden in die richtigen Positionen bewegt und anschließend mittels einer Schraube eines Spanschlittens befestigt.



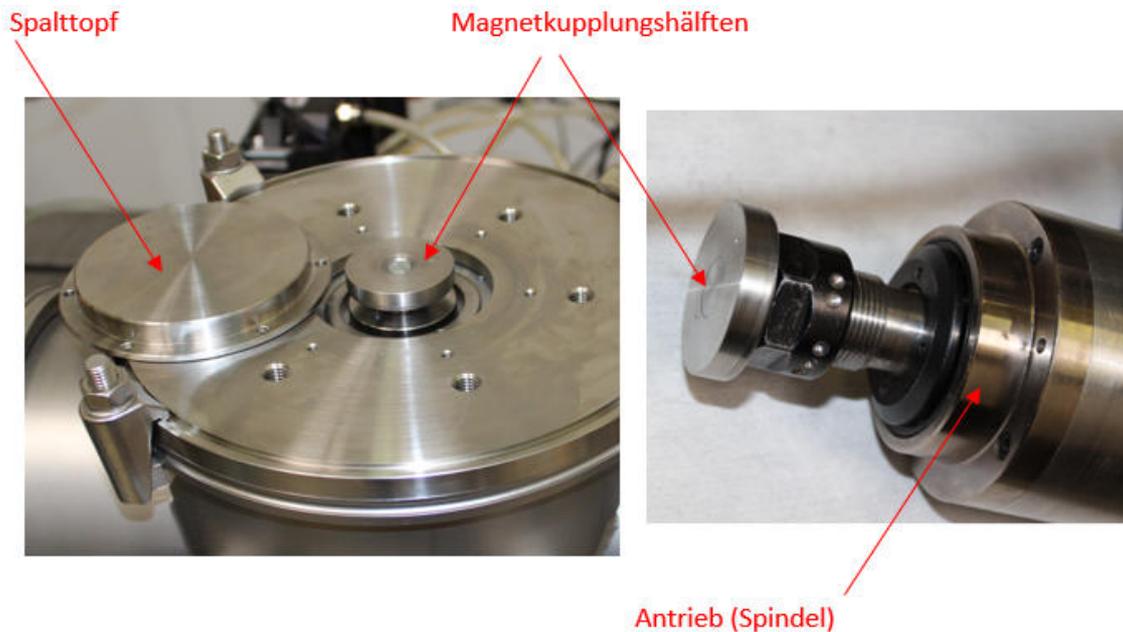
**Abbildung 85: Eingebaute Induktionsheizung**

Alle Steckverbindungen (Heizung, Pyrometer und Pt-100) werden nun mit den Sub-D Durchführungen der Seitenteile (siehe Abbildung 86) verbunden, welche inkl. der Dichtungs-/Zentrierringe nun wieder mittels „Klemmpratzen“ montiert werden.



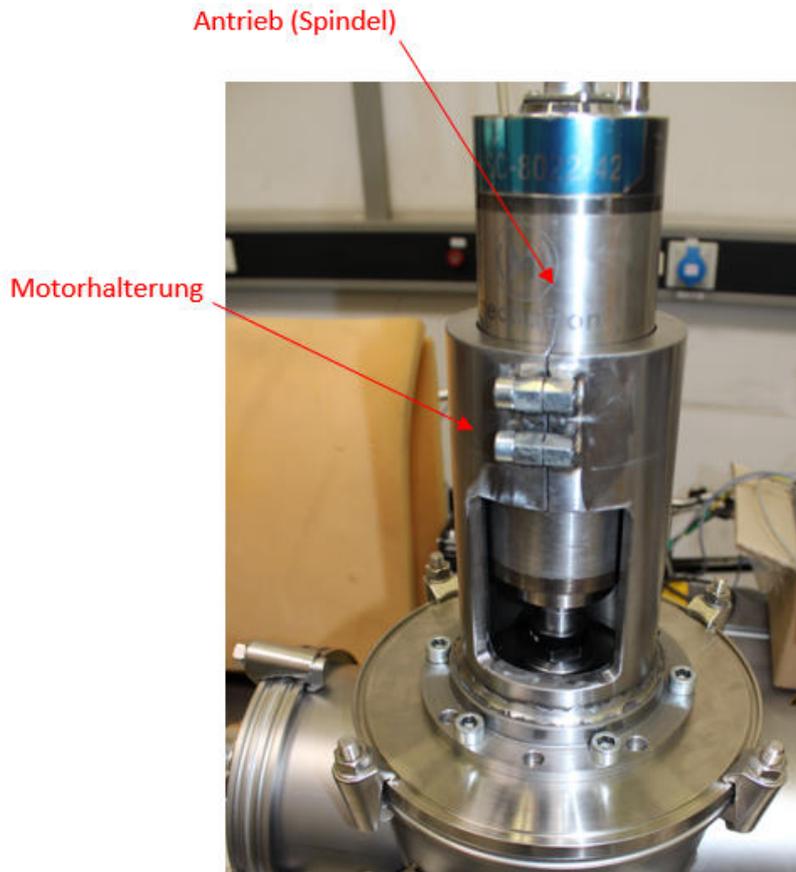
**Abbildung 86: Sub-D Steckverbindung**

Der nächste Schritt, ist die Montage der Antriebseinheit. Wie in Abbildung 87 zu sehen ist wird als erstes eine Hälfte der Magnetkupplung auf der Welle befestigt und danach der *Spalttopf* (inklusive Dichtring) mittels Schrauben am *Lagerschild oben* fixiert.



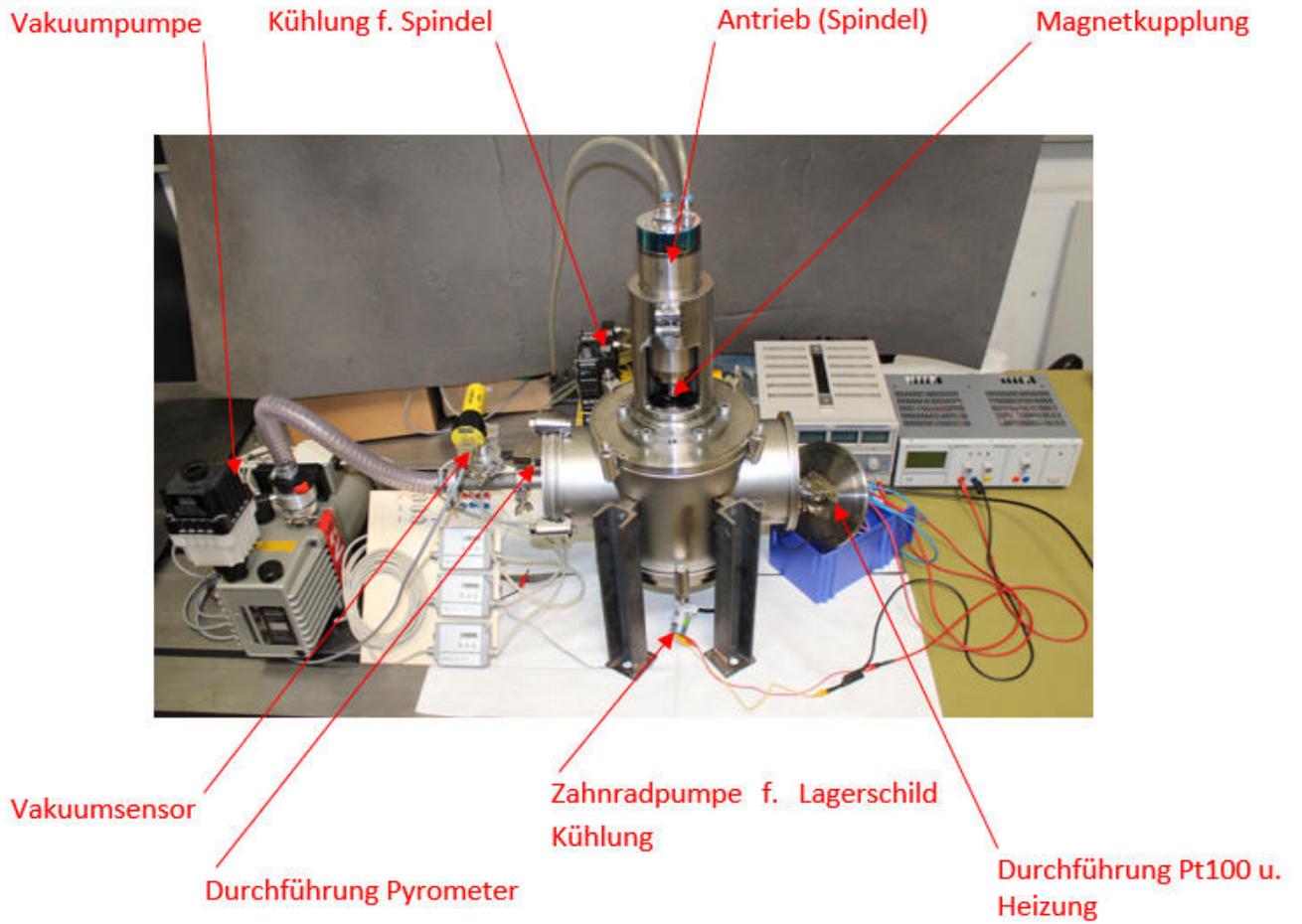
**Abbildung 87: Befestigung der Magnetkupplung**

Es ist darauf zu Achten, dass die zweite Magnetkupplungshälfte erst nach dem „Warmlaufen“ (=Betreiben der Spindel ohne Last und mit stufenförmiger Steigerung der Drehzahl) der Spindel mittels der darauf befindlichen Spannzange montiert wird (siehe Abbildung 87). Nun kann die Aufnahme für den Motor/Spindel (siehe Anhang 17.11) montiert werden und anschließend wird die Spindel mit der darauf befindlichen Kupplungshälfte in der Aufnahme eingespannt. Der geforderte Abstand (siehe Anhang 17.12) zwischen Spalttopf und Magnetkupplungshälfte muss dabei eingehalten werden. Die fertig montierte Antriebseinheit ist in Abbildung 88 zu erkennen.



**Abbildung 88: Montierte Antriebseinheit**

Zum Schluss werden noch die Vakuumpumpe, der Motor für den Kühlkreislauf und die Sensorik angeschlossen. Abbildung 89 zeigt den betriebsfertigen Zusammenbau des Prüfaufbaus.



**Abbildung 89: Zusammenstellung Prüfaufbau**

## 10. Sensorik und Berechnung des thermischen Modells

In diesem Abschnitt werden alle zum Einsatz kommenden Sensoren angeführt und erklärt. Außerdem wird auf das thermische Modell und die daraus folgende Berechnung des Wärmeleitwerts eingegangen, sowie auf die theoretische Bestimmung der auftretenden Messfehler.

### 10.1. Spezifikationen der Messsensorik

#### Pt-100 Widerstandsthermometer:

Es handelt sich um Platin-Chip-Temperatursensoren mit einem Nennwiderstand von  $100\ \Omega$  in SMD-Bauform nach DIN EN 60751, welche am Messflansch aufgeklebt werden. Sie kommen auch am Außenring des zu vermessenden Lagers sowie beim Lagerpaar (hier nur zur Überwachung) zum Einsatz.

Abbildung 90 zeigt den Aufbau der verwendeten Pt-100 Elemente und Tabelle 4 die wichtigsten Daten. Genauere Informationen dazu sind im Anhang 17.15 angeführt.

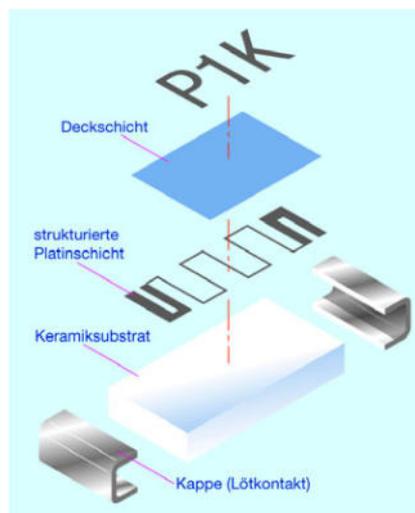


Abbildung 90: Aufbau Widerstandsthermometer (JUMO, 2007)

<b>Platin-Chip-Temperatursensoren</b>	
<i>Bezeichnung:</i>	<i>Pt-100 Temperatursensor in SMD-Bauform</i>
<i>Normnummer:</i>	<i>DIN EN 60751</i>
<i>Hersteller:</i>	<i>JUMO</i>
<i>Temperatur-Messbereich:</i>	<i>-50 °C bis 150 °C</i>
<i>Widerstand bei 20°C:</i>	<i>100 Ω</i>
<i>Toleranzklasse :</i>	<i>Klasse A</i>
<i>Maße (L x B x H):</i>	<i>2,0 x 1,3 x 0,5 [mm]</i>

**Tabelle 4: Pt-100 Widerstandsthermometer**

**Analogeingangsmodule NI 9217:**

Mit diesem Eingangsmodul werden die Pt-100 Widerstandsthermometer (Anhang 17.17) ausgewertet. Es stehen vier Kanäle bereit, was bedeutet, dass zwei Temperaturgradienten pro Modul ermittelt werden können. Mit dessen Hilfe werden Störungen und Rauschen kompensiert, damit z.B.: die Induktionsheizung das Messergebnis nicht verfälscht. Die Abtastrate kann in zwei Varianten konfiguriert werden. Variante 1 ist für schnelle Abtastraten (bis zu 400 S/s) und Variante 2 für hohe Auflösungen (5 S/s) vorgesehen. Abbildung 37 zeigt dieses Modul. Die wichtigsten Daten sind in der Tabelle 5 zusammengefasst.

<b>National Instruments 9217</b>	
<i>Bezeichnung:</i>	<i>4 Kanal Analogeingangsmodule</i>
<i>Hersteller:</i>	<i>National Instruments</i>
<i>Kanäle:</i>	<i>4</i>
<i>Auflösung:</i>	<i>24 bit</i>
<i>Widerstand:</i>	<i>100 Ω</i>
<i>Abtastrate :</i>	<i>Bis zu 100 S/s pro Kanal</i>
<i>Int. Rauschunterdrückung</i>	<i>50 / 60 Hz</i>

**Tabelle 5: 4 Kanal Analogeingangsmodule (National Instruments, 2010)**

**Pyrometer:**

Die berührungslose Temperaturmessung erfolgt mittels Pyrometer (Bestimmung der zufließenden Wärmemenge und Vermessung der Wellenschulter für die Lagerinnenringtemperatur). Diese Sensoren werden mit einer Elektronik versehen, welche die gemessenen Signale sofort auswertet. In Abbildung 91 ist dieser Sensor, sowie die Elektronik abgebildet. Tabelle 6 hält alle wichtigen Informationen bereit. Weitere Informationen dazu sind im Anhang 17.18 angeführt.



**Abbildung 91: Optris Pyrometer mit Auswerteelektronik (Optris, 2014)**

Pyrometer	
Bezeichnung:	CT LT
Hersteller:	Optris
Verwendete Optik:	CF (D:S = 22:1)
Genauigkeit (25°C)	±1 % (=±1 °C)
Reproduzierbarkeit (25°C)	±0,5 % (=±0,5 °C)

**Tabelle 6: Optris Pyrometer (Optris, 2014)**

**Pirani-Sonde:**

Der Druck wird mittels eines aktiven Pirani-Vakuumsensors (Anhang 17.19) gemessen. Dieser wird außerhalb der Vakuumkammer angebracht und mit einer Auswertungssoftware verbunden. Im nachstehenden Bild (Abbildung 92) ist die Sonde zu sehen und Tabelle 7 beinhaltet die wichtigsten Daten.



Abbildung 92: Pirani-Vakuumsensor

Pirani-Sonde	
Bezeichnung:	CVM211 „Stinger“ Konvektions-Pirani-Vakuummeter
Hersteller:	VACOM
Messbereich:	$0,01 \times 10^5$ bis $1,33 \times 10^5$ Pa
Genauigkeit (25°C)	$\pm 2$ % des Messwerts (500 – 1000 mbar) $\pm 10$ % des Messwerts (<500 mbar)

Tabelle 7: Vacom Vakuummeter

## 10.2. Thermisches Modell und Berechnung des Wärmeleitwerts

Um den Wärmeleitwert berechnen zu können, werden die nachfolgend angeführten Größen benötigt. Abbildung 93 zeigt schematisch das Wärmeleitmodell des Lagers.

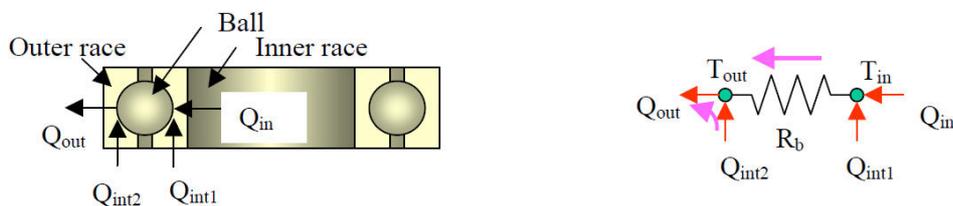


Abbildung 93: Thermisches Lagermodell (Takeuchi, et al., 2004, S. 5)

$\dot{Q}_{in}$  beschreibt den zufließenden Wärmestrom, welcher von der Induktionsheizung erzeugt wird und über die Hohlwelle zum Wälzlager fließt.

$\dot{Q}_{out}$  stellt den abfließenden Wärmestrom dar. Dies ist der Wärmestrom welcher sich nach dem Wälzlager einstellt.

$T_{in}$  und  $T_{out}$  beschreiben die Temperaturen welche am Lagerinnen- bzw. Lageraußenring vorherrschen.

### 1. Zufließender Wärmestrom $Q_{in}$

$$\dot{Q}_{in} = \frac{\lambda * A_W}{l_W} * (T_{W1} - T_{W2}) \quad (1)$$

Mit Formel ( 1 ) kann der zufließende Wärmestrom  $\dot{Q}_{in}$  berechnet werden. Der Wärmeleitwert der Welle (Material: Edelstahl 1.4301) beträgt  $\lambda = 15 \frac{W}{m \cdot K}$ . Die Temperaturen  $T_{W1}$  und  $T_{W2}$  werden mittels der beiden Pyrometer gemessen (siehe Kapitel 6.2), welche einen Abstand von  $30 * 10^{-3} m$  zueinander aufweisen. Dies entspricht somit der Messlänge  $l_W$ . Der Querschnitt berechnet sich aus dem Durchmesser der Welle abzüglich des Bohrungsdurchmessers und beträgt  $A_W = 126,45 * 10^{-6} m^2$ .

### 2. Abfließender Wärmestrom $Q_{out}$

$$\dot{Q}_{out} = \frac{3 * \lambda * A_S}{l_S} * (T_{S1} - T_{S2}) \quad (2)$$

Als nächstes wird der abfließende Wärmestrom  $\dot{Q}_{out}$  berechnet. Hierzu werden die Temperaturen  $T_{S1}$  und  $T_{S2}$  am Messsteg mit Hilfe von Widerstandsthermometern ermittelt. Der Wärmeleitwert des Stegs (Material: Aluminium 7075) beträgt  $\lambda = 130 - 160 \frac{W}{m \cdot K}$ . Der Abstand der Temperatursensoren, also die Messstrecke  $l_S$  beträgt  $40 * 10^{-3} m$ . Der Querschnitt ist quadratisch und beträgt  $A_S = 64 * 10^{-6} m^2$ . Der Faktor 3 wird eingerechnet, da sich der Wärmestrom auf die 3 Stege aufteilt.

### 3. Temperatur Lageraußenring $T_A$

Die Temperatur am Außenring des Lagers wird mittels Widerstandsthermometer bestimmt, welches durch eine Bohrung am *Lagerschild innen* direkt dort angebracht wird.

#### 4. Temperatur Lagerinnenring $T_E$

Die Temperatur am Innenring des Lagers wird mittels Pyrometer über die stirnseitige Vermessung der Welle bestimmt, da hier der Innenring des Lagers direkt anliegt.

Da nun alle Parameter, welche zur Berechnung des Wärmeleitwerts nötig sind, bekannt sind, kann mit der folgenden Formel ( 3 ) dieser ausgewertet werden (Takeuchi, et al., 2004, S. 5):

$$G_b = \frac{1}{2} * \frac{\dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{out}}{T_E - T_A} \quad (3)$$

### 10.3. Messfehler

In diesem Abschnitt wird etwas näher auf die Messfehler eingegangen, welche durch eine nicht hundertprozentig genaue Fertigung der Sensoren bzw. durch entstehende Fehler beim Adjustieren der Messkomponenten entstehen können. Die Messunsicherheiten müssen bestimmt werden, damit man eine Fehlerabschätzung durchführen kann und somit feststellen kann in welchem Genauigkeitsbereich die Ergebnisse liegen.

Die Berechnung der Messunsicherheiten erfolgt nach derselben Vorgehensweise wie beim ursprünglichen Prüfstand. Zu diesem Zweck werden hier nur noch die abgeleiteten Ergebnisse behandelt. Die Vollständige Herleitung, sowie die theoretische Erklärung dazu sind in der Masterarbeit von Herrn Haidl einzusehen. (Haidl, 2014, S. 64 ff)

#### Behandelte Größen:

Wie auch in dem vorherigen Modell werden hier wieder die Ungenauigkeiten von folgenden Größen behandelt:

- Die Messunsicherheit der Pyrometer
- Die Messunsicherheit der Widerstandsthermometer Pt-100
- Toleranzen der Messabstände der Pyrometer
- Toleranzen der Messabstände der Pt-100

Wieder außer Acht gelassen werden das nähere Einbeziehen der Fertigungstoleranzen sowie die Veränderung der Wärmeleitfähigkeit, welche temperaturabhängig ist. Diese Fehler

können vernachlässigt werden, da sie im Vergleich zu den anderen keinen signifikanten Einfluss haben. Die nachfolgende

Tabelle 8 zeigt die Messtoleranzen laut Datenblatt bzw. die angenommenen Toleranzen für die Adjustierung. Die dort angegebenen Werte stammen aus den Datenblättern (Pt-100 Datenblatt siehe Anhang 17.16 und Pyrometerdatenblatt siehe Anhang 17.18)

<b>Typ:</b>	<b>Bezug:</b>	<b>Messungenaugigkeit/ Reproduzierbarkeit:</b>
Pyrometer	140 °C	1,4 °C / 0,7 °C
	<100 °C	1,0 °C / 0,5 °C
Pt-100	50 °C	0,25 °C
Toleranz Messabstand Pyrometer		0,5 mm
Toleranz Messabstand Pt-100		0,5 mm

**Tabelle 8: Werte Messtoleranzen**

Als nächstes können die Messungenaugigkeiten mit den abgeleiteten Formeln berechnet werden. Zugunsten der Übersichtlichkeit werden drei Unterteilungen vorgenommen.

### 1. Zufließender Wärmestrom

$$\Delta\dot{Q}_{in_{max}} = \left| -\frac{\lambda * A_W}{L_W^2} * (T_{W1} - T_{W2}) \right| * \Delta L_W + \left| \frac{\lambda * A_W}{L_W} \right| * \Delta T_{W1} + \left| -\frac{\lambda * A_W}{L_W} \right| * \Delta T_{W2} \quad (4)$$

### 2. Abfließender Wärmestrom

$$\Delta\dot{Q}_{out_{max}} = \left| -\frac{3 * \lambda * A_S}{L_S^2} * (T_{S1} - T_{S2}) \right| * \Delta L_S + \left| \frac{3 * \lambda * A_S}{L_S} \right| * \Delta T_{S1} + \left| -\frac{3 * \lambda * A_S}{L_S} \right| * \Delta T_{S2} \quad (5)$$

### 3. Wärmeleitwert

$$\Delta G_{b_{max}} = \left| \frac{1}{2 * (T_E - T_A)} \right| * \Delta \dot{Q}_{in} + \left| \frac{1}{2 * (T_E - T_A)} \right| * \Delta \dot{Q}_{out} + \left| - \frac{\dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{out}}{2 * (T_E - T_A)^2} \right| * \Delta T_E + \left| \frac{\dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{out}}{2 * (T_A - T_E)^2} \right| * \Delta T_A \quad (6)$$

Wie in Formel ( 6 ) gut ersichtlich ist, werden die vorher berechneten Abweichungen für den zufließenden und den abfließenden Wärmestrom benötigt, um schließlich die maximale Abweichung des Wärmeleitwerts zu erhalten.

Ein weiterer systematischer Messfehler ergibt sich dadurch, dass der genaue Wärmeleitwert von Aluminium 7075, aus welchem der Messflansche gefertigt wurde, nicht bekannt ist. Der angegebene Wert für dieses Material bewegt sich in einem Streubereich von  $\lambda = 130 - 160 \frac{W}{m * K}$ .

## 11. Inbetriebnahme des Prüfstands

Dieses Kapitel befasst sich mit der Beschreibung der Ansteuerung der verwendeten Aktuatoren und Sensoren. Außerdem soll ein Überblick über die verwendeten Netzgeräte sowie die Leistungselektronik gegeben werden. Abschließend werden die Ergebnisse erster Versuche präsentiert.

### 11.1. Verwendete Netzgeräte und Leistungselektronik

Der **Antrieb** (HSC Spindel) wird mit einem Powtran Pi800a Netzgerät/Steuerung betrieben und benötigt ein Kühlsystem. Es handelt sich um einen geschlossenen Kühlkreislauf, in welchem destilliertes Wasser als Kühlmedium fungiert. Dieses Wasser nimmt die abgegebene Wärme der Spindel auf und gibt sie über einen Wärmetauscher (Kühlrippen und Ventilator) an die Umgebung wieder ab.

Die **Induktionsheizung** ist für eine Leistung von maximal 70 W ausgelegt. Sie wird mit einer Spannung von 70 V versorgt. Die Stromstärke ist mit max. 1 A begrenzt. Als Eingangssignal wird ein Rechtecksignal mit einer Frequenz von max. 10 kHz verwendet, welches von einem Funktionsgenerator der Marke Hameg Instruments (HM8030-6) bereitgestellt wird. Als Versorgungsmodul ist ein Netzgerät mit der Bezeichnung Voltcraft Plus-VSP2405HE im Einsatz.

Zur Versorgung des **Pirani-Vakuumsensors** wird das Netzgerät Voltcraft VLP-1405 Pro verwendet.

Alle **Pt-100 Widerstandsthermometer** werden mit dem Auswertemodul von *National Instruments* NI9217 (siehe Anhang 17.17) ausgewertet. Um den Einfluss der Leitungswiderstände zu umgehen wird eine 3-Leiter-Technik angewandt. Hierbei wird ein dritter Leitungsdraht zu einem Anschluss des Temperatursensors gelegt. Dadurch entsteht ein weiterer Messkreis, welcher nun nur den Widerstand der Zuleitung (ohne den Sensor) darstellt. Durch die Brückenschaltung des NI-Moduls wird dieser Widerstandsmesswert vom Widerstandsmesswert inkl. Sensor abgezogen und der mitgemessene Fehler durch den Leitungswiderstand eliminiert. (uwe electronic, 2015)

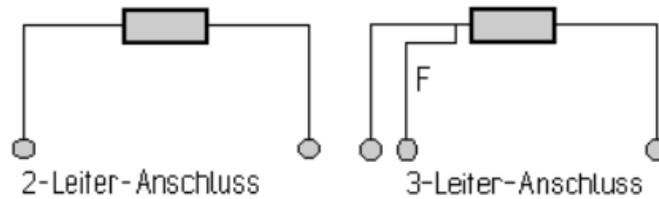


Abbildung 94: Vergleich 2-Leiter und 3-Leiter-Schaltung (SOCLAIRELECTRONIC, 2011)

Die Signale der **Pyrometer** werden mit der vorhandenen Auswertehardware von *Optris* weiterverarbeitet, welche wiederum von einem Voltcraft VLP-1405 Pro Netzgerät versorgt werden.

## 11.2. Durchführung erster Messungen

Als ersten Punkt der Inbetriebnahme wurde der Einfluss der Induktionsheizung auf die Pt-100 Widerstandsthermometer getestet. Wie vom ursprünglichen Prüfstand bekannt ist, waren die Störsignale so hoch, dass Messungen nur mit inaktiver Heizung durchgeführt wurden. Abbildung 95 (Stand 2013) zeigt den Signalausschlag eines betrachteten Pt-100 Elements (näheres dazu in der Masterarbeit von Herrn Haidl). (Haidl, 2014, S. 77)

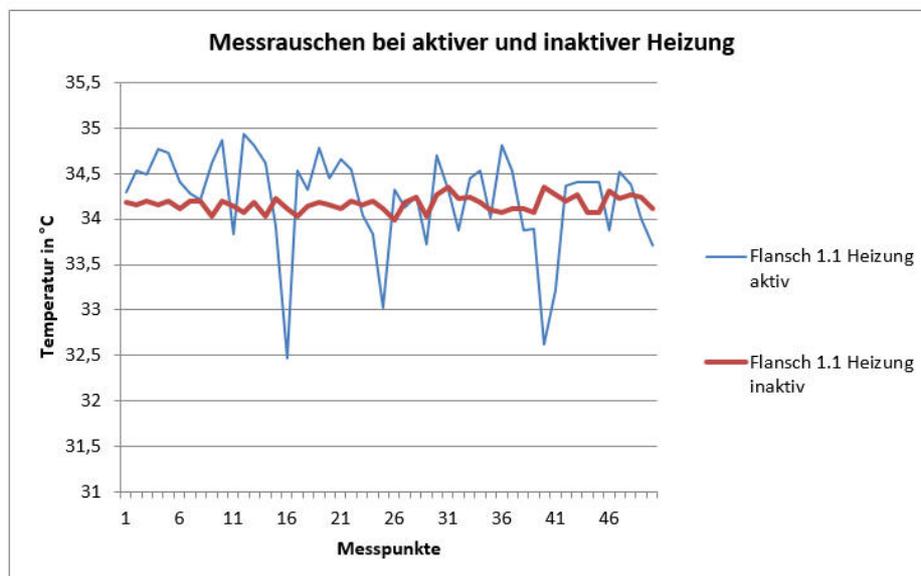
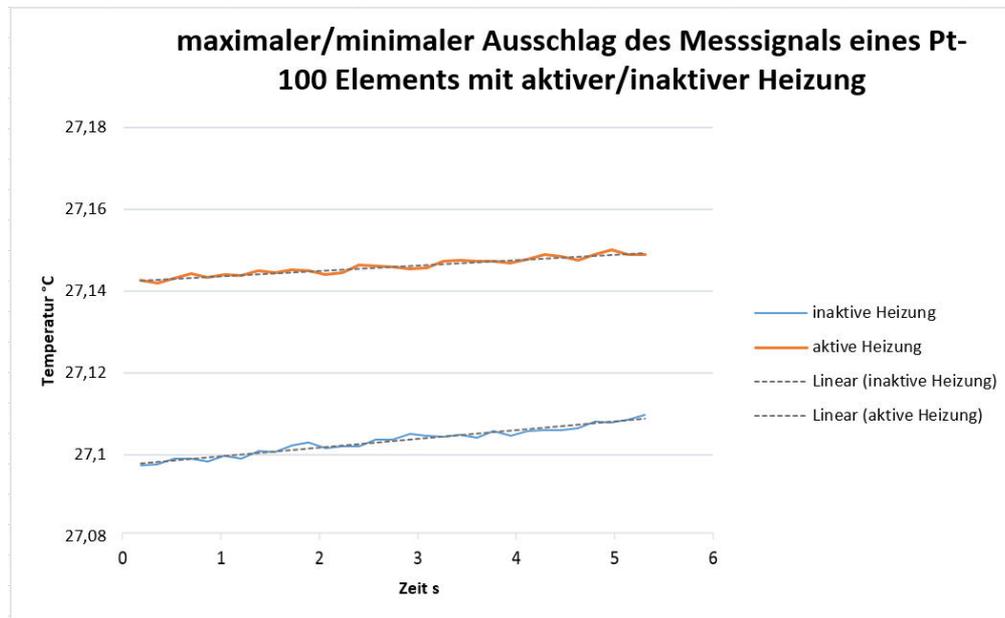


Abbildung 95: Messrauschen bei aktiver und inaktiver Heizung (Haidl, 2014, S. 77)

Zum Vergleich wird nun dieselbe Messung mit der aktuellen Prüfstandskonfiguration erneut durchgeführt:

Als erstes wird das Signal eines Pt-100-Elements mit inaktiver Induktionsheizung über einen Zeitraum von 5 Sekunden aufgezeichnet.

Es folgte derselbe Versuch nochmals, nur dieses Mal mit aktiver Heizung. Abbildung 96 zeigt den Vergleich der beiden dokumentierten Kurven.



**Abbildung 96: maximaler/minimaler Ausschlag des Messsignals eines Pt-100 Elements mit aktiver bzw. inaktiver Induktionsheizung**

Wie zu erkennen ist, weisen die beiden Graphen eine Offset von  $<0,01$  °C auf (der Graph steigt leicht, da das Temperaturniveau mit der Restwärme der Welle gehoben wird). Dies bedeutet, dass die max. Amplitude des Signals nicht mehr als  $0,01$  °C vom Mittelwert (graue, strichlierte Linien) abweicht, was auf keinen nennenswerten Störeinfluss der Heizung hinweist. Damit ist der Beweis erbracht, dass die Verwendung von geschirmten Leitungen, den NI-Analogeingangsmodulen und der 3-Leiter-Technik die unerwünschten Störeinflüsse der Induktionsheizung deutlich verringern. Messungen mit aktiver Heizung sind nun zukünftig möglich.

Bei der Inbetriebnahme der Heizung wurde ein Problem festgestellt, nämlich dass die Hohlwelle nicht genügend erwärmt wird. Nach Rücksprache mit dem Institut für *Elektrische Messtechnik und Messsignalverarbeitung* der TU-Graz, mit welchem die Heizung entwickelt wurde, wurde festgestellt, dass durch den neuen Aufbau zu wenig magnetische Feldlinien durch die Welle geleitet werden. Beim ursprünglichen Prüfstand, sowie beim Aktuellen ist die *Hohlwelle* aus Edelstahl 1.4301 (nicht ferromagnetisch) gefertigt worden. Das vorhergehende Konzept zwang die Feldlinien direkt durch die Welle zu fließen. Durch die

Änderung des Konzepts, strömt nun nur noch ein Teil dieser hindurch und erreicht somit kein ausreichendes Erwärmen der Welle.

Wird ein ferromagnetischer Stahl (wie beispielsweise Baustahl S355) eingesetzt, welcher eine deutlich höhere Permeabilitätszahl als Edelstahl 1.3401 besitzt, so werden die Feldlinien gerichtet durch die Welle geleitet. Dadurch erhitzt sich solch eine Stahlwelle wie erwünscht. Der Versuch wurde mittels einer ferromagnetischen Stahlwelle, welche denselben Durchmesser wie die originale Hohlwelle besitzt, erfolgreich getestet. Um die Heizung in Verbindung mit der vorhandenen Edelstahlwelle (nicht magnetisierbar) trotzdem nutzen zu können, wurde eine mit Wärmeleitpaste bestrichene, geteilte Stahlhülse (S355) an der Welle befestigt. Durch diese Maßnahme ist es nun möglich die Welle zu beheizen und Messungen durchzuführen.

Der nächste Schritt ist die Durchführung einiger Messungen zur Verifizierung der Funktion der Messtechnik und der maschinendynamischen Eigenschaften.

**Messung1** erfolgte unter folgenden Betriebsbedingungen:

- Vorspannkraft = 50 N
- Druck = 12 mbar
- Drehzahl = 0 upm

In Tabelle 9 sind die errechneten Wärmeleitwerte einzusehen.

<b>Messung 1</b>			
<b>Durchgang</b>	<b>Zeit</b>	<b>Kühlung</b>	<b>Wärmeleitwert</b>
Durchgang 1	1 h	Nein	0,152 W/K
Durchgang 2	1,5 h	Nein	0,099 W/K
Durchgang 3	2 h	Nein	0,129 W/K
Durchgang 4	2,5 h	Ja	0,154 W/K

**Tabelle 9: Messung im Stillstand**

Nach ca. zwei Stunden Betrieb war das System thermisch eingeschwungen, das bedeutet, dass sich der Gradient des Temperaturverlaufs auf einen Faktor  $1/e$  (= 37 % seines ursprünglichen Wertes) seines Ausgangswertes reduziert. Näheres dazu in der Diplomarbeit von Herrn Haidl, siehe: (Haidl, 2014, S. 87 f). Nun wurde die Kühlung aktiviert und nach einer weiteren halben Stunde wurde erneut eine eingeschwungene Situation erreicht.

Die Erkenntnis dieser Messung ist, dass das System im Stillstand ca. zwei Stunden benötigt, bis es einen thermisch eingeschwungenen Zustand erreicht. Außerdem erbringt die Wasserkühlung die geforderte Kühlleistung auf und wurde somit erfolgreich auf Plausibilität getestet.

Die nächsten Messungen (**Messung2**) wurden so durchgeführt, wie sie in weiterer Folge standardmäßig eingesetzt werden (→ mit einer definierten Vorspannung, einer eingestellten Drehzahl, einer festgelegten Eingangstemperatur, usw.). Die Kammer wird dazu evakuiert und die Spindel, nach dem Einlaufvorgang am Prüfstand angebracht. Die Welle wird in 3 verschiedenen Drehzahlstufen (0 upm, 5000 upm und 6000 upm) betrieben. Die Induktionsheizung, sowie der Kühlkreislauf sind aktiv und für die Lagervorspannung werden drei Federn mit jeweils 50 N Vorspannkraft verwendet.

Hier die zusammengefassten Betriebsbedingungen für die Messungen:

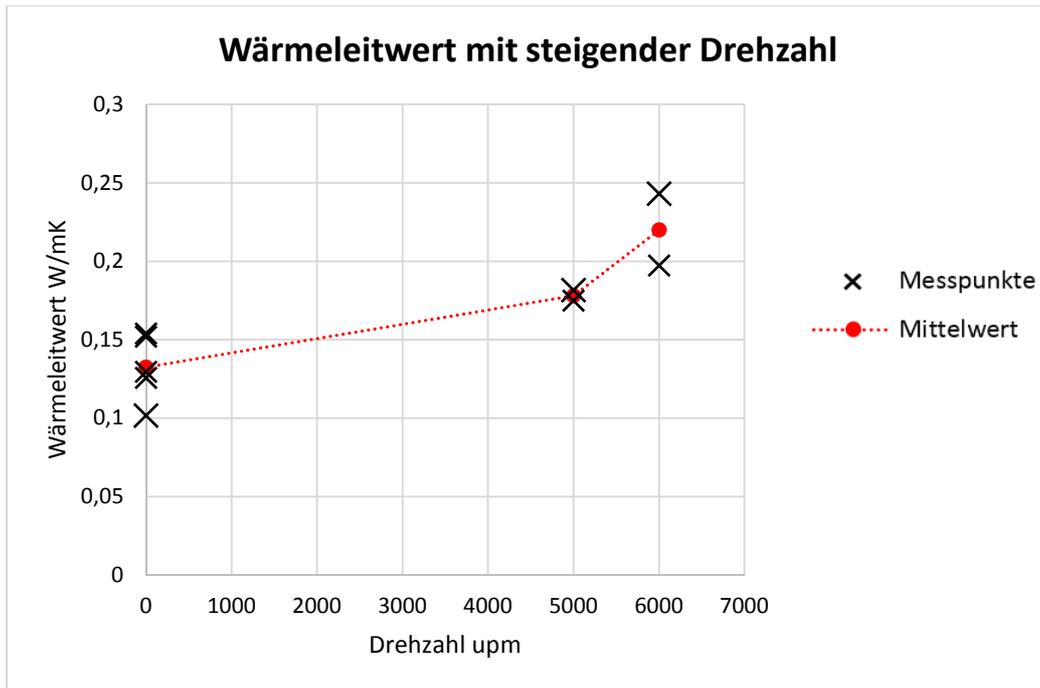
- Vorspannkraft = 50 N
- Druck = 2,33 mbar
- Drehzahl = 0 upm / 5000 upm / 6000 upm

Tabelle 10 und Abbildung 97 zeigen die ermittelten Messergebnisse.

Messung 2					
		Durchgang1	Durchgang2	Durchgang3	Durchgang4
Drehzahl	Druck	Wärmeleitwert	Wärmeleitwert	Wärmeleitwert	Wärmeleitwert
0 upm	2,33 mbar	0,102 W/K	0,126 W/K	0,130 W/K	0,152 W/K
5000 upm	2,33 mbar	0,182 W/K	--	0,175 W/K	--
6000 upm	2,33 mbar	0,243 W/K	--	0,197 W/K	--

**Tabelle 10: Messung bei unterschiedlichen Drehzahlen**

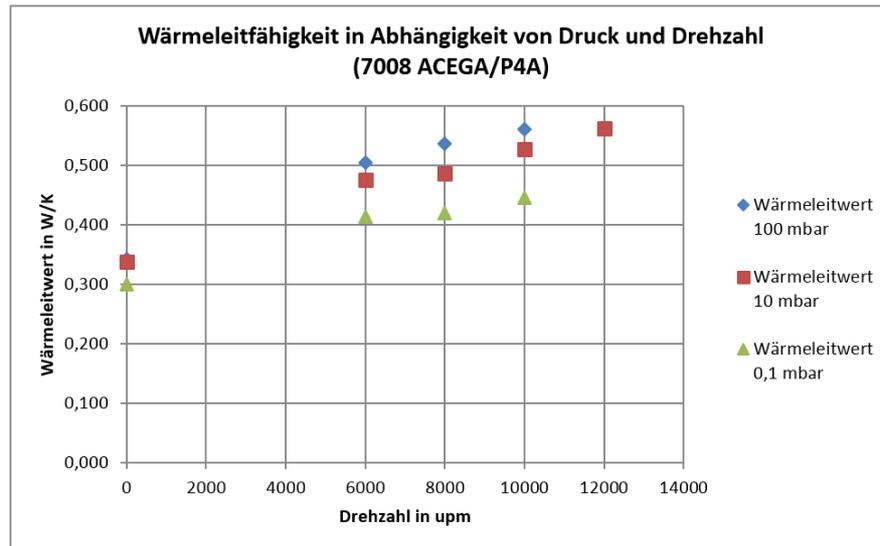
Nachdem die Welle schrittweise auf eine Drehzahl von 6000 upm gefahren wurde (Durchgang1), wurde der Wärmeleitwert erneut im Stillstand bestimmt (Durchgang2). Danach wurde die Kammer wieder auf atmosphärischen Druck und Umgebungstemperatur gebracht. Anschließend wurde dies ein weiteres Mal wiederholt (Durchgang 3 und Durchgang4), um eine Aussage über das Verhalten des Wärmeleitwerts nach der Fettumverteilung treffen zu können. Wie beim ursprünglichen Prüfstand streuen die Wärmeleitwerte im Stillstand stark (aktuell zwischen 0,1 – 0,16 W/K). Mit steigender Drehzahl verringert sich diese Streuung allerdings.



**Abbildung 97: Wärmeleitwert bei unterschiedlichen Drehzahlen**

Die Erkenntnisse aus diesen Messungen sind, dass die nachgiebige Lagerung einer Drehzahl von 6000 upm ohne jegliche Probleme standhält. Die Magnetkupplung sowie deren Schnittstellen (Magnetkupplungshälfte/Welle und Magnetkupplungshälfte/Spindel) funktionieren einwandfrei. Das Andrehen der Welle mit einem Magnetkupplungsabstand von ca. 3 mm und somit einem übertragbaren Drehmoment von ca. 1 Nm ist ebenso problemlos von statten gegangen.

Über den errechneten Wärmeleitwert ist zu sagen, dass er im Stillstand geringer ist, wenn der Druck von ca. 12 mbar auf ca. 2 mbar reduziert wird. Mit steigender Drehzahl erhöht sich dieser. Allerdings korreliert die Steigung zwischen 5000 upm und 6000 upm nicht ganz mit den Ergebnissen von Herrn Haidl. Die folgende Abbildung 98 zeigt die ermittelten Werte des ursprünglichen Prüfstands. Es ist eine flachere Anstiegstendenz zu erkennen als in Abbildung 97.



**Abbildung 98: Vergleichs-Wärmeleitwerte bei unterschiedlichen Drehzahlen (Haidl, 2014, S. 93)**

Dieser Unterschied kann mehrere Gründe haben:

- Unterschiedliche Fettumverteilung
- Unterschiedliche Vorspannung der Lager

Um die genaue Steigung des Graphen zu ermitteln, ist es nötig, mehrere Messreihen mit den gleichen Betriebsbedingungen durchzuführen und somit etwaig auftretende „Ausreißer“ zu identifizieren.

Abschließend ist jedoch zu sagen, dass die erhaltenen Messergebnisse und die daraus errechneten Wärmeleitwerte, wie beim ursprünglichen Prüfaufbau, mit steigender Drehzahl steigen und mit der Reduktion des Druckes sinken.

## **12. Zusammenfassung und Ausblick**

Dieses Kapitel fasst die gesamte Arbeit nochmals kurz zusammen und gibt einen Ausblick über den künftigen Einsatz des Prüfstandes.

### **12.1. Zusammenfassung**

In dieser Arbeit wurde ein bereits vorhandener Wärmeleitprüfstand detailliert analysiert und auf seine Funktionalität überprüft. Anhand dieses Prozessschrittes konnte festgestellt werden, welche Komponenten gut funktionierten bzw. welche eine Verbesserung/Umgestaltung nötig hatten. Mit den gewonnenen Daten der ausgiebigen Analyse und den Erfahrungswerten der Vorgänger war es nun möglich geeignete Konzepte zu erstellen. Diese wurden wiederum begutachtet und bewertet und schlussendlich wurde ein passendes Konzept ausgewählt.

Das ausgewählte Konzept setzt im Gegensatz zum ursprünglichen Prüfstandsaufbau nicht mehr auf eine steife Konstruktion sondern es wurde versucht die Hohlwelle inkl. Wälzlager und Lagersitze nachgiebig zu lagern. Dies wird mit dem Einsatz von O-Ringen und Gummielementen erreicht. Der Grund für die Wahl dieses Konzepts ist es, dass durch die Veränderung der nachgiebigen Elemente, hinsichtlich ihrer Größe und Materialeigenschaften (Veränderung des Werkstoffs und der Geometrie) die Lagerung sowie die Eigenfrequenzen beeinflusst werden können. Dadurch können in weiterer Folge unterschiedlichste Versuchsabläufe mit verschiedensten Beanspruchungen durchgeführt werden.

Um das Konzept nun genauer zu planen und in weiterer Folge in die Realität umzusetzen wurden einerseits Vorauslegungen und Simulationen durchgeführt und andererseits eine CAD-Konstruktion angefertigt. Anhand der analysierten Daten des ursprünglichen Messkonzepts und der CAD-Konstruktion konnte beispielsweise ein geeigneter Messflansch entwickelt werden, welcher die notwendigen Anforderungen hinsichtlich Material (Wärmeleitwert) und Funktionalität erfüllt. Außerdem ist es dadurch möglich neu anzufertigende Komponenten so zu konstruieren, dass der enge Raum der Vakuumkammer optimal ausgenutzt wird. Es folgte die Einführung eines Modulsystems, indem die einzelnen Komponenten wie beispielsweise die Induktionsheizung so gestaltet wurden, dass sie möglichst einfach montiert bzw. wieder demontiert werden können. Dies garantiert eine hohe Flexibilität des Systems und erleichtert etwaige Nachadjustierungen.

Schlussendlich wurde der neu entwickelte Prüfstand gefertigt, aufgebaut und in Betrieb genommen. Gestartet wurde mit schrittweisem Zusammenbau der Baugruppe, gefolgt von Komponenten- und Systemtests (z.B.: die Dichtheit des Kühlsystems, Funktion der Heizung, Überprüfung der Sensorik usw.) bis hin zur Durchführung einiger, probeweise ausgewählter Versuche.

### **12.2. Ausblick**

Durch die Weiterentwicklung dieses Wärmeleitprüfstandes wurde die Grundlage für einen automatisierten Prüfbetrieb gelegt, mit welchem verschiedenste Lagertypen unter unterschiedlichen Beanspruchungsprofilen getestet werden können.

Vorerst sei erwähnt, dass mit Hilfe des ursprünglichen Prüfstands bereits einige Versuche durchgeführt wurden und die Erkenntnisse daraus auf jeden Fall in die weitere Planung der Versuchsabläufe miteinbezogen werden sollte (siehe Masterarbeit Haidl).

Außerdem ist es sinnvoll den Einfluss der Vorspannung gleich am Anfang „grob“ zu bestimmen, indem man Federn abwechselnd mit beispielsweise 50N und 500N verwendet und dadurch eine Aussage treffen kann, ob sich eine genauere Abstufung lohnt.

Im Rahmen eines automatisierten Prüfbetriebs ist es notwendig die Induktionsheizung zu verbessern. Dies geschieht am besten, indem die Hohlwelle aus einem ferromagnetischen Stahl (wie beispielsweise Baustahl S355) gefertigt wird. Dadurch erreicht man eine höhere Heizleistung, was sich positiv auf die Wärmeströme auswirkt.

Ein weiterer Verbesserungsvorschlag ist das Adaptieren der Temperaturmessung der Kühlung, welche in erster Instanz vernachlässigt wurde. Hierzu ist es notwendig eine konstante Temperatur des zufließenden Mediums zu garantieren. Die diskutierten Konzepte hierfür sind:

- Variante 1: Durch Verwendung von Eiswasser als zufließendes Medium erhält man eine konstante Eingangstemperatur.
- Variante 2: Durch die Regelung mittels Wärmetauscher, was allerdings etwas aufwendiger wäre.

### 13. Literaturverzeichnis

- (2011). Von SOCLAIRELECTRONIC: <http://www.socclair.ch/page/anschlussstechnik.html> abgerufen
- Buchroithner, A., & Bader, M. (2012). *IEEE*. Florenz: Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik.
- Buchroithner, A., & Bader, M. (2012). *Systematische Analyse von Hybridfahrzeugen mit Schwungradspeicher unter Erfassung von Entwicklungstendenzen*. Graz: Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik.
- Burgholzer, S. (2014). *Entwicklung und Inbetriebnahme eines Prüfstandes für die versuchsgestützte Untersuchung von Flywheel-Berstgehäusen*. TU Graz.
- Dresig, H. (2006). *Schwingung mechanischer Antriebssysteme*. Chemnitz: Springer.
- DST Magnetic Couplings. (2015). Von [http://www.dst-magnetic-couplings.com/files/userdata/fotos/produkte/2\\_Borohardcan\\_017\\_800x800.jpg](http://www.dst-magnetic-couplings.com/files/userdata/fotos/produkte/2_Borohardcan_017_800x800.jpg) abgerufen
- Friswell, Penny, Garvey, & Lees. (2012). *Dynamic of Rotating Machines*. Cambridge: Cambridge.
- Gasch, Nordmann, & Pfützner. (2006). *Rotordynamik*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Grppe, S. (2008). *Hauptkatalog SKF*. SKF.
- Haidl, P. (2014). *Thermische Betrachtung von Kugellagern unter besonderen Berücksichtigungen*. TU Graz.
- Hering, E., Martin, R., & Stohrer, M. (2012). *Physik für Ingenieure*. Berlin Heidelberg: Springer.
- igus. (2015). Von [http://www.igus.at/contentData/wpck/images/global/1\\_2/drylin\\_w\\_einzelschiene\\_r\\_und\\_1.jpg](http://www.igus.at/contentData/wpck/images/global/1_2/drylin_w_einzelschiene_r_und_1.jpg) abgerufen
- JUMO. (2007). Typenblatt 906125. Fluda, Germany.
- KG, S. (2006). *Wälzlager FAG*. Schaeffler.
- Kopeinig, F. (2012). *Konzeption eines geeigneten Messkonzeptes zur Bestimmung von Wärmeflüssen in rotierenden und ruhenden Komponenten*. TU Graz.
- Mathematical Engineering*. (2015). Von <http://me-lrt.de/bestimmung-der-parameter-eines-feder-masse-daempfer-systems> abgerufen
- Mechatron GmbH*. (2015). Von [http://www.mechatron-gmbh.de/fileadmin/\\_processed\\_/csm\\_Slider-Bilder\\_-\\_professional\\_HFP6\\_24c142d171.jpg](http://www.mechatron-gmbh.de/fileadmin/_processed_/csm_Slider-Bilder_-_professional_HFP6_24c142d171.jpg) abgerufen

- Mobac GmbH.* (2015). Von [http://www.mobac.de/deutsch/z\\_folder/index\\_z.php?content=magnetscheiben-kuppl](http://www.mobac.de/deutsch/z_folder/index_z.php?content=magnetscheiben-kuppl) abgerufen
- Modellbau Lindinger.* (2015). Von [http://shop.lindinger.at/product\\_info.php?products\\_id=21403](http://shop.lindinger.at/product_info.php?products_id=21403) abgerufen
- National Instruments, N. (2010). Von <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/de/nid/208804> abgerufen
- Optris.* (2014). Von <http://www.processparameters.co.uk/wp-content/uploads/2014/01/Optris-CT-XL-3M.jpg> abgerufen
- Recheis, M., Buchroithner, A., Bader, M., Wegleiter, H., Schweighofer, B., & Gallien, T. (2013). *Improving kinetic energy storage for vehicles through the combination of rolling element and active magnetic bearings*. Graz: Graz University of Technology.
- Riepan, S. (2013). *Betrachtung des Wärmedurchgangs von fettgeschmierten Wälzlagern unter für den Betrieb von Schwungrädern charakteristischen Bedingungen*. TU Graz.
- Schaeffler.* (2015). Von [http://medias.schaeffler.com/medias/de!hp.tg.cat/tg\\_hr\\*ST4\\_1652155275](http://medias.schaeffler.com/medias/de!hp.tg.cat/tg_hr*ST4_1652155275) abgerufen
- SKF.* (2015). Von <http://www.skf.com/at/products/bearings-units-housings/ball-bearings/principles/application-of-bearings/bearing-preload/determining-preload-force/index.html> abgerufen
- SKF.* (2015). Von <http://www.skf.com/binary/21-34447/width150/XL-Hybrid-DGGB.jpg> abgerufen
- Takeuchi, Dickey, Demsky, Lue, Kirsch, & Frantz. (2004). *A Methodology for Measuring Thermal Properties of Bearings in Motion*. Los Angeles .
- US Synthetic Bearings. (2014). *Diamond as a Bearing Material*. Von based on: Bertagnolli, US Synthetic; Roberts et al., De Beers; Cooley, US Synthetic; Jiang Qian, US Synthetic; Glowka, SNL; Sexton, US Synthetic; Lin, UC Berkeley, MatWeb.com, Cerco.: [http://ussbearings.com/bearings\\_site/research\\_aritvle/949/](http://ussbearings.com/bearings_site/research_aritvle/949/) abgerufen
- uwe electronic.* (2015). Von <http://www.uweelectronic.de/de/temperaturmanagement-2/thermosensoren/2-3-und-4-leitertechnik.html> abgerufen
- Willner, K. (2003). *Kontinuums- und Kontakmechanik: Synthtische und alnalytische Darstellung*. New York : Springer .

## 14. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Thermische Simulation (Buchroithner & Bader, IEEE, 2012).....	4 -
Abbildung 2: Halbschnitt eines typischen FESS (Buchroithner & Bader, 2012).....	6 -
Abbildung 3: FESS in einem Hybridfahrzeug (Buchroithner & Bader, 2012) .....	6 -
Abbildung 4: Automatisierung Drehzahl .....	8 -
Abbildung 5: Veränderung der Vorspannkraft.....	9 -
Abbildung 6: Schmierung der Kugel .....	11 -
Abbildung 7: Hybridlager (SKF, 2015).....	12 -
Abbildung 8: Erstes verwirklichtes Konzept des Prüfstands (Kopeinig, 2012, S. 54).....	13 -
Abbildung 9: Vakuumkammer.....	14 -
Abbildung 10: Prinzip Induktionsheizung (Kopeinig, 2012, S. 44f) und Version 1 (Haidl, 2014, S. 62).....	15 -
Abbildung 11: Magnetkupplung Version 1 (Riepan, 2013, S. 46) .....	15 -
Abbildung 12: Versagen der Magnetkupplung .....	16 -
Abbildung 13: HSC – Spindel (Mechatron GmbH , 2015) .....	19 -
Abbildung 14: Magnetkupplung mit Spalttopf (DST Magnetic Couplings, 2015) .....	19 -
Abbildung 15: Magnetscheibenkupplung & Drehmomentverlauf (Mobac GmbH, 2015)...	20 -
Abbildung 16: Konzept 1 .....	22 -
Abbildung 17: Detail 1 (Konzept 1) .....	23 -
Abbildung 18: Detail 2 (Konzept 1) .....	23 -
Abbildung 19: Konzept 2 .....	24 -
Abbildung 20: Konzept 3 .....	27 -
Abbildung 21: Konzept 4 .....	29 -
Abbildung 22: Konzept 4 .....	32 -
Abbildung 23: Unterkritischer/Überkritischer Betrieb (Gasch, Nordmann, & Pfützner, 2006)..-	33 -
Abbildung 24: Zerstörung durch Resonanz (Burgholzer, 2014, S. 65) .....	33 -
Abbildung 25: Beispiel Feder-Dämpfer-System (Mathematical Engineering, 2015) .....	34 -
Abbildung 26: Literaturangaben für Steifigkeiten und Dämpfungsbeiwerte (Gasch, Nordmann, & Pfützner, 2006, S. 130) .....	35 -
Abbildung 27: Modelliertes System.....	36 -
Abbildung 28: Campbelldiagramm: Ergebnis der Eigenfrequenzsimulation .....	37 -
Abbildung 29: O-Anordnung (1) und X-Anordnung (2) (Schaeffler, 2015) .....	37 -
Abbildung 30: Lagersituation des ursprünglichen Prüfstand (Haidl, 2014, S. 49) .....	38 -
Abbildung 31: Aktuelle Lagersituation .....	39 -
Abbildung 32: Kräftesituation an den Wälzlagern .....	40 -
Abbildung 33: Vergleich, Anordnung ohne Lagerpaar .....	41 -
Abbildung 34: Ursprüngliches Messkonzept (Haidl, 2014, S. 67) .....	42 -
Abbildung 35: Brückenschaltung (Haidl, 2014, S. 70) .....	43 -
Abbildung 36: Extrapolation $T_A$ (Haidl, 2014, S. 75) .....	44 -
Abbildung 37: NI 9217 Modul, (National Instruments, 2010).....	45 -

Abbildung 38: Umkonstruierter Messflansch .....	- 46 -
Abbildung 39: Querschnitt Messsteg .....	- 46 -
Abbildung 40: Anordnung Temperatursensoren .....	- 47 -
Abbildung 41: Messung Kühlsystem .....	- 48 -
Abbildung 42: Halbschnitt Vakuumkammer .....	- 49 -
Abbildung 43: Lagerschild oben .....	- 50 -
Abbildung 44: Lagerschild unten .....	- 50 -
Abbildung 45: Einbau Lagerschild oben & Lagerschild unten .....	- 51 -
Abbildung 46: Lagerblock & Halbschnitt Lagerblock.....	- 52 -
Abbildung 47: Lagerschild innen .....	- 54 -
Abbildung 48: Nutsituation Lagerschild_innen (Detailansicht) .....	- 54 -
Abbildung 49: Hohlwelle .....	- 55 -
Abbildung 50: Explosion Lagerblock mit Welle .....	- 56 -
Abbildung 51: Explosion Lagerschild innen mit Welle .....	- 57 -
Abbildung 52: Zusammenbau von Hohlwelle, Lagern und wassergekühlten Lagersitzen mit nachgiebiger Elastomer-Aufhängung.....	- 58 -
Abbildung 53: Zusammenstellung Vakuumkammer und Aufhängung .....	- 59 -
Abbildung 54: Einfügen der Vorspannelemente .....	- 60 -
Abbildung 55: Antriebseinheit .....	- 61 -
Abbildung 56: Prüfstand mit bereits eingebauten Komponenten.....	- 61 -
Abbildung 57: Gesamter Aufbau .....	- 62 -
Abbildung 58: Grundauführung Induktionsheizung (Kopeinig, 2012, S. 44f).....	- 63 -
Abbildung 59: Ferritring Bearbeitung.....	- 65 -
Abbildung 60: Rechteckiger Ferritkern .....	- 66 -
Abbildung 61: Anordnung Ferritplatten .....	- 66 -
Abbildung 62: Führungsschienen mit Gleitschlitten (igus, 2015) .....	- 67 -
Abbildung 63: Halbschnitt nach der Wicklung .....	- 68 -
Abbildung 64: Eingefasste Wicklung .....	- 69 -
Abbildung 65: Fertige Induktionsheizung .....	- 69 -
Abbildung 66: Geklebte und bereits zugeschnittene Ferritplatte .....	- 70 -
Abbildung 67: Wasserstrahlschneiden Ferrit .....	- 71 -
Abbildung 68: Ankleben der Glasfaserplatten .....	- 71 -
Abbildung 69: Gewickelte Induktionsheizung.....	- 72 -
Abbildung 70: Einfassen der Wicklung.....	- 72 -
Abbildung 71: Fertiges Induktionsheizungsmodul.....	- 73 -
Abbildung 72: Einschweißplatten.....	- 74 -
Abbildung 73: ursprüngliche Zentrierung (links) (Kopeinig, 2012, S. 58) und "neue" Zentrierung (rechts) .....	- 75 -
Abbildung 74: Sub-D Durchführung .....	- 76 -
Abbildung 75: Drucknippel M5 (Modellbau Lindinger, 2015).....	- 76 -
Abbildung 76: Kühlkanäle mit Anschlüsse .....	- 77 -
Abbildung 77: Nachgiebige Aufhängung.....	- 78 -

Abbildung 78: Detailansicht Pt-100.....	- 78 -
Abbildung 79: Einsetzen der nachgiebigen Elemente.....	- 79 -
Abbildung 80: Zusammenfügen von Vakuumkammer und nachgiebiger Aufhängung.....	- 79 -
Abbildung 81: Komponenten des Kühlsystems.....	- 80 -
Abbildung 82: Einbau Pyrometer .....	- 81 -
Abbildung 83: Anbringen des Lagerschildes unten.....	- 82 -
Abbildung 84: Aufrichten des Prüfstandes.....	- 82 -
Abbildung 85: Eingebaute Induktionsheizung .....	- 83 -
Abbildung 86: Sub-D Steckverbindung.....	- 83 -
Abbildung 87: Befestigung der Magnetkupplung .....	- 84 -
Abbildung 88: Montierte Antriebseinheit.....	- 85 -
Abbildung 89: Zusammenstellung Prüfaufbau.....	- 86 -
Abbildung 90: Aufbau Widerstandsthermometer (JUMO, 2007) .....	- 87 -
Abbildung 91: <i>Optris</i> Pyrometer mit Auswerteelektronik ( <i>Optris</i> , 2014).....	- 89 -
Abbildung 92: Pirani-Vakuumsensor .....	- 90 -
Abbildung 93: Thermisches Lagermodell (Takeuchi, et al., 2004, S. 5).....	- 90 -
Abbildung 94: Vergleich 2-Leiter und 3-Leiter-Schaltung (SOCLAIRELECTRONIC, 2011).....	- 96 -
Abbildung 95: Messrauschen bei aktiver und inaktiver Heizung (Haidl, 2014, S. 77) .....	- 96 -
Abbildung 96: maximaler/minimaler Ausschlag des Messsignals eines Pt-100 Elements mit aktiver bzw. inaktiver Induktionsheizung .....	- 97 -
Abbildung 97: Wärmeleitwert bei unterschiedlichen Drehzahlen .....	- 100 -
Abbildung 98: Vergleichs-Wärmeleitwerte bei unterschiedlichen Drehzahlen (Haidl, 2014, S. 93).....	- 101 -

## 15. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:Drehzahlübersicht.....	- 8 -
Tabelle 2: Physikalische und mechanische Eigenschaften von Lager-Materialien (US Synthetic Bearings, 2014).....	- 11 -
Tabelle 3: Abgeleitete Anforderungen.....	- 18 -
Tabelle 4: Pt-100 Widerstandsthermometer .....	- 88 -
Tabelle 5: 4 Kanal Analogeingangsmodul (National Instruments, 2010).....	- 88 -
Tabelle 6: <i>Optris</i> Pyrometer (Optris, 2014).....	- 89 -
Tabelle 7: Vacom Vakuummeter .....	- 90 -
Tabelle 8: Werte Messtoleranzen .....	- 93 -
Tabelle 9: Messung im Stillstand .....	- 98 -
Tabelle 10: Messung bei unterschiedlichen Drehzahlen .....	- 99 -

## 16. Formelverzeichnis

( 1 ) Zufließender Wärmestrom.....	- 91 -
( 2 ) Abfließender Wärmestrom .....	- 91 -
( 3 ) Wärmeleitwert .....	- 92 -
( 4 ) Messfehler zufließender Wärmestrom.....	- 93 -
( 5 ) Messfehler abfließender Wärmestrom .....	- 93 -
( 6 ) Messfehler Wärmeleitwert .....	- 94 -

## 17. Anhang

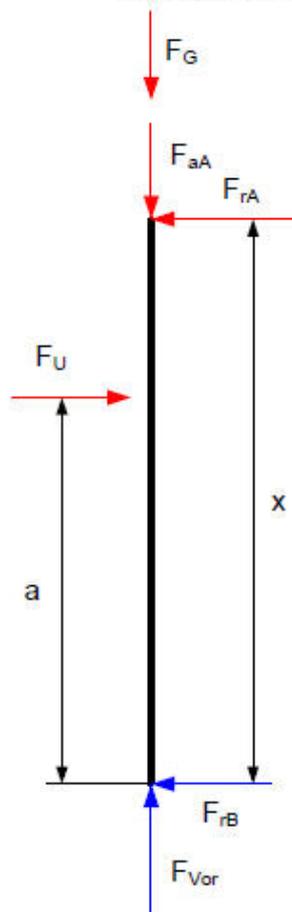
### 17.1. Lagerauslegung

# Auslegung Lagersituation Prüfstand

## Ausgangssituation

Wellendurchmesser	$d_W := 0.04$
Lagerabstand	$x := 0.208$
Abstand Kraftangriffspunkt - Lagemitte	$a := 0.130$
Gewichtskraft der Welle	$F_G := 7$
Drehzahl	$n := 20000$
Vorspannkraft	$F_{\text{vor}} := 50$
Wuchtgüte	$G_u := 2.5$
Masse	$m_a := 0.7$
Exzentrizität	$ex := 0.2 \cdot 10^{-3}$

## Kräfte-situation



### Bestimmung der Auflagerreaktionen

$$F_u := m \cdot a \cdot e^x \frac{n \cdot \pi}{30} = 0.293 \quad \text{Unwuchtkraft}$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$F_{aA} := F_{\text{vor}} - F_G = 43 \quad \text{Axialkraft Lager A}$$

$$\Sigma M_A = 0$$

$$\Sigma M_A = F_{rB} \cdot x - F_u \cdot (x - a)$$

$$F_{rB} := \frac{F_u \cdot (x - a)}{x} = 0.11 \quad \text{Radialkraft Lager B}$$

$$\Sigma F_x = 0$$

$$F_{rA} := F_{rB} - F_u = -0.183 \quad \text{Radialkraft Lager A}$$

### Lagerpaar in X-Anordnung Schrägkugellager SKF CDGA/P4A (Lager A)

$$\text{statische Tragzahl } C_{oA} := 8500 \quad \text{dynamische Tragzahl } C_A := 12400$$

$$\text{Lebensdauerexponent für Kugellager } p_k := 3$$

$$\text{Axialkraft } F_{aA} = 43$$

$$\text{Radialkraft } F_{rA} = -0.183$$

$$\text{Dynamische Tragzahl für Lagerpaare } C_{PA} := 1.625 \cdot C_A \quad C_{PA} = 20150$$

Dynamisch äquivalente Belastung

$$\frac{F_{aA}}{F_{rA} \cdot (-1)} = 234.64 > 1,14 \text{ daher}$$

$$P_A := 0.57 \cdot |F_{rA}| + 0.93 \cdot F_{aA}$$

$$P_A = 40.094$$

$$L_{hA} := \left( \frac{C_{PA}}{P_A} \right)^{p_k} \cdot \frac{10^6}{n \cdot 60}$$

$$L_{hA} = 1.058 \times 10^8 \text{ Stunden}$$

## Schrägkugellager SKF CDGA/P4A (Lager B) Stunden

statische Tragzahl  $C_{0B} := 8500$

dynamische Tragzahl  $C_B := 12400$

Lebensdauerexponent für Kugellager  $P_k := 3$

Axialkraft  $F_{\text{vor}} = 50$

Radialkraft  $F_{rB} = 0.11$

Dynamisch äquivalente Belastung

$$\frac{F_{\text{vor}}}{F_{rB}} = 454.728 > 1,14 \text{ daher}$$

$$P_B := 0.35 \cdot |F_{rA}| + 0.57 \cdot F_{aA}$$

$$P_B = 24.574$$

$$L_{hB} := \left( \frac{C_B}{P_B} \right)^{P_k} \cdot \frac{10^6}{n \cdot 60}$$

$$L_{hB} = 1.071 \times 10^8 \text{ Stunden}$$

Die gesamte Berechnung wurde mithilfe des SKF Hauptkatalogs und des FAG Wälzlagerkatalogs durchgeführt. (Grppe, 2008) (Schaeffler, 2015)

## 17.2. Glasfaserverstärkter Kunststoff

### <sup>§1-8</sup> MATERIAL ARCHIV



#### Glasfaserverstärkter Kunststoff

aus Epoxidharz

Materialgruppen: Kunststoff > Duroplaste >  
Duroplast-Verbundwerkstoffe

#### Materialbeschreibung

Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) gehören zu den Faserverbund-Kunststoffen.

Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) sind Verbundwerkstoffe aus Glasfasern und Epoxidharz (EP). Für die Herstellung der GFK werden die Fasern lose oder zu Geweben verbunden mit EP getränkt und gehärtet. Anschliessend kann eine weitere Lage Fasern aufgebracht, getränkt und gehärtet werden. Der faserverstärkte Kunststoff wird so Schicht um Schicht aufgebaut. Dieser Aufbau kann maschinell oder von Hand (Handlaminieren) erfolgen.

Die Eigenschaften der GFK hängen sowohl vom Harz als auch vom Trägermaterial, dem Glasgewebe, ab. Generell besitzen sie hervorragende elektrische und dielektrische Eigenschaften sowie eine hohe Flammwidrigkeit.

GFK können mit Hartmetallwerkzeugen zerspanend bearbeitet werden. Die im dabei anfallenden Staub enthaltenen Glasfaserteilchen können auf der Haut einen Juckreiz auslösen.

GFK eignen sich für Anwendungen, die höchsten mechanischen Anforderungen genügen müssen. Sie lassen sich vielseitig einsetzen, allerdings nicht für Gleitfunktionen.

Abkürzung: GFK  
Andere Bezeichnungen/Synonyme: Glasgewebe mit Epoxidharz

#### Hintergrund

Ökonomie:  
Glasfasern bilden den Hauptanteil an Verstärkungsfasern für faserverstärkte Kunststoffe (FVK).

#### Herstellung

## Glasfaserverstärkter Kunststoff

### Fertigung:

Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) sind Verbundwerkstoffe aus Glasfasern und Epoxidharz (EP). Für die Herstellung der GFK werden die Fasern lose oder zu Geweben verbunden mit EP getränkt und gehärtet. Anschließend kann eine weitere Lage Fasern aufgebracht, getränkt und gehärtet werden. Der faserverstärkte Kunststoff wird so Schicht um Schicht aufgebaut. Dieser Aufbau kann maschinell oder von Hand (Handlaminieren) erfolgen.

### Eigenschaften

Kennwerte beziehen sich auf: Platte 5 mm

### Erscheinung

Farbe: Beigetöne, Brauntöne, Grüntöne

### Mechanische Eigenschaften

Dichte [ $\rho$ ]: 1 700.00 bis 1 900.00 kg/m<sup>3</sup>  
Elastizitätsmodul: 24 000.00 N/mm<sup>2</sup>  
Feuchtigkeitsaufnahme: 0.150 %  
Kerbschlagzähigkeit Charpy: 33.00 kJ/m<sup>2</sup>

### Elektrische Eigenschaften

Durchschlagfestigkeit: 40.00 kV/mm  
Spezifischer elektrischer Widerstand [ $\rho$ ]:  $1.00 \times 10^{12} \Omega\text{cm}$

### Thermische Eigenschaften

Dauergebrauchstemperatur: bis 130.00 °C  
Längenausdehnungskoeffizient E-5:  $1.50 \cdot 10^{-5} 1/K$   
Wärmeleitfähigkeit/-zahl [ $\lambda$ ]: 0.300 W/mK

### Bearbeitung

#### Lieferformen:

Platten bis 100 x 100 cm, Dicken 0,8–5 mm  
Folien bis 200 x 100 cm, Dicken 0,3–0,5 mm  
Rohre 100–250 cm, Durchmesser 4/2,6–80/76 mm  
Stäbe 100–250 cm, Durchmesser 1–25 mm  
Formteile

Oberflächenbearbeitung: schleifen  
Trennen und Subtrahieren: bohren, drehen, fräsen, sägen, schneiden, stanzen

#### Arbeitsschutz:

## Glasfaserverstärkter Kunststoff

Bei der Verarbeitung von EP müssen Schutzvorkehrungen getroffen werden. Verschiedene Inhaltsstoffe können Allergien auslösen. Ein Hautkontakt führt zu Verätzungen. Beim Einatmen der Dämpfe kann es zu Reizungen und Lähmungen kommen.

Glasfaserteilchen, die sich bei der zerspannenden Bearbeitung lösen, können auf der Haut einen Juckreiz auslösen. Geschlossene Kleidung und Hautschutzsalben sind deshalb zweckmässig.

### Anwendung

#### Anwendungsgebiete:

Elektroindustrie, Bauwesen

#### Anwendungsbeispiele:

Isolierungen, tragende Elemente, Verstärkungen, Flansche

### Sammlungen

Muster in folgenden Sammlungen: ETH Zürich, Gewerbemuseum, HSLU T+A, Sitterwerk, ZHdK

#### Standort in der Sammlung

Gewerbemuseum: Kunststoff > Schublade 41

### Bezugsquellen

#### Mustersponsoren:

Amsler & Frey, Schinznach-Dorf  
Suter Kunststoffe AG, Fraubrunnen

### Quellennachweis

#### Quellen Standardwerke:

Schwarz, D. & Ebeling, F.-W. (Ed.). (2002). Kunststoffkunde. Aufbau, Eigenschaften, Verarbeitung, Anwendungen der Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere. Würzburg: Vogel.

Stand: 02.04.2015 (Online-Sohaltung: 13.11.2013)

Permalink: [materialarchiv.ch/detail/106](http://materialarchiv.ch/detail/106)

## 17.3. Edelfstahl 1.4301

<b>1.4301</b>		<b>Nichtrostender austenitischer Chrom-Nickel-Stahl</b>	
<b>X5CrNi18-10</b>		<b>C max. 0,07 Cr 17,50 – 19,50 Ni 8,00 – 10,50</b>	
<b>Kurzbeschreibung</b>	1.4301 ist der Standard der austenitischen Chrom-Nickel-Stähle. Aufgrund der hohen Korrosionsbeständigkeit und der guten Verarbeitbarkeit sowie des attraktiven Aussehens im hochglanzpolierten, geschliffenen oder gebürsteten Zustand findet er in zahlreichen Gebieten Anwendung. Da 1.4301 im geschweißten Zustand nicht gegen interkristalline Korrosion beständig ist, sollte wenn größere Partien geschweißt werden müssen und kein anschließendes Lösungsglühen möglich ist, 1.4307 eingesetzt werden.		
<b>Aktuelle und veraltete Normen</b>	EN 10088-3 AISI UNS BS JIS AFNOR DIN 17440 SIS	1.4301 304 S30400 304S31 SUS304 Z7CN18-09 1.4301 2333	X5CrNi18-10
<b>Sondergüten</b>	Feindrahtgüte Kalttauchgüte Zerspanungsoptimierte Güte Ziehgüte	Gemäß DIN-EN 10263-5 1.4301	
<b>Allgemeine Eigenschaften</b>	Korrosionsbeständigkeit Mechanische Eigenschaften Schmiedbarkeit Schweißbeignung Spanbarkeit	Gut Mittel Gut Ausgezeichnet Mittel	
<b>Besondere Eigenschaften</b>	Magnetische Eigenschaften $\mu_r \leq 1,3$ Für Tieftemperaturen geeignet Bis 700 °C verwendbar Verbesserte Zerspanung bei Sondergüte		
<b>Physikalische Eigenschaften</b>	Dichte (kg/dm <sup>3</sup> ) Elektr. Widerstand bei 20 °C ( $\Omega$ mm <sup>2</sup> /m) Magnetisierbarkeit Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C (W/m K) Spez. Wärmekapazität bei 20 °C (J/kg K) Mittlerer Wärmeausdehnungsbeiwert (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ) 20 – 100 °C 20 – 200 °C 20 – 300 °C 20 – 400 °C 20 – 500 °C	7,90 0,73 Sehr gering 15 500 16,0 16,5 17,0 17,5 18,0	
<b>Hauptanwendung</b>	Automobilindustrie Bauindustrie Chemische Industrie Dekorative Zwecke und Kücheneinrichtung Elektronische Ausrüstung Erdölindustrie/ Petrochemische Industrie Lebensmittelindustrie  Hinweis: Lieferung gemäß Bauaufsichtlicher Zulassung Z-30.3-6 und Druckbehälternorm DIN EN 10272.		
<b>Verarbeitung</b>	Spangebende Verarbeitung Freiform- und Gesenkschmieden Kaltumformung Kalttauchen Polierbarkeit	Ja Ja Ja Ja Ja	

# 1.4301

**X5CrNi18-10****Liefermöglichkeiten**

Walzdraht  $\varnothing$  5,50 – 27 mm  
 Stabstahl  $\varnothing$  7,00 – 250 mm  
 Blankstahl in Stäben  $\varnothing$  2,00 – 250 mm  
 Blankstahl in Ringen  $\varnothing$  2,00 – 20 mm  
 Lösungsgeglüht abgeschreckt, gebeizt, gezogen, geschmiedet, gerichtet, geschält und geschliffen.  
 Abmessungen  $\geq$  250 mm nach Rücksprache.

**Nachfragetendenz**

Fallend

**Korrosionsbeständigkeit (PREN = 17,5 – 21,36)**

Die Bildung von Chromkarbiden und die damit verbundenen chromverarmten Bereiche in der Umgebung dieser Ausscheidungen macht diesen Stahl anfällig für interkristalline Korrosion. Obwohl im Lieferzustand (Lösungsgeglüht) keine Gefahr der interkristallinen Korrosion besteht, kann diese nach Schweißen oder nach Einsatz bei hohen Temperaturen einsetzen. Eine gute Korrosionsbeständigkeit zeigt sich in natürlichen Umweltmedien (Wasser, ländliche und städtische Atmosphäre) bei Abwesenheit von bedeutenden Chlor- und Salzkonzentrationen. 1.4301 ist nicht für Einsatzgebiete geeignet, bei denen es zum Kontakt mit Meerwasser kommt, noch ist er für den Einsatz in Schwimmbädern geeignet.

**Wärmebehandlung/mechanische Eigenschaften**

Die optimalen Eigenschaften bezüglich Verarbeitung und Verwendung werden durch ein Lösungsglühen im Temperaturbereich von 1000 °C – 1100 °C mit anschließendem raschen Abkühlen an Luft oder Wasser erreicht. Da diese Güte zur Ausscheidung von Chromkarbiden neigt, muss die Zeit im Temperaturbereich 400 °C – 850 °C sowohl bei der Herstellung als auch bei der Verarbeitung sorgfältig begrenzt werden. In diesem Zustand gelten die folgenden Werte für die mechanischen Eigenschaften:

		Norm	Typische Werte (ca.)			
		längs	quer	längs		
Streckgrenze (MPa)	$R_{p0,2}$	$\leq$ 160	160 – 250	1 – 20*	21 – 80	$\geq$ 80
Zugfestigkeit (MPa)	$R_m$	$\geq$ 190	$\geq$ 190	360	360	340
Zugfestigkeit (MPa)	$R_m$	500 – 700	500 – 700	660	660	640
Bruchdehnung (%)	$A_5$	$\geq$ 25	$\geq$ 35	50	50	55
Härte	HB	$\leq$ 215		195	195	190
Kerbschlagarbeit (J) 25 °C	ISO-V	$\geq$ 100	$\geq$ 60	225	225	

\*Angegebene Werte gelten für den nicht kaltverfestigten Zustand.

Typisches Verfestigungsschaubild siehe Rückseite.

Für dickere Abmessungen ( $d \geq 250$  mm) müssen die mechanischen Eigenschaften vereinbart werden, oder die Lieferung geschieht in Anlehnung an die angegebenen Werte.

**Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen**

Typisches Diagramm siehe Rückseite.

**Schweißen**

1.4301 ist mit und ohne Schweißzusatzwerkstoff schweißbar. Ist ein Schweißzusatz notwendig, verwenden Sie 1.4316 (AISI 308L). Die maximale Zwischenlagentemperatur liegt bei 200 °C. Eine Wärmebehandlung nach dem Schweißen ist im allgemeinen nicht notwendig. Die Korrosionsbeständigkeit wird durch die Wärmeeinbringung beim Schweißen beeinflusst.

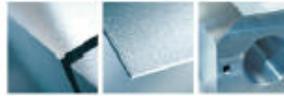
**Schmieden**

1.4301 wird üblicherweise langsam auf ca. 1150 °C – 1180 °C erwärmt, sodass im Temperaturbereich von 1180 °C und 950 °C geschmiedet werden kann. Die Abkühlung findet an Luft oder Wasser statt.

**Spanende Bearbeitung für 1.4301**

Wie alle austenitischen Güten verfestigt auch der 1.4301 bei der Zerspanung. Somit muss die Spantiefe so groß gewählt werden, dass der verfestigte Bereich unterschritten wird.

## 17.4. Aluminiumlegierung 7075



Al Walzplatten

EN AW 7075

TECHNISCHES DATENBLATT

### EN AW 7075

Werkstoffangaben	
Legierung	EN AW 7075 [AlZn5,5MgCu]
Legierungstyp	aushärtbar
Werkstoffzustand	T6 / T651
Oberfläche	walzblank oder gebürstet

Mechanische Eigenschaften <sup>1)</sup>		dickenabhängig
Dehngrenze $R_{p0,2}$	[MPa]	220 - 460
Zugfestigkeit $R_m$	[MPa]	360 - 540
Bruchdehnung $A_{50}$	[%]	1 - 6
Härte HBW	[2,5/62,5]	104 - 160

Physikalische Eigenschaften <sup>1)</sup>		typische Werte
Dichte	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,80
Elastizitätsmodul	[GPa]	71
Elektrische Leitfähigkeit	[m/Ω · mm <sup>2</sup> ]	19 - 23
Wärmeausdehnungskoeffizient	[K <sup>-1</sup> · 10 <sup>-6</sup> ]	23,4
Wärmeleitfähigkeit	[W/m · K]	130 - 160
Spezifische Wärmekapazität	[J/kg · K]	862

Technologische Eigenschaften <sup>1)</sup>		
Formstabilität / Eigenspannung		5 - 6
Zerspanbarkeit		1
Erodierbarkeit		1
Schweißen (Gas / WIG / MIG / Widerstand / EB)		6 / 6 / 6 / 2 / 5
Korrosionsbeständigkeit (Meerwasser / Witterung / SpRK)		5 / 5 / 5
Temperatureinsatz (max. °C bei Dauer / Kurzeinsatz) <sup>2)</sup>		90 / 120
Anodisieren (technisch / dekorativ / Hart-) <sup>4)</sup>		4 / 6 / 2
Polierbarkeit		1
Eignung zum Strukturätzen		1
Kontakt mit Lebensmitteln (nach EN 602)		nein

Toleranzen			
bei Dicke [mm]	Ebenheit [mm] <sup>2)</sup>	Dicke [mm]	Länge & Breite [mm]
10 - 200	EN 485-3	EN 485-3	EN 485-3
Zuschnitte ≤ 150			DIN ISO 2768-1m
Zuschnitte > 150			-0 / +5 mm

Standard Lieferprogramm		
Platten Formate [mm]	1.520 × 3.020	in Dicken von 10 - 200 mm
Platten Dicke [mm]	10 ; 12 ; 15 ; 20 ; 25 ; 30 ; 35 ; 40 ; 45 ; 50	
	55 ; 60 ; 70 ; 80 ; 90 ; 100 ; 120 ; 130 ; 140 ; 150 ; 160 ; 180 ; 200	
Andere Abmessungen auf Anfrage		

Stand: 16.02.2015

- 1) Typische Werte bei Raumtemperatur.
- 2) Relative Bewertung der Aluminiumwerkstoffe von 1 (sehr gut) bis 6 (ungeeignet).
- 3) Ohne Festigkeitsverlust nach Abkühlung.
- 4) Zusätzl. technisches Anodisieren. Keine Gewährleistung auf Farbgestaltung/Leistungsbildung.
- 5) Die Ebenheitstoleranzen werden ausschließlich an ganzen Platten (pro Meter) auf Messböcken ermittelt.

## 17.5. Klebstoff UHU plus Endfest 300

# UHU Technisches Merkblatt

**suter-kunststoffe ag**  
swiss-composite.ch

## UHU plus endfest 300

CH-3312 Fraubrunnen 031 763 60 60 Fax 031 763 60 61  
www.swiss-composite.ch info@swiss-composite.ch

UHU plus endfest 300 ist ein lösungsmittelfreier Zweikomponenten-Klebstoff auf Epoxidharz-Basis, der hochfeste Klebverbindungen an zahlreichen Werkstoffen ermöglicht.

Spezifikation UHU plus endfest 300	
Chemische Basis	Epoxidharz
Klebertechnik	Naßkleben
Temperatureinsatzbereich	- 40°C bis + 80°C (abhängig von Material und Konstruktion; auch höhere Temperaturen möglich)
Konsistenz	Binder: hochviskos Härter: mittelviskos
Viskosität [mPa·sec]	Binder: 40000 Härter: 30000
Basis	Binder: Epoxidharz Härter: aliphatische Amine
Lösungsmittel	keine
Festkörpergehalt [%]	100
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Binder: ca. 1,2 Härter: ca. 0,98
Flammpunkt [°C]	Binder: ca. 210 Härter: ca. 110
Gefahrenklasse (VbF)	keine
Kennzeichnung gemäß Gefahrstoff-Verordnung	Binder: reizend, enthält Epoxidharz Härter: reizend, enthält Amine
Gefahrensymbol	Xi; N
Topfzeit (bei 20°C)	90 min
Festigkeitswerte	Mischungsverhältnis (Volumen) 1:1, Prüfung bei Raumtemperatur
Handfestigkeit	6 h
Funktionsfestigkeit	12 h
Endfestigkeit	24 h
Zugscherfestigkeiten (Aluminium)	Mischungsverhältnis (Volumen) 1:1, Prüfung bei Raumtemperatur 10 h: 500 N/cm <sup>2</sup> 24 h: 1200 N/cm <sup>2</sup> 5 Tage: 1700 N/cm <sup>2</sup> 1 Monat: 1700 N/cm <sup>2</sup>
Mischungsverhältnis (Volumen)	1:1 (andere Mischungsverhältnisse möglich)
optimale Verarbeitungstemperatur	+18°C bis +20°C
Beständigkeit	viele Lösungsmittel, verdünnte Säuren und Laugen
nicht geeignete Materialien	Polyethylen, Polypropylen, Teflon®, Polystyrol, Weich-PVC und sonstige Materialien
Farbe	Binder: opak Härter: honigfarben

# **UHU**    **Technisches Merkblatt**

## **UHU plus endfest 300**

### **Eigenschaften:**

Nach dem Mischen der beiden Komponenten härtet UHU plus praktisch ohne Volumenverlust zu einem duroplastischen Kunstharz. Die Füge­teile benötigen lediglich den Fixierdruck. Anwendung höheren Druckes ist nicht erforderlich. Die Härtung erfolgt auch unter Luftabschluß. Die Verarbeitungskonsistenz ist so eingestellt, daß bei Raumtemperatur gute Benetzungsfähigkeit mit minimalem Laufbestreben vereinigt ist.

Das UHU plus-System gibt dem Anwender die Möglichkeit, durch Variation der Härtermenge zu härteren oder weiche­ren Endprodukten zu gelangen:

- a) Mischungsverhältnis    100 Gewichtsteile Binder    + 50 Gewichtsteile Härter  
ergibt ein härteres Endprodukt mit etwas erhöhter Wärme-, Wasser- und Chemikalienbeständigkeit.
- b) Mischungsverhältnis    100 Gewichtsteile Binder    + 80 Gewichtsteile Härter  
(gleichlange Stränge aus den Tuben) ist das normale Mischungsverhältnis für universelle Anwendung.
- c) Mischungsverhältnis    100 Gewichtsteile Binder    + 120 Gewichtsteile Härter  
ergibt ein Endprodukt mit guter Flexibilität und verbesserter Schäl­festigkeit, jedoch mit verminderter Wärme-, Wasser- und Chemikalienbeständigkeit.

In diesen Grenzen ist je nach Erfordernis jedes Mischungsverhältnis möglich. Mit erhöhtem Härteranteil verlängern sich Topfzeit und Härtung minimal.

Temperaturen unter 18 °C bremsen den Härtungsvorgang und ergeben schlechte Bindefestig­keiten, deshalb ist für die Verarbeitung in kühlen Arbeitsräumen oder im Freien Wärme­zufuhr notwendig (Heizlüfter, Infrarotstrahler oder dergleichen).

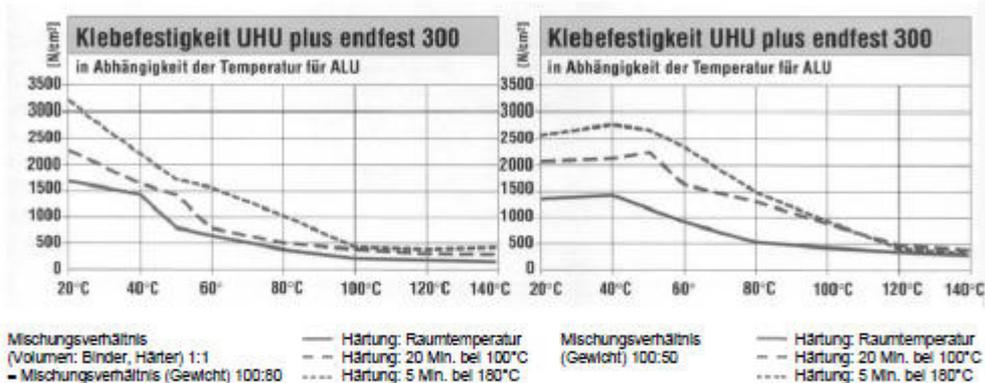
Besonders hohe Klebefestig­keiten erzielt man, wenn die Härtung bei erhöhter Temperatur im Bereich zwischen 70 °C und 180 °C erfolgt. Hierzu folgende Temperatur/Zeitrelationen als minimale Härtungszeiten:

- 45 Minuten bei 70 °C
- 30 Minuten bei 80 °C
- 20 Minuten bei 90 °C
- 10 Minuten bei 100 °C
- 7 Minuten bei 120 °C
- 6 Minuten bei 140 °C
- 5 Minuten bei 150 - 180 °C

Temperaturen über 200 °C sind weder bei der Härtung noch bei späterer Beanspruchung der Klebung zu überschreiten, weil die Klebefestigkeit und die Stabilität der Substanz beeinträchtigt wird.

# UHU Technisches Merkblatt

## UHU plus endfest 300



**Durchführung:** In Anlehnung an DIN 53286; Proben bei 1 bar fixiert; vor Prüfung Lagerung 7 Tage bei 20°C / 65% relative Luftfeuchtigkeit; Zwick Prüfmaschine mit Temperierkammer (Prüfgeschwindigkeit: 50 mm/min)

**Prüfbedingungen:** Auftragsfläche: 25 x 10 mm = 250 mm<sup>2</sup>,  
Prüfkörper: AlCuMg1 sandgestrahlt (Korund ELK 90): 82,5 x 25 x 1,5 mm

Klebefestigkeit UHU plus endfest 300 in Abhängigkeit der Temperatur		
Temperatur	Aushärtezeit	Festigkeit*
20°C	12 h	ca. 1200 N/cm <sup>2</sup>
40°C	3 h	ca. 1800 N/cm <sup>2</sup>
70°C	45 min	ca. 2000 N/cm <sup>2</sup>
100°C	10 min	ca. 2500 N/cm <sup>2</sup>
180°C	5 min	ca. 3000 N/cm <sup>2</sup>

\* bei Zug-Scherbeanspruchung für ALU

Beim Kleben von Werkstoffen mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten ist zu beachten, daß der Klebstoff bei Temperaturschwankungen die Längenänderungen nur bis zu einem gewissen Grade aufnehmen kann. Es empfiehlt sich deshalb, in solchen Fällen den Härteranteil der Mischung zu erhöhen und damit ein flexibleres Endprodukt einzustellen.

(s. Seite 1).

Größere Metallteile, z.B. Schilder, auf Glasflächen lassen sich später nur außerordentlich schwer wieder ablösen, da man den Klebstoff mit Harzauflösemitteln nur vom Rande her angreifen kann.

An großen Glasflächen, z.B. an Schaufensterscheiben, sollten deshalb mit UHU plus keine Schilder, Buchstaben u. dgl. geklebt werden, da die Haftung am Glas so gut ist, daß Schwingungen der Scheibe unter ungünstigen Umständen Muschelbrüche im Glas bewirken können.

## 17.6. Epoxydharz L + Härter L



### Technische Daten

## Epoxydharz L

+ Härter S, L, CL, EPH 500, W 300, GL 1, GL 2, EPH 573 und EPH 161

### Beschreibung

- Dünflüssig, lösemittel- und füllstofffrei
- Schnelle Tränkung von Glas-, Aramid- und Kohlenstoffasern
- Hohe statische und dynamische Festigkeit



R&G Epoxydharz L ist ein Bisphenol A/F-Harz. Bisphenol F verringert die Viskosität und verhindert das Auskristallisieren des Harzes bei niedrigen Lagertemperaturen (unter + 5 °C).

Das Harz ist difunktionell reaktivverdünnt und gilt als physiologisch gut verträglich.

Durch die niedrige Oberflächenspannung zeigt das System eine gute Füllstoffaufnahme. Verstärkungsfasern wie Glas, Aramid und Kohlenstoff werden sehr gut benetzt.

### Anwendungsgebiet

Faserverbundwerkstoffe (GFK, AFK, CFK) im Flugzeugbau (UL), Modellbau, Sportgerätebau, Formenbau und Motorsport.

### Verarbeitung

Das Harz eignet sich für alle Verarbeitungsverfahren wie z.B. Handlaminieren, Wickeln, Gießen und Pressen (auch im Vakuum). Hochfeste Verklebungen von Metall, Holz, Kunststoffen, Keramik etc. lassen sich ohne Anpreßdruck ausführen. Die Aushärtung verläuft praktisch schwindfrei.

Die Härter S, L, CL, EPH 500, W 300, GL 1, GL 2, EPH 573 und EPH 161 sind Formulierungen aus aliphatischen und cycloaliphatischen Aminen. Sie bestimmen die Eigenschaften der Formstoffe.

Einzelpackungen: 2,5 kg - 200 kg Bestell-Nr. 100 135-X, Arbeitspackungen: (siehe jeweiliger Härter)

Epoxydharz L	Einheit	Wert
Lieferform	-	flüssig
Farbe	-	gelblich
Dichte	g/cm <sup>3</sup> /23 °C	1,14 ± 0,01
Viskosität	mPa*s/25 °C	710 ± 70
Epoxydwert	100/Äquivalent	0,56
Epoxydäquivalent	g/Äquivalent	179
Chlorgehalt gesamt	%	< 1
Chlorgehalt hydrolysierbar	ppm	< 500
Dampfdruck	mbar/ 25 °C	< 1
Brechungsindex	n <sub>D</sub> 25	1,547
Flammpunkt (ISO 3879)	°C	>150
Lagerung (verschlossen, bei 15 °C)	Monate	36

Ausgabe 12/2014, Änderungen vorbehalten

Alle Informationen, Empfehlungen oder Ratschläge seitens der R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH erfolgen nach bestem Wissen und Gewissen. Sie gelten als unverbindliche Hinweise und enthalten weder ausdrückliche noch stillschweigende Zusicherungen noch eine Garantie bestimmter Eigenschaften. Bei den angegebenen Eigenschaftswerten handelt es sich um typische Werte. Empfehlungen oder Ratschläge beschreiben unsere Produkte und mögliche Anwendungen in genereller oder beispielhafter, aber nicht auf den Einzelfall bezogener Weise. Im Zuge der ständigen technischen Weiterentwicklung und Verbesserung unserer Produkte können sich Veränderungen in den Kennwerten, Texten und Graphiken ergeben; ein besonderer Hinweis auf eine evtl. Veränderung erfolgt nicht. Der Kunde prüft eigenverantwortlich unsere Produkte in Hinblick auf ihre Eignung für die beabsichtigten Verfahren und Zwecke sowie ihre entsprechende Verarbeitbarkeit, da die technischen Einsatzmöglichkeiten unserer Produkte zahlreich und je nach Fall sehr unterschiedlich sind. Sie entziehen sich daher unseren Kontrollmöglichkeiten und legen ausschließlich im Verantwortungsbereich des Kunden. Etwalige Schutzrechte sowie bestehende Gesetze und Bestimmungen sind vom Abnehmer bzw. Anwender in eigener Verantwortung zu beachten. Die Veröffentlichung ist keine Lizenz und beabsichtigt nicht die Verletzung irgendwelcher Patente. PoxySystems® ist ein registriertes Warenzeichen von R&G.



**suter-kunststoffe ag**  
swiss-composite.ch

CH-3312 Fraubrunnen 031 763 60 60 Fax 031 763 60 61



Technische Daten aller Epoxydharzsysteme mit Epoxydharz L im Überblick

	Harz L + Härter S	Harz L + Härter L	Harz L + Härter CL	Harz L + Härter EPH 500	Harz L + Härter W 300
<b>Verarbeitungszeit</b> 100 g-Ansatz bei 20 °C	15 Min	40 min	60 min	60 min	300 min
<b>Mischungsverhältnis</b> in Gewichtsteilen	100 : 40	100 : 40	100 : 30	100 : 63	100 : 35
<b>Mischungsverhältnis</b> in Volumenteilen	100 : 45	100 : 45	100 : 36	100 : 71	100 : 42
<b>Mischviskosität</b> in mPa.s	887 ± 100	580 ± 100	500 ± 100	620 ± 100	300 ± 100
<b>Farbe</b>	hellgelb	hellgelb	transparent	hellgelb	hochtransparent
<b>Anwendungsgebiete</b>	Schneller Härter für kleinere Bauteile und Reparaturen. Auch zum Verkleben geeignet.	Härter mit mittlerer Topfzeit für viele Anwendungen im Modell- und Sportgerätebau. Auch zum Verkleben geeignet	Transparenter Härter mit mittlerer Verarbeitungszeit. Speziell für CFK-Beschichtungen entwickelt.	Härter für viele Anwendungen im Modell- und Sportgerätebau. Auch zum Verkleben geeignet.	Hochtransparenter Härter mit verlängerter Topfzeit. Für Beschichtungen und dickwandige Laminats. Auch zum Verkleben geeignet.
<b>Eigenschaften</b>	Mittlere Viskosität Lösemittel- und füllstofffrei Frei von Nonylphenol und Benzylalkohol Hohe statische und dynamische Festigkeit nicht zytotoxisch (zellschädigend)	Geringe Viskosität Lösemittel- und füllstofffrei Hohe statische und dynamische Festigkeit nicht zytotoxisch (zellschädigend)	Geringe Viskosität Lösemittel- und füllstofffrei Frei von Nonylphenol und Benzylalkohol Hohe statische und dynamische Festigkeit Weitgehend UV-stabil Klebefreie Härtung auch bei dünnster Schichten	Mittlere Viskosität Lösemittel- und füllstofffrei Frei von Nonylphenol nicht zytotoxisch (zellschädigend) Klebefreie Härtung auch bei dünnster Schichten	Sehr geringe Viskosität Lösemittel- und füllstofffrei Frei von Nonylphenol und Benzylalkohol Sehr gute UV-Beständigkeit Klebefreie Härtung auch bei dünnster Schichten Sehr gute Schlagzähigkeit
<b>Härtungstemperaturen</b>	ab 5 °C	ab 12°C	ab 15 °C	ab 10 °C	ab 15 °C
<b>Zulassung</b>	Cytox	Cytox		Cytox	
<b>Härtung</b>	Härtung bei RT (23° C) über 16-24 h	Härtung bei RT (23 °C) über 24 h	24 h bei RT (23 °C) über 24 h Warmhärtung optional	Härtung bei RT (23 °C) über 24-36 h	Härtung bei RT (23 °C) 48 -72 h
<b>Wärmeformbeständigkeit</b>	= 60 °C	= 60 °C	Max. 85 °C bei zus. Temperung 15 h / 70 °C	= 60 °C	= 60 °C

Ausgabe 1/2014, Änderungen vorbehalten

Alle Informationen, Empfehlungen oder Ratschläge seitens der R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH erfolgen nach bestem Wissen und Gewissen. Sie gelten als unverbindliche Hinweise und enthalten weder ausdrückliche noch stillschweigende Zusicherungen noch eine Garantie bestimmter Eigenschaften. Bei den angegebenen Eigenschaftswerten handelt es sich um typische Werte. Empfehlungen oder Ratschläge beschreiben unsere Produkte und mögliche Anwendungen in genereller oder beispielhafter, aber nicht auf den Einzelfall bezogener Weise. Im Zuge der ständigen technischen Weiterentwicklung und Verbesserung unserer Produkte können sich Veränderungen in den Kernwerten, Teiltrenn- und Graphiken ergeben; ein besonderer Hinweis auf eine evtl. Veränderung erfolgt nicht. Der Kunde prüft eigenverantwortlich unsere Produkte in Hinblick auf Ihre Eignung für die beabsichtigten Verfahren und Zwecke sowie Ihre entsprechende Verarbeitbarkeit, da die technischen Einsatzmöglichkeiten unserer Produkte zahlreich und je nach Fall sehr unterschiedlich sind. Sie entziehen sich daher unseren Kontrollmöglichkeiten und legen ausschliesslich im Verantwortungsbereich des Kunden. Etwasige Schutzrechte sowie bestehende Gesetze und Bestimmungen sind vom Abnehmer bzw. Anwender in eigener Verantwortung zu beachten. Die Veröffentlichung ist keine Lizenz und beabsichtigt nicht die Verletzung irgendwelcher Patente. Poxysysteme® ist ein registriertes Warenzeichen von R&G



**suter-kunststoffe ag**  
swiss-composite.ch  
GH-3312 Fraubrunnen 031 763 60 60 Fax 763 60 61



Technische Daten aller Epoxydharzsysteme mit Epoxydharz L im Überblick

Mechanische Kennwerte Reinharzproben	Harz L + Härter S	Harz L + Härter L	Harz L + Härter CL	Harz L + Härter EPH 500	Harz L + Härter W 300
Zugfestigkeit in MPa max. bis	68	59	83	-	-
Druckfestigkeit in MPa max. bis	116	64	111	-	-
Biegefestigkeit in MPa max. bis	110	88	137	-	-
Bruchdehnung in % max. bis	-	3,6	5,5	-	-
Schlagzähigkeit in kJ/m <sup>2</sup> max. bis	-	-	-	-	-
E-Modul Biegeversuch in MPa max. bis	-	2552	3220	-	-

Mechanische Kennwerte mit CFK	Harz L + Härter S	Harz L + Härter L	Harz L + Härter CL	Harz L + Härter EPH 500	Harz L + Härter W 300
Zugfestigkeit in MPa max. bis	238	302		204	
Druckfestigkeit in MPa max. bis	390	253		203	
Biegefestigkeit in MPa max. bis	310	431		240	
Bruchdehnung in % max. bis	376	91		375	
Schlagzähigkeit in kJ/m <sup>2</sup> max. bis	14725	15900		12263	
E-Modul Biegeversuch in MPa max. bis					

Mechanische Kennwerte mit CFK	Harz L + Härter S	Harz L + Härter L	Harz L + Härter CL	Harz L + Härter EPH 500	Harz L + Härter W 300
Zugfestigkeit in MPa max. bis	384	698		343	
Druckfestigkeit in MPa max. bis		384			
Biegefestigkeit in MPa max. bis	607	720		471	
Bruchdehnung in % max. bis		49			
Schlagzähigkeit in kJ/m <sup>2</sup> max. bis	35413	50400		32400	
E-Modul Biegeversuch in MPa max. bis					

Zugfestigkeit nach DIN EN ISO 527-4 Druckfestigkeit nach DIN EN ISO 1426 Biegefestigkeit nach DIN EN ISO 14325/ Verfahren A Schlagzähigkeit nach DIN EN ISO 179-1 E-Modul Biegeversuch nach DIN EN ISO 14325 / Verfahren A	Aufbau Probekörper GFK (2 mm Dicke): 12 Lagen Glasgewebe 296 g/m <sup>2</sup> Atlas, ITG Style 92626, Quasidropfer Laminatverfäbr / Handlaminiert Härtung: 24 h bei RT + 15 h bei 60 °C	Zugfestigkeit nach DIN EN ISO 527-4 Druckfestigkeit nach DIN EN ISO 1426 Biegefestigkeit nach DIN EN ISO 14325/ Verfahren A Schlagzähigkeit nach DIN EN ISO 179-1 E-Modul Biegeversuch nach DIN EN ISO 14325 / Verfahren A Intermediäre Scherfestigkeit	Aufbau Probekörper GFK (4 mm Dicke): 36 Lagen Glasgewebe 286 g/m <sup>2</sup> Atlas, ITG Style 91745, Laminatverfäbr 0°/90° / gefertigt in KTM Härtung 24h bei RT + 15h bei 60 °C
	Aufbau Probekörper CFK (0,5 mm Dicke): 12 Lagen Kohlegewebe 200 g/m <sup>2</sup> Leimwand ,ITG Style 459 Quasidropfer Laminatverfäbr / Handlaminiert Härtung: 24 h bei RT + 15 h bei 60 °C		Aufbau Probekörper CFK (2 mm Dicke): 8 Lagen 300 g/m <sup>2</sup> Leimwand, ITG Style 450 Laminatverfäbr 0°/90° / gefertigt in KTM Härtung 24h bei RT + 15h bei 60 °C

Ausgabe 12/2014, Änderungen vorbehalten

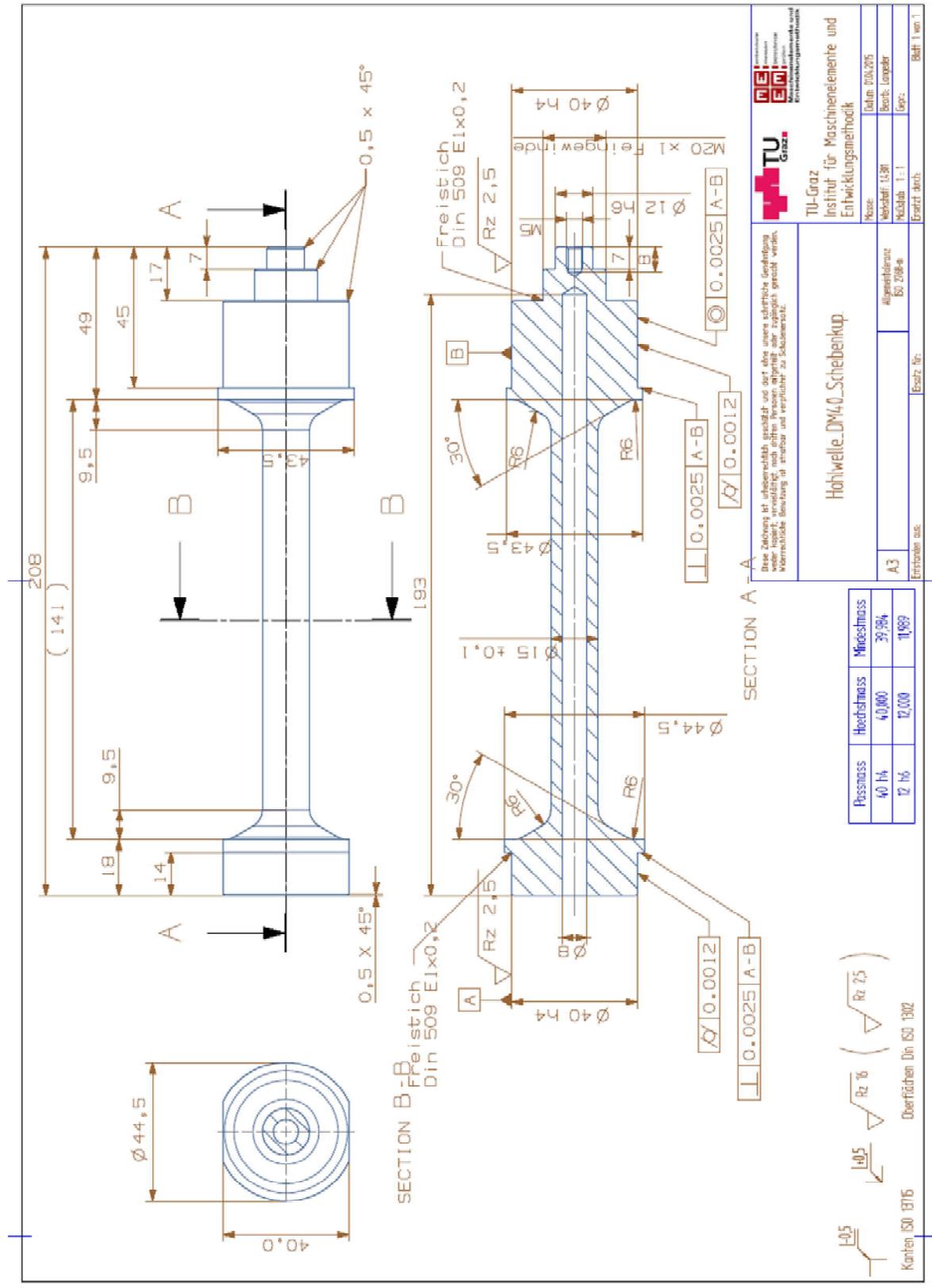
Alle Informationen, Empfehlungen oder Ratschläge seitens der R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH erfolgen nach bestem Wissen und Gewissen. Sie gelten als unverbindliche Hinweise und enthalten weder ausdrückliche noch stillschweigende Zusicherungen noch eine Garantie bestimmter Eigenschaften. Bei den angegebenen Eigenschaftskennwerten handelt es sich um typische Werte. Empfehlungen oder Ratschläge beschreiben unsere Produkte und mögliche Anwendungen in genereller oder beispielhafter, aber nicht auf den Einzelfall bezogener Weise. Im Zuge der ständigen technischen Weiterentwicklung und Verbesserung unserer Produkte können sich Veränderungen in den Kennwerten, Texten und Graphiken ergeben; ein besonderer Hinweis auf eine evtl. Veränderung erfolgt nicht. Der Kunde prüft eigenverantwortlich unsere Produkte in Hinblick auf ihre Eignung für die beschriebenen Verfahren und Zwecke sowie ihre entsprechende Verarbeitbarkeit, da die technischen Einsatzmöglichkeiten unserer Produkte zahlreich und je nach Fall sehr unterschiedlich sind. Sie entziehen sich daher unseren Kontrollmöglichkeiten und legen ausschließlich im Verantwortungsbereich des Kunden. Etwasige Schutzrechte sowie bestehende Gesetze und Bestimmungen sind vom Abnehmer bzw. Anwender in eigener Verantwortung zu beachten. Die Veröffentlichung ist keine Lizenz und beabsichtigt nicht die Verletzung irgendwelcher Patente. PolySystems® ist ein registriertes Warenzeichen von R&G



**suter-kunststoffe ag**  
swiss-composite.ch  
CH-3312 Fraubrunnen 031 763 60 60 Fax 763 60 61

## 17.7. Fertigungszeichnungen

### 17.7.1. Hohlwelle



**TU-Graz**  
**Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik**

ME  
EM

Name: \_\_\_\_\_  
 Matrikelnr.: 1581  
 Bearb.: Langgär  
 Datum: 01.04.2015  
 Blatt: Langgär  
 Blatt n von 1

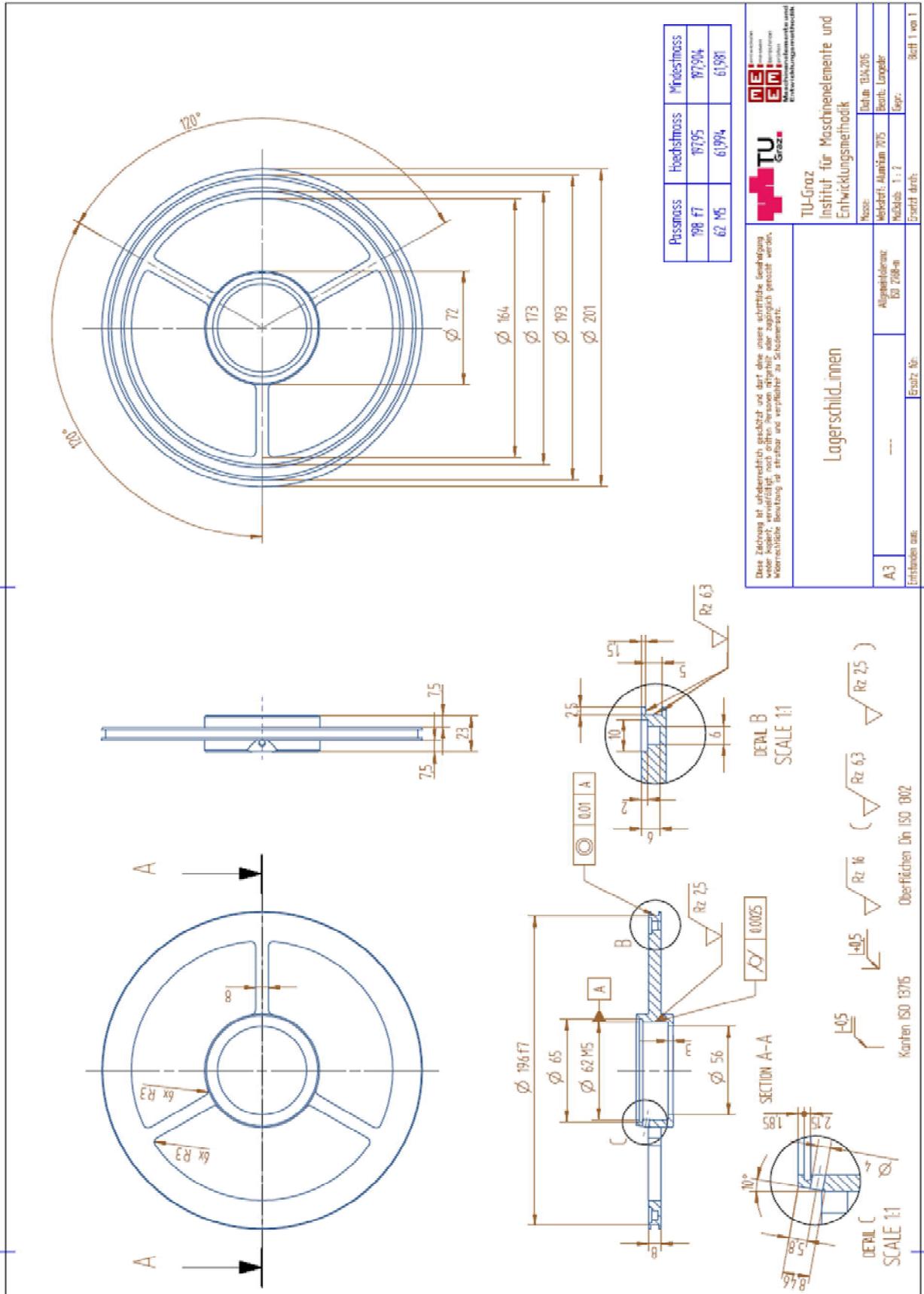
Hohlwelle\_DM40\_Schelbenkup.

Alle Angaben sind ohne Gewähr.  
 Diese Zeichnung ist urheberrechtlich geschützt und darf ohne unsere schriftliche Genehmigung weder kopiert, vervielfältigt, noch Dritten zur Verfügung gestellt werden.  
 Korrigeierende Bearbeitung ist strikto und verpflichtet zu Sanktionen.

Abgleichplan: BS 208-a  
 A3  
 Entworfen aus: \_\_\_\_\_  
 Bearb. für: \_\_\_\_\_

Passmass	Hochstmass	Mindestmass
40 H4	40,000	39,994
12 h6	12,000	11,999

### 17.7.2. Lagerschild\_innen



Passmass	Headmass	Mindestmass
98 f7	97.95	97.904
62 M5	61.994	61.981

**TU-Graz**  
**Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik**

Logo:

Name: ...  
 Matrikelnummer: ...  
 Matrikeljahr: ...  
 Gepr. durch: ...

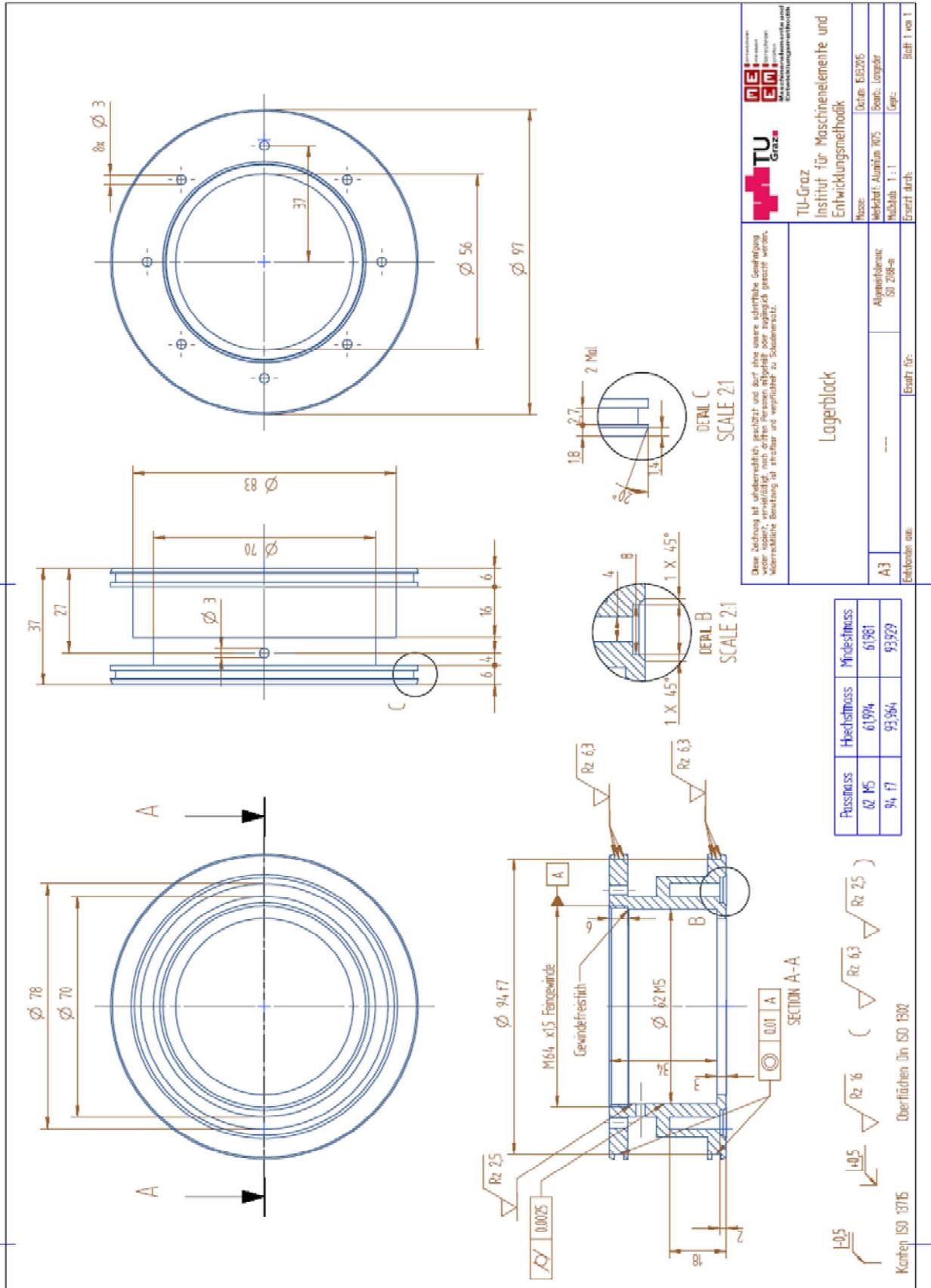
Titel: ...  
 Bearb. Langjahr: ...  
 Gepr.: ...

Algemeinwissen: ...  
 Blatt 1 von 1

Einblenden an: ...  
 Ersatz Nr.: ...

Das Zeichnen ist selbstständig geschätzt und darf ohne unsere schriftliche Genehmigung weder kopiert, vervielfältigt, noch ohne unseren schriftlichen oder zeitlich beschränkten schriftlichen Einverständnis in irgendeiner Weise veröffentlicht werden.

### 17.7.3. Lagerblock



**TU Graz**  
 TU-Graz  
 Institut für Maschinenelemente und  
 Entwicklungsmethodik

Logo: **EF** **EN** **EM**  
 Maschinenelemente und  
 Entwicklungsmethodik

Titel: E68205  
 Bearb.: Langobler  
 Maßstab: 1:1  
 Gepr.:  
 Erstellt durch:  
 Bild: 1 von 1

Material: Messing  
 Werkstoff: Aluminium N05  
 Bearbeitungsart: Laserbearbeitung  
 Maßstab: 1:1  
 Gepr.:  
 Erstellt durch:

Algemeinbezeichnung: Lagerblock  
 SI 208-m  
 A3  
 Eintr. für:  
 Ersteller: vsm

Passmass	Hochstmass	Mindestmass
62 M5	61.994	61.981
94, 17	93.964	93.929

ISO 13715  
 Oberflächen (In ISO 1302)





## 17.8. Spindellager-Bezeichnung Skf

Bezeichnungsschema für SKF-SNFA Hochgenauigkeits-Schräggugellager der Reihe 719 .. E (VEB) und 70 .. E (VEX)

<b>Einzellager:</b> S7014 CEGB/PA9AH1	S	70	14	CE	GB	/		PA9A			H1
<b>Lagersatz für den satzweisen Einbau:</b> 71910 ACE/HCP4AQBCA	<b>Vorsetzzeichen</b>	<b>Reihe</b>	<b>Größe</b>	<b>Berührungswinkel und Ausführung</b>	<b>Ausführung und Vorspannung (Einzellager)</b>		<b>Kugelmateri- al</b>	<b>Toleranz- klasse</b>	<b>Anordnung</b>	<b>Vorspan- nung</b>	<b>Nachsetz- zeichen</b>
		719	10	ACE		/	HC	P4A	QBC	A	

### Ausführung (Vorsetzzeichen)

- Offenes Lager (kein Vorsetzzeichen)
- S Abgedichtetes Lager
- V Lager mit Ringen aus NitroMax-Stahl und Kugel aus für Wälzlager geeignetem Siliziumnitrid Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (Hybridlager)

### Lagerreihe

- 719 Nach ISO-Maßreihe 19
- 70 Nach ISO-Maßreihe 10

### Lagergröße

- 6 Bohrungsdurchmesser 6 mm<sup>1</sup>
- 7 Bohrungsdurchmesser 7 mm<sup>1</sup>
- 8 Bohrungsdurchmesser 8 mm
- 9 Bohrungsdurchmesser 9 mm
- 00 Bohrungsdurchmesser 10 mm
- 01 Bohrungsdurchmesser 12 mm
- 02 Bohrungsdurchmesser 15 mm
- 03 Bohrungsdurchmesser 17 mm
- 04 (x5) Bohrungsdurchmesser 20 mm
- bis
- 24 (x5) Bohrungsdurchmesser 120 mm

### Berührungswinkel und interne Konstruktion

- CE Berührungswinkel 15°, Ausführung E für hohe Drehzahlen
- FE Berührungswinkel 18°, Ausführung E für hohe Drehzahlen
- ACE Berührungswinkel 25°, Ausführung E für hohe Drehzahlen

### Einzellager – Ausführung und Vorspannung

- Einzellager (kein Nachsetzzeichen)
- GA Einzelne Universallager für den satzweisen Einbau, für leichte Vorspannung
- GB Einzelne Universallager für den satzweisen Einbau, für mittlere Vorspannung
- GC Einzelne Universallager für den satzweisen Einbau, für hohe Vorspannung

### Käfig

- Verstärktes Hartgewebe, außenringgeführt (kein Nachsetzzeichen)

### Kugelmateri- al

- Chromstahl (kein Nachsetzzeichen)
- HC Für Wälzlager geeignetes Siliziumnitrid Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (Hybridlager)

### Toleranzklasse

- P4A Maßgenauigkeit nach ISO-Toleranzklasse 4, Laufgenauigkeit besser als ISO-Toleranzklasse 4
- PA9A Maß- und Laufgenauigkeit besser als ABMA-Toleranzklasse ABEC 9

### Lagersatz – Anordnung

- DB Zwei Lager in O-Anordnung
- DF Zwei Lager in X-Anordnung
- DT Zwei Lager in Tandem-Anordnung
- DG Zwei Universallager für den satzweisen Einbau
- TBT Drei Lager in O- und Tandem-Anordnung
- TFT Drei Lager in X- und Tandem-Anordnung
- TT Drei Lager in Tandem-Anordnung
- TG Drei Universallager für den satzweisen Einbau
- QBC Vier Lager in Tandem-O-Anordnung
- QFC Vier Lager in Tandem-X-Anordnung
- QBT Vier Lager in O- und Tandem-Anordnung
- QFT Vier Lager in X- und Tandem-Anordnung
- QT Vier Lager in Tandem-Anordnung
- QG Vier Universallager für den satzweisen Einbau

### Lagersatz – Vorspannung

- A Leichte Vorspannung
- L Leichte Vorspannung (nur für asymmetrische, zusammengepasste Lagersätze in TBT-, TFT-, QBT- und QFT-Anordnungen)
- B Mittlere Vorspannung
- M Mittlere Vorspannung (nur für asymmetrische, zusammengepasste Lagersätze in TBT-, TFT-, QBT- und QFT-Anordnungen)
- C Hohe Vorspannung
- F Hohe Vorspannung (nur für asymmetrische, zusammengepasste Lagersätze in TBT-, TFT-, QBT- und QFT-Anordnungen)
- G Sondervorspannung, angegeben in daN, z.B. G240

### Ausführung (Nachsetzzeichen)

- H Zwei Schmierlöcher im Außenring für die direkte Ölschmierung
- H1 Zwei Schmierlöcher im Außenring (optimierte Position) für die direkte Ölschmierung
- L Umfangsnut mit zwei Schmierbohrungen und zwei Umfangsnuten, O-Ringe im Außenring für die direkte Ölschmierung
- L1 Umfangsnut mit zwei Schmierbohrungen und zwei Umfangsnuten, O-Ringe im Außenring (optimierte Position) für die direkte Ölschmierung

<sup>1</sup> Lager der Reihe 719 .. E (VEB) sind nur für Bohrungsdurchmesser ab d = 8 mm verfügbar.  
<sup>2</sup> Weitere Auskünfte erteilt die Technische Beratung von SKF.

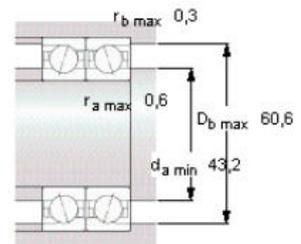
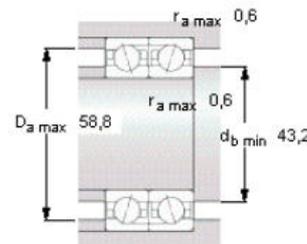
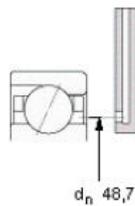
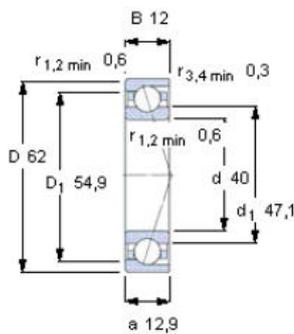
## 17.9. Spindellager 71908 CDGA/P4A

Quelle: <http://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/super-precision-bearings/angular-contact-ball-bearings/acbb-skf-high-and-super-precision/index.html?prodid=1270011908>



Angular contact ball bearings, Angular contact ball bearings, super-precision

Principal dimensions			Basic load ratings		Attainable speeds		Designation
d	D	B	dynamic	static	Grease lubrication	Oil-air lubrication	
mm			kN	C0	r/min		-
40	62	12	12,4	8,5	20000	34000	71908 CD/P4A



**Ball diameter** 6,35

**Number of balls** 21

**Preload when unmounted [N]**

back-to-back, face-to-face

Preload class

A	B	C	D
45	90	180	360

**Static axial stiffness [N/μm]**

(guideline value)

Preload class

A	B	C	D
36	48	66	93

**Reference grease quantity [cm<sup>3</sup>]**

G<sub>ref</sub> 1,4

**Calculation factors**

for equivalent bearing load

f<sub>0</sub> 10,4

**for preload in mounted bearing sets**

f 1,09

f<sub>1</sub> 1

f<sub>2A</sub> 1

f<sub>2B</sub> 1,04

f<sub>2C</sub> 1,09

f<sub>2D</sub> 1,15

f<sub>HC</sub> 1

## 17.10. SKF vakuumtaugliches Lagerfett

Quelle: [http://www.skf.com/binary/21-31155/12052EN\\_LGLT2.pdf](http://www.skf.com/binary/21-31155/12052EN_LGLT2.pdf)

LGLT 2

### SKF Low Temperature, Extremely High Speed Bearing Grease

SKF LGLT 2 is a fully synthetic oil based grease using lithium soap. Its unique thickener technology and low viscosity oil (PAO) provide excellent lubrication performances at low temperatures  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $-60\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) and extremely high speeds ( $n_{dm}$  values of  $1,6 \times 10^6$  can be reached).

- Low friction torque
- Quiet running
- Extremely good oxidation stability and resistance to water

**Typical applications:**

- Textile spinning spindles
- Machine tool spindles
- Instruments and control equipment
- Small electric motors used in medical and dental equipment
- In-line skates
- Printing cylinders
- Robots



Technical data	
Designation	LGL T 2/(pack size)
DIN 51825 code	K2G-50
NLGI consistency class	2
Soap type	Lithium
Colour	Beige
Base oil type	Synthetic (PAO)
Operating temperature range	-50 to +110 °C (-60 to +230 °F)
Dropping point DIN ISO 2176	>180 °C (>355 °F)
Base oil viscosity	
40 °C, mm <sup>2</sup> /s	18
100 °C, mm <sup>2</sup> /s	4,5
Penetration DIN ISO 2137	
60 strokes, 10 <sup>-1</sup> mm	265–295
100 000 strokes, 10 <sup>-1</sup> mm	+50 max.
Mechanical stability	
Roll stability	
50 hrs at 80 °C, 10 <sup>-1</sup> mm	380 max.
Corrosion protection	
Emcor: – standard ISO 11007	0–1
Water resistance	
DIN 51 807/1, 3 hrs at 90 °C	1 max.
Oil separation	
DIN 51 817, 7 days at 40 °C, static, %	<4
Copper corrosion	
DIN 51 811, 110 °C	1 max. 100 °C (210 °F)
Rolling bearing grease life	
ROF test	>1 000,
L <sub>50</sub> life at 10 000 r/min., hrs	20 000 r/min. at 100 °C (210 °F)
EP performance	
4-ball test, welding load DIN 51350/4, N	2 000 min.
Available pack sizes	180 g tube 0,9, 25, 170 kg



**SKF lubricants offer major competitive advantages:**

- Designed and tested to outperform under real conditions
- Product data include specific test results enabling a better selection
- Strict quality control of every production batch help ensure consistent performance
- Quality control allows SKF to offer a five-year shelf-life\* from the date of production



Production processes and raw materials vastly influence grease properties and performance. It is virtually impossible to select or compare greases based only on their composition. Therefore, performance tests are needed to provide crucial information. In over 100 years, SKF has accrued vast knowledge about the interaction of lubricants, materials and surfaces.



This knowledge has led SKF, in many cases, to set industry standards in bearing lubricant testing. Emcor, ROF, ROF+, V2F, R2F and Bequiet are just some of the multiple tests developed by SKF to assess the performance of lubricants under bearing operating conditions. Many of them are widely used by lubricant manufacturers worldwide.

\* SKF LGFP 2 food grade grease offers a two-year shelf-life from the date of production

© SKF is a registered trademark of the SKF Group.

© SKF Group 2014

The contents of this publication are the copyright of the publisher and may not be reproduced (even extracts) unless prior written permission is granted. Every care has been taken to ensure the accuracy of the information contained in this publication but no liability can be accepted for any loss or damage whether direct, indirect or consequential arising out of the use of the information contained herein.

PUB MP/PS 12052 EN - January 2014



[www.mapro.skf.com](http://www.mapro.skf.com) • [skf.com/mount](http://skf.com/mount) • [skf.com/lubrication](http://skf.com/lubrication)

## 17.11. Elektromotor (Spindel)



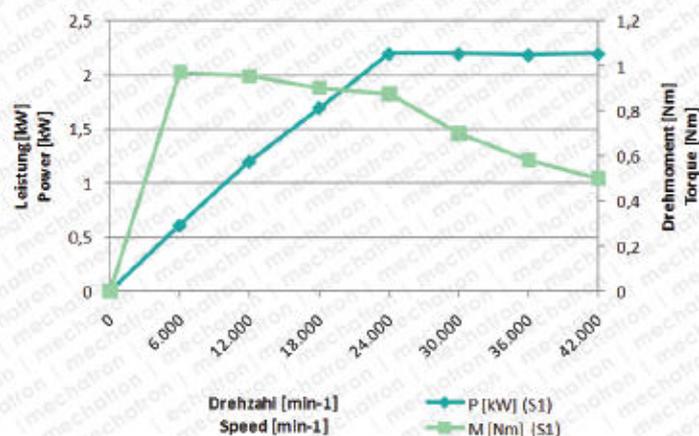
# HSC-8022-42

Datenblatt / Datasheet

## Technische Daten & Anschlusswerte Technical data & connection values

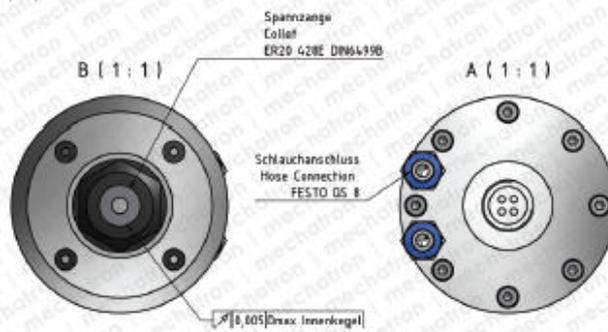
Bezeichnung Name	MECHATRON HSC-8022-42	Drehzahl Rotation Speed	42.000 min <sup>-1</sup>
Kühlung Cooling	Flüssigkeitskühlung Liquid cooling	Spannzange Collet	ER20 428E DIN6499B
Nennleistung Rated Power	S1 (100%) 2.2kW S6 (50%) 2.5 kW	Frequenz Frequency	700Hz
Kühlmitteltemperatur Coolant temperature	Max. 35°C	Spannbereich Clamping range	1-14mm
Spannung Voltage	230VAC	Polpaarzahl Pole pairs	1
Spindellager Spindle bearings	3x Stahl (Duplex Tandem+1) 3x Steel (Duplex Tandem+1) Optional: 3x Hybrid	Rundlauf (Innenkegel) Runout (inner Taper)	<5,0µm
Strom Current	S1 (100%) 8.0A S6 (50%) 8.6A	Werkzeugwechsel Tool Change	Manuell, Spannmutter Manually, clamping nut
Schmierung Lubrication	Fett, wartungsfrei Grease, maintenance free	Gewicht Weight	5,1kg

## Leistungs-/Drehmomentdiagramm Power/Torque vs. speed diagram



© 2013 MECHATRON GmbH, Technische Änderungen, Irrtümer und Druckfehler vorbehalten. Reproduktion, Änderung oder Vervielfältigung ohne ausdrückliche schriftliche Einverständnisklärung des Urhabers wird untersagt. Alle Rechte vorbehalten.  
© 2013 MECHATRON GmbH, technical modification, mistakes and literal errors reserved. Reproduction, changes or reprography without explicit declaration of agreement of the author is forbidden. All rights reserved.

Abmessungen  
Dimensions

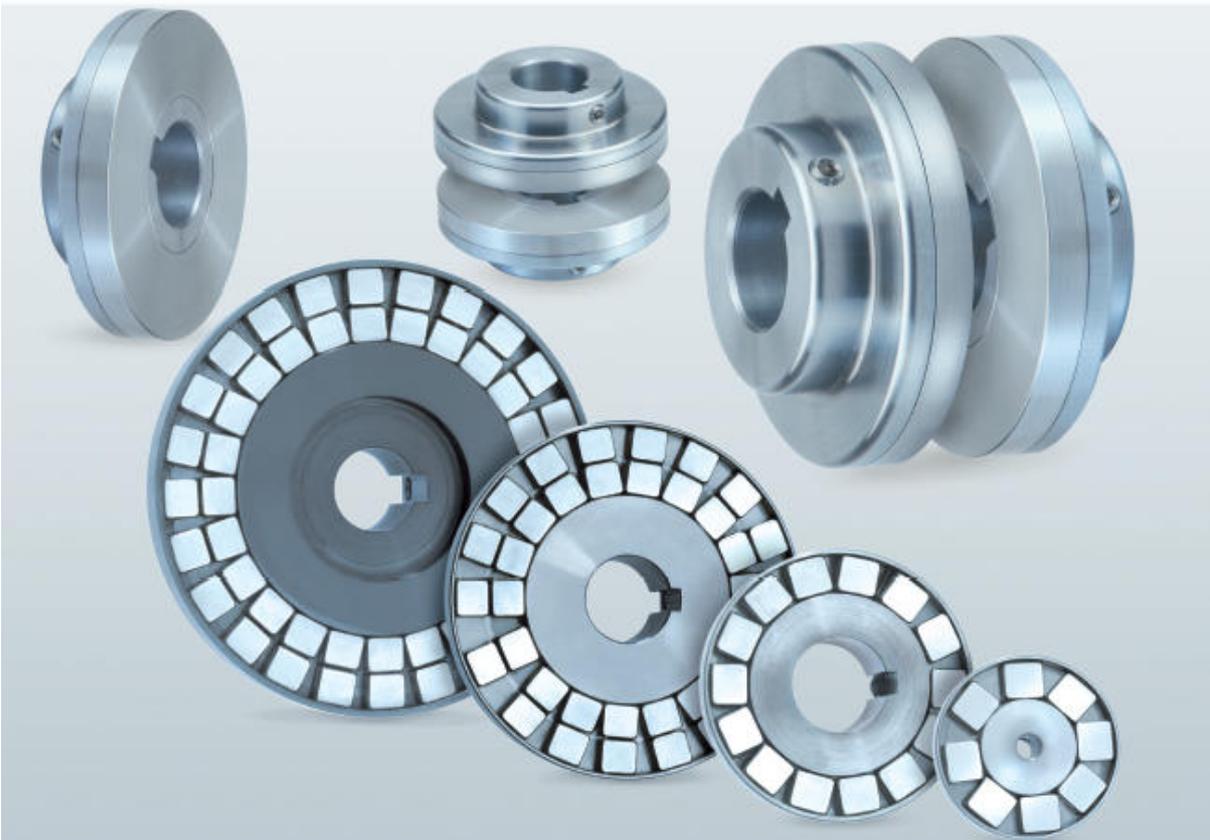


© 2013 MECHATRON GmbH. Technische Änderungen, Irrtümer und Druckfehler vorbehalten. Reproduktion, Änderung oder Vervielfältigung ohne ausdrückliche schriftliche Einverständniserklärung des Urhebers wird untersagt. Alle Rechte vorbehalten.  
© 2013 MECHATRON GmbH. technical modification, mistakes and literal errors reserved. Reproduction, changes or reprography without explicit declaration of agreement of the author is forbidden. All rights reserved.

## 17.12. Magnetscheibenkupplung

### Magnetscheiben- kupplungen

### *Magnetic Disc Couplings*



**Kontaktfreie  
Drehmomentübertragung  
(durch Wandungen)**

**Contactless  
Torque Transmission  
(Through Claddings)**

**mobac<sup>®</sup>**  
GMBH-KIEL

Bunsenstraße 1, D-24145 Kiel  
Tel. +49 (0)431 - 65 02 77  
Fax +49 (0)431 - 65 05 11  
e-mail: [mobac@t-online.de](mailto:mobac@t-online.de)  
[www.mobac.de](http://www.mobac.de)  
Germany

2015

## Anwendungsbereiche

### Die kontaktfreie Drehmomentübertragung durch Wandungen vielfältiger Art ermöglicht zum Beispiel:

- ▶ Antrieb von Pumpen, Rührwerken oder Kompressoren in geschlossenen Flüssigkeitsbehältern
- ▶ Antrieb von Ventilatoren in geschlossenen Behältern mit Gasen oder Dämpfen
- ▶ Kraftübertragung zu Unterwasser-Roboterarmen
- ▶ Übertragung von Anzeigevorgängen auf Rundskalen in einem anderen Medium
- ▶ Vermeidung von Motorvibrationsübertragungen
- ▶ Abkopplung von Gewichtseinflüssen bei Wiegevorgängen
- ▶ Standard-Arbeitsbereich -40 bis +140°C (Sonderausführung bis +280°C)

Berührungslose Drehmomentübertragung ermöglicht Ausgleich von Fluchtwinkel Fehlern und Parallelversatz

Contactless torque transmission enables compensation of angular misalignment and parallel disalignment



## Applications

The contactless transmission of torque through claddings of various kinds allows for example:

- ▶ Power transmission for pumps, agitator assemblies and compressors into closed liquid filled containers
- ▶ Power transmission for ventilators in closed containers with gas, steam or similar
- ▶ Power transmission for underwater robot-handling
- ▶ Transmission of round scale displays into a different medium
- ▶ Avoidance of motor vibration transfers
- ▶ Uncoupling of load influences at weighting processes
- ▶ Standard working temperature range from -40 to +140°C (special execution up to +280°C)

Übertragung von Drehmomenten durch Gehäusewand (Edelstahl)

Transfer of torque through a housing wall (Stainless steel)



## Arbeitsweise von Magnetscheibenkupplungen

Synchron-Magnetscheibenkupplungen bestehen aus zwei gegenüberliegenden Scheiben, die mit sehr starken Seltene-Erde-Magneten bestückt sind. Das an einer Scheibe wirkende Drehmoment wird automatisch über einen Luftspalt auf die andere Scheibe übertragen.

Wegen der einfachen, flachen Bauart kann ein Fluchtwinkelfehler von bis zu 3° (Abb. 1) und ein Parallelversatz von bis zu 6 mm (Abb. 2) in Kauf genommen werden. Es wird dennoch nahezu das gesamte Drehmoment übertragen.

Eine Übertragung von Drehmomenten durch flache Glaswände o. ä. ist dadurch auf einfachste Weise möglich.

Die Magnetscheiben sind auch als Bestandteile von Hysteresebremsen einsetzbar.

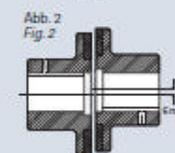
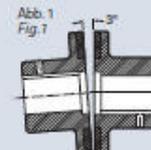
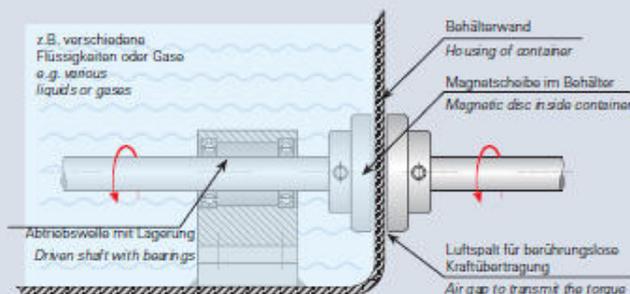
## How Magnetic Disc Couplings Work

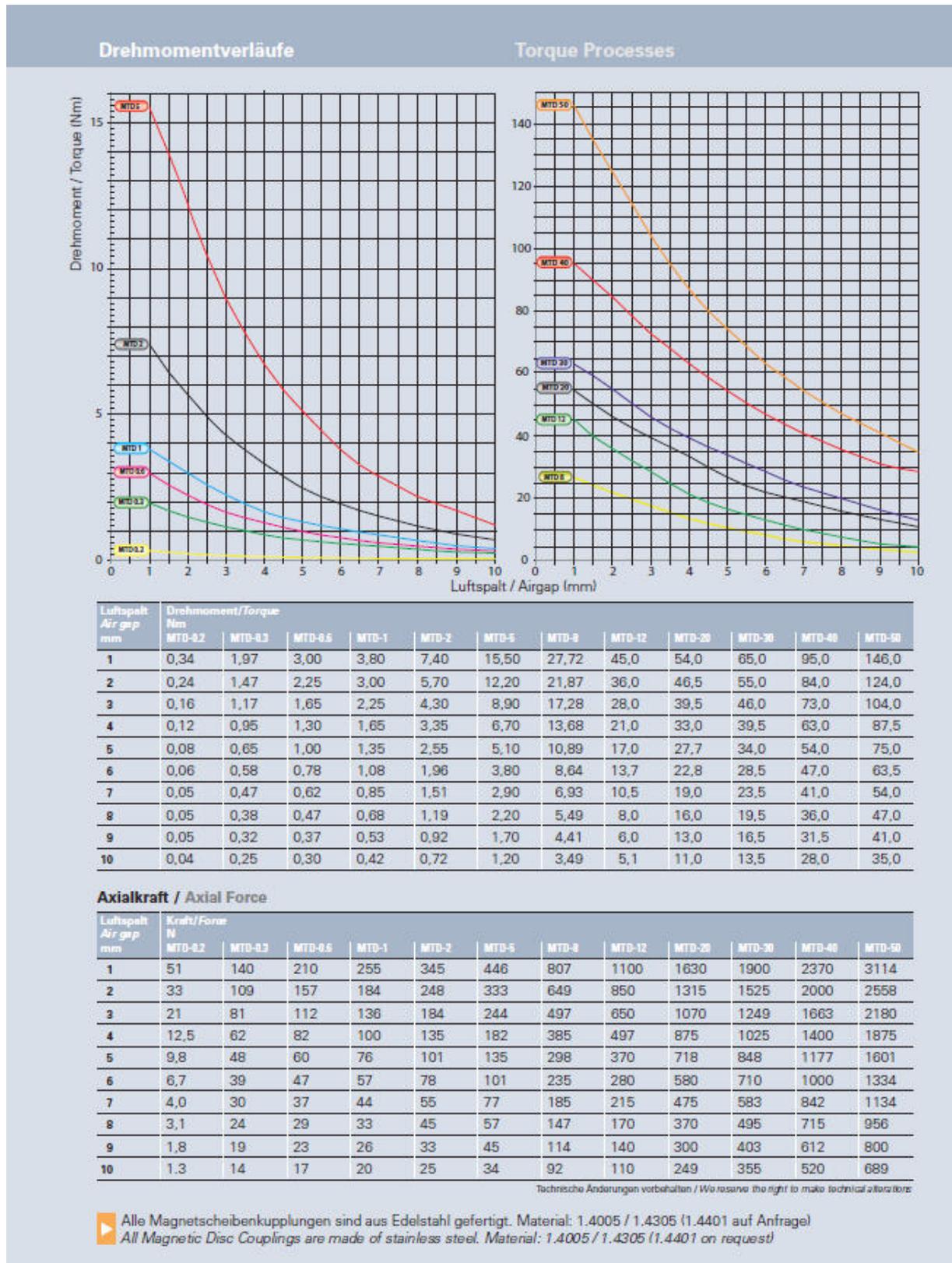
Disc type couplings consist of two opposing discs equipped with powerful rare earth magnets. The torque applied to one disc is transferred through an air gap to the other disc.

Because of its simple flat design, you can have angular misalignment of up to 3° (Fig. 1) or parallel misalignment up to 1/4" (Fig. 2) and still transmit nearly full rotational torque.

You can also implement an inexpensive flat barrier to separate the atmospheres or fluids surrounding the two discs. This is our simplest and most versatile application.

The magnetic discs can also be parts in hysteresis brakes.





Maße und Daten

Dimensions and Data

Technische Änderungen vorbehalten  
We reserve the right to make technical alterations

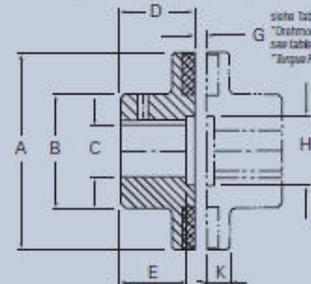
Technische Daten / Technical Data

Abmessungen / Dimensions (mm)

Typ Type	Max. Geschw. max. speed (rpm)	Gewicht pro Hälfte weight per hub (kg)	A	B	C	D	E	G	H	K
MTD-0.2	42000	0,05	26,9	20,5	s. Tabelle Bohrungen see Bore Code Chart	16,0	nicht verfügbar not available	siehe Tabelle "Drehmomente" verfügte" Seite 3  see table "Torque Capacities" page 3	nicht verfügbar not available	9,4
MTD-0.3	26000	0,1	43,7	20,5		15,0				8,6
MTD-0.6	23000	0,15	50,0	28,4		15,0				8,6
MTD-1	19000	0,3	60,0	38,1		19,1				10,2
MTD-2	15500	0,6	72,6	50,8		25,4				11,9
MTD-5	11000	1,1	97,6	69,9	max. 35,0	25,4				11,9
MTD-8	10500	1,2	107,0	69,9	max. 35,0	25,4				11,9
MTD-12	9000	2,0	130,0	76,2	max. 42,0	38,1	31,8		52,3	15,2
MTD-20	9200	2,2	125,0	69,9	max. 42,0	38,1	31,8		52,3	21,6
MTD-30	9200	3,1	125,0	108,0	max. 55,0	47,8	47,8		68,3	24,1
MTD-40	7800	4,1	147,0	108,0	max. 65,0	52,6	52,6		78,0	24,1
MTD-50	7800	3,2	147,0	60,5	max. 40,0	41,7	32,3		47,8	23,6

Bohrungen / Bore Chart (mm) Sonderbohrungen auf Anfrage / Special bores on request

Typ Type	ungebohrt solid	Bohrung / Bore 5 mm	6 mm	8 mm	10 mm	11 mm	12 mm	14 mm	16 mm	19 mm
MTD-0.2	x	x	x	x						
MTD-0.3	x	x	x	x	x					
MTD-0.6	x		x	x	x	x	x			
MTD-1	x				x	x	x	x	x	x
MTD-2 bis/to	x									
MTD-50										



siehe Tabelle Seite 3  
"Drehmomente"  
see table page 3  
"Torque Capacities"

- Magnetscheibenkupplungen werden als einzelne Hälften verkauft.
- Gewicht pro Kupplungshälfte inklusive Magneten.
- Alle Größen werden mit geschlossenen Magneten geliefert.
- Größen MTD-0.2 bis MTD-12 sind ab Lager vorrätig.
- MTD-20 bis MTD-50 werden auf Anfrage gefertigt.

- Magnetic Disc Couplings are sold as single halves.
- Weight of a coupling half includes magnets.
- All types are delivered with encased magnets.
- Types MTD-0.2 to MTD-12 are in stock.
- MTD-20 to MTD-50 are manufactured on request.

**mobac** Vertretungen / Agents

**ARGENTINA**  
TME Tecnología,  
Máquinas y Equipos  
Miguelotes 2050 8° D  
(C1428ASF) Buenos Aires  
Tel. +54 11 4786 9296  
tme@datamarkets.com.ar

**AUSTRALIA**  
Machinery Forum  
VIC PTY Ltd.  
782 Heidelberg Road  
Fairfield Vic 3078  
Tel. +61 3 9497 3633  
machinery@  
machineryforum.com.au

**BRASIL**  
Intertec Equipamentos Ltda.  
Rua Da Paz, 1344  
04713-001 São Paulo  
Tel. +55 11 5183 2444  
correlo@intertecequip.com.br

**CHINA**  
Shanghai Guangcheng Co.,Ltd  
Contact: Jason Jin  
Mobile: 0086-13611798091  
ljkj@njm@163.com

**ČESKÁ REPUBLIKA /  
SLOVENSKÁ REPUBLIKA/  
MAGYARORSZÁG/  
REPUBLIKA HRVATSKA/  
REPUBLIKA SRBIJA/  
REPUBLIKA SLOVENIJA**  
Miloslav Svoboda  
U-Svetle 2062/27B  
59401 - Velke Mezirici  
Tel. +420 566 522 097  
miloslavsvoboda@tiscali.cz

**ESPAÑA**  
TECNICA Y AVANCE, S.A.  
C/ Chopos 224 Urb. Valdelagua  
E-28750 San Agustín del  
Guadaltx  
Madrid, Spain  
Tel: +34 918 418 327  
office@tecnicyavance.com

**FRANCE/ITALY/SCHWEIZ**  
Cabeltec S.A.  
Av. de la Gottaz 36  
CH - 1110 Morges  
Tel. +41 21 803 09 51  
info@cabeltec.com

**JAPAN**  
Toho International Inc.  
3-5, 4-cyome Minamikyū  
hojimachi, Chou-ku,  
Osaka 541-0058, Japan  
Tel. +81 (6)6243-4561  
import@toho-intl.co.jp

**MEXICO**  
Interequip S.A. DE C.V.  
Priv. de Horacio 22-501  
11510 Mexico D.F.  
Tel. +52 55 5281 4285  
Inter@Interequip.com.mx

**NEDERLAND**  
Ingenieursbureau  
Wendrich & Co.  
Deidener Straat 126  
7550 Ab Hengelo  
Tel. +31 74 242 2205  
Info@wendrich.net

**POLSKA**  
Consultex Sp. z o.o  
Biuro Doratztwa Techniczne -  
Handlowego  
ul. Henryka Rodakowskiego 4/1  
71 - 345 Szczecin  
Tel. +48 91 486 16 18  
biuro@consultex.pl

**СТРАНЫ СНГ**  
Permanent K&M  
Russland, 125424 Moskau  
Wolokolamskoje Schausse  
Office 517  
Tel. +7 495 780 34 29  
Info@permanent.msk.ru

**SCANDINAVIA**  
AB Eric Falkhammar  
Tjårhovsgatan 14  
102 62 Stockholm  
Tel. +46 8 6445 555  
falkhammar@tele2.se

**UNITED KINGDOM/EIRE**  
Techna International Ltd.  
No. 1, Metro Centre  
Dwight Road  
Watford WD 18 9HG  
Tel. +44 1923 222 227  
sales@techna.co.uk

## 17.13. Drehschieberpumpe E2M2

### 2 TECHNISCHE DATEN

#### 2.1 Umgebungsbedingungen für Betrieb und Lagerung

Umgebungstemperatur, Betrieb	12 bis 40°C
Oberflächentemperatur des Pumpengehäuses bei Endvakuum (Betrieb) und Umgebungstemperatur 20°C	45 bis 65°C
Maximale Luftfeuchtigkeit (Betrieb)	90% relative Feuchte
Umgebungstemperatur (Lagerung)	-30 bis 70°C

#### 2.2 Elektrische Daten: Einphasige Motoren

Die elektrischen Daten der einphasigen Motoren sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Der benötigte Anlaufstrom wird für weniger als eine Sekunde gezogen. Um unnötige Auslösungen beim Anlaufen der Pumpe zu verhindern, sollten träge Sicherungen verwendet werden. Wenn Sie die Pumpe bei Temperaturen unter 12°C betreiben, wird der Anlaufstrom länger gezogen. Dabei kann die Überlastsicherung des Motors auslösen.

#### 2.3 Elektrische Daten: Dreiphasige Motoren

Die elektrischen Daten der dreiphasigen Motoren sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Der benötigte Anlaufstrom wird für weniger als eine Sekunde gezogen. Um unnötige Auslösungen beim Anlaufen der Pumpe zu verhindern, sollten träge Sicherungen verwendet werden.

#### 2.4 Schmierung

*Hinweis: Für das nachstehende Öl ist ein Edwards Datenblatt zu Gesundheitsschutz und Arbeitssicherheit erhältlich.*

Empfohlenes Öl*	Ultragrade 19
Maximale Füllmenge	0,6 l (E1M5 und 8) 0,55 l (E2M2, 5 und 8) 0,8 l (E2M12)

\* Beim Betrieb unter Umgebungstemperaturen außerhalb des in Abschnitt 2.1 genannten Bereichs sowie um die Leistung beim Pumpen kondensierbarer Dämpfe zu erhöhen, muß unter Umständen ein anderes Öl verwendet werden.

Pumpe	Bestellnummer	Spannung (V)	Frequenz (Hz)	Vollaststrom (A)	Anlaufstrom (A)	Empfohlene Sicherung (A)	Überlastsicherung automatisch (A) oder manuell (M)	Abbildung für Netzanschluß	Abbildung mit Abmessungen	Abmessungen (mm)			
										A	B	C	D
E2M2	A360-01-996	100	50	7,0	34,0	15	M	8	2	449	131	-	-
		200	60	3,5	17,0	10		9					
	A360-01-981	115	60	4,4	33,0	15	M	8	2	423	131	46	-
		230	60	2,2	16,5	10		9					
	A360-01-912	220-240	50	2,7	21,8	10	M	7	2	423	131	-	-
A360-02-930	220-240	50/60	3,5	31,0	13	M	7	2	453	131	-	-	

**Leistungsdaten**

Hinweis: Die in Tabelle 3 genannten Gesamtdrücke wurden in Übereinstimmung mit den betreffenden Pneurop-Normen mit einem Membran-Kapazitätsmanometer ohne Kühlfalle gemessen.

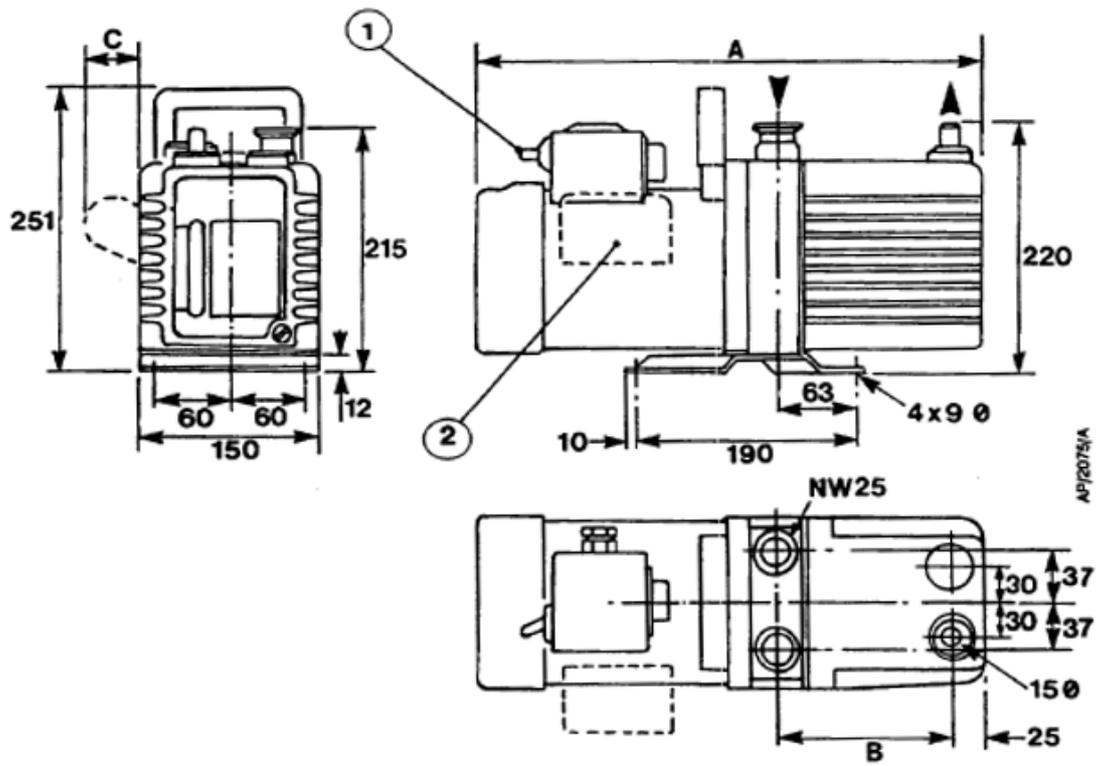
	E2M2	E1M5	E2M5	E1M8	E2M8	E2M12
Maximales Saugvermögen Netzfrequenz 50 Hz Netzfrequenz 60 Hz Max. Saugleist. (Pneurop) Netzfrequenz 50 Hz Netzfrequenz 60 Hz	2,8 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> 3,4 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> 2,4 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> 2,9 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	5,6 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> 6,7 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> 5,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> 6,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	5,6 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> 6,7 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> 5,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> 6,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	9,5 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> 11,4 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> 8,2 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> 9,8 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	9,5 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> 11,4 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> 8,2 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> 9,8 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	14,3 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> 17,3 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> 12,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> 14,8 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>
Motordrehzahl Netzfrequenz 50 Hz Netzfrequenz 60 Hz	1450 1750					
Endvakuum ohne Gasballast (Teildruck)	2,5 x 10 <sup>-4</sup> mbar (2,5 x 10 <sup>-2</sup> Pa)	3 x 10 <sup>-2</sup> mbar (3 Pa)	2,5 x 10 <sup>-4</sup> mbar (2,5 x 10 <sup>-2</sup> Pa)	3 x 10 <sup>-2</sup> mbar (3 Pa)	2,5 x 10 <sup>-4</sup> mbar (2,5 x 10 <sup>-2</sup> Pa)	2,5 x 10 <sup>-4</sup> mbar (2,5 x 10 <sup>-2</sup> Pa)
ohne Gasballast (Gesamtdruck)	1 x 10 <sup>-3</sup> mbar (1 x 10 <sup>-1</sup> Pa)	3 x 10 <sup>-2</sup> mbar (3 Pa)	1 x 10 <sup>-3</sup> mbar (1 x 10 <sup>-1</sup> Pa)	3 x 10 <sup>-2</sup> mbar (3 Pa)	1 x 10 <sup>-3</sup> mbar (1 x 10 <sup>-1</sup> Pa)	1 x 10 <sup>-3</sup> mbar (1 x 10 <sup>-1</sup> Pa)
mit maximalem Gasballast (Teildruck)	3 x 10 <sup>-2</sup> mbar (3 Pa)	2 mbar (2 x 10 <sup>2</sup> Pa)	3 x 10 <sup>-2</sup> mbar (3 Pa)	2 mbar (2 x 10 <sup>2</sup> Pa)	3 x 10 <sup>-2</sup> mbar (3 Pa)	3 x 10 <sup>-2</sup> mbar (3 Pa)
Maximaler Einlaßdruck (Wasserdampf)	15 mbar (15 x 10 <sup>2</sup> Pa)	35 mbar (35 x 10 <sup>2</sup> Pa)	15 mbar (15 x 10 <sup>2</sup> Pa)	45 mbar (45 x 10 <sup>2</sup> Pa)	15 mbar (15 x 10 <sup>2</sup> Pa)	15 mbar (15 x 10 <sup>2</sup> Pa)
Maximaler Durchsatz (Wasserdampf)	0,03 kg h <sup>-1</sup>	0,13 kg h <sup>-1</sup>	0,06 kg h <sup>-1</sup>	0,27 kg h <sup>-1</sup>	0,1 kg h <sup>-1</sup>	0,18 kg h <sup>-1</sup>
Maximaler Auslaßdruck (bei maximalem Durchsatz)	0,5 bar Druckmesser, 1,5 bar absolut, 1,5 x 10 <sup>5</sup> Pa					

Tabelle 3 - Leistungsdaten

	E2M2	E1M5	E2M5	E1M8	E2M8	E2M12
Gewicht (ca.)	18,2 kg	16,8 kg	19,6 kg	20 kg	22,8 kg	26 kg
Abmessungen	Siehe Tabellen 1 und 2					
Gehäuse Leistung Einphasige Pumpen Dreiphasige Pumpen	IP44 IP44	IP44 IP44	IP44 IP44	IP44 IP44	IP44 IP44	IP44 IP44
Pumpeneinlaß Pumpenauslaß	DN25KF (Flansch kann von 1"-Rohrgewinde abgenommen werden) Außendurchmesser Tülle 15 mm (Die Tülle kann von 3/4"-Rohrgewinde abgenommen werden.)					
Geräuschpegel	52 dB(A)					

\* Die Pumpen EM2, 5, 8 haben ein 3/4"-BSP-Rohrgewinde  
Die Pumpen EM12 haben ein 1"-BSP-Rohrgewinde

Tabelle 4 - Mechanische Daten



1. Nur einphasige Pumpen
2. Nur manche einphasige Pumpen  
(siehe Tabelle 1 Abmessung C)

## 17.14. Zahnrad-Wasserpumpe

NEUHOLD



ELEKTRONIK

Donnerstag, 28. Mai 2015

Motors Electro > Pumpen > Zahnrad-Wasserpumpe mit Motor RS-360SH

### Zahnrad-Wasserpumpe mit Motor RS-360SH



Artikel Nr.: K1025

Zahnrad-Wasserpumpe mit Motor RS-360SH

Kleine Zahnradpumpe für kaltes und warmes Wasser (&lt; 60 °C) und andere nicht aggressive Flüssigkeiten, ideal zur Verwendung als Dosierpumpe, für Modellbau usw. Technische Daten:- Betriebsspannung 3...7,2 V-- Stromaufnahme 2,2...4,5 A- Fördermenge 0,7...1,6 l/min.- Anschluß-ø Saug- und Druckseite 4,2 mm- Maße (Lxø): 65x45 mm

Preis : 3.95 EUR

Neuhold Elektronik

## 17.15. Pt-100 Widerstandsthermometer

JUMO GmbH & Co. KG

Hausadresse: Moritz-Juchheim-Straße 1, 36039 Fulda, Germany  
Lieferadresse: Mackenrodtstraße 14, 36039 Fulda, Germany  
Postadresse: 36035 Fulda, Germany

Telefon: +49 661 6003-722/724

Telefax: +49 661 6003-601/688

E-Mail: mail@jumo.net

Internet: www.jumo.net



Typenblatt 906125

Seite 1/3

### Platin-Chip-Temperatursensoren in SMD-Bauform nach DIN EN 60751

- für Temperaturen von -50 bis +150 °C
- genormte Nennwerte und Toleranzen
- galvanische Rundumkontaktierung
- für maschinelle Großserienkonfektion
- Gurtverpackung nach DIN IEC 286-3

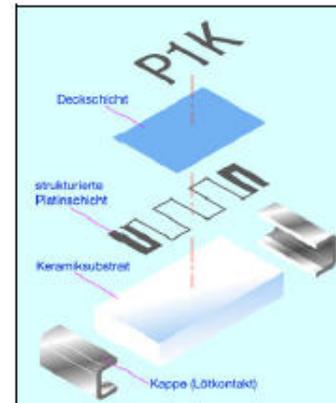
#### Einleitung

Platin-Chip-Temperatursensoren gehören zur Kategorie der in Dünnschichttechnik hergestellten Temperatursensoren. Bei der Herstellung dieser Temperatursensoren wird auf einem Keramikträger eine mäanderförmig strukturierte Platinschicht aufgebracht, die als aktive Schicht fungiert. Zum elektrischen Anschluss ist die Platinmäander bei SMD-Temperatursensoren an beiden gegenüberliegenden Längsenden des Temperatursensors mit zwei Lötkontakten versehen. Eine nach dem Abgleich aufgebrachte Glasschicht schützt zudem die Platinmäander vor äußeren Einflüssen.

Die Temperatursensoren basieren auf einem temperaturabhängigen Widerstand, dessen Verlauf und zulässige Toleranz in der internationalen Norm DIN EN 60751 definiert ist. Hohe Messgenauigkeit und gute Langzeitstabilität zählen zu den weiteren positiven Eigenschaften dieser Temperatursensoren. Durch die verwendete Dünnschicht-Technologie wird die Herstellung besonders kleiner und robuster Bauformen ermöglicht, welche zudem auch über hochohmige Nennwerte verfügen können.

Der Anwendungsbereich bei JUMO-SMD-Temperatursensoren erstreckt sich von -50 bis +150 °C. Anwendungen sind Oberflächen- oder Umgebungstemperaturmessungen auf Platinen. Bevorzugte Anwendungsgebiete sind beispielsweise Temperaturüberwachungs- oder Kompensationsschaltungen. Nicht zu vernachlässigen sind aber auch eine Vielzahl von Anwendungen im Temperaturfühler, wobei eine bestückte Epoxidplatine (Typenblatt 906122) als Messeinsatz dient und eine einfache Montage erlaubt.

### Bauform PCS



### Fachliteratur



Die überarbeitete Fassung dieses Buches wurde wegen geänderter Normen und Weiterentwicklungen überarbeitet. Besonders das neue Kapitel „Messunsicherheit“ vermittelt den Grundgedanken des international anerkannten ISO-Leitfadens „Guide of the expression of uncertainty in measurement“ (abgekürzt: GUM). Darüber hinaus wurde auch ein Kapitel zum Explosionsschutz bei Thermometern im Hinblick auf die seit 1. Juli 2003 gültige europäische Richtlinie 94/9/EG ergänzt.

Januar 2007  
Fachaufsatz FAS 146  
Teile-Nr.: 00074750  
ISBN-13: 978-3-935742-06-1

### JUMO-Platin-Temperatursensoren

Aufbau und Anwendung von Platin-Temperatursensoren	Typenblatt 906000
Platin-Keramik-Temperatursensoren	Typenblatt 906022
Platin-Chip-Temperatursensoren mit Anschlussdrähten	Typenblatt 906121
Platin-Chip-Temperatursensoren auf Epoxidplatine	Typenblatt 906122
Platin-Chip-Temperatursensoren mit Anschlussklammern	Typenblatt 906123
Platin-Chip-Temperatursensoren in SMD-Bauform	Typenblatt 906125

2014-10-09/00336845

JUMO GmbH & Co. KG  
 Hausadresse: Moritz-Juchheim-Straße 1, 36039 Fulda, Germany  
 Lieferadresse: Mackenrodtstraße 14, 36039 Fulda, Germany  
 Postadresse: 36035 Fulda, Germany

Telefon: +49 661 6003-722/724  
 Telefax: +49 661 6003-601/688  
 E-Mail: mail@jumo.net  
 Internet: www.jumo.net



Typenblatt 906125

Seite 2/3

## Platin-Chip-Temperatursensoren in SMD-Bauform nach DIN EN 60751

### Kurzbeschreibung

Platin-Chip-Temperatursensoren in SMD-Bauform sind bevorzugt für die automatische Bestückung von elektronischen Leiterplatten in Großserienkonfektion bestimmt. Im JUMO-Sortiment stehen die beiden SMD-Baugrößen 1206 und 0805 zur Auswahl. Die SMD-Temperatursensoren lassen, bedingt durch ihre geringe Baugröße, eine sehr hohe Bestückungsdichte zu.

Sie sind mit den Nennwerten 100, 500 und 1000  $\Omega$  nach DIN EN 60751 lieferbar. Alle JUMO-Temperatursensoren in SMD-Bauform besitzen galvanisch verzinnete Rundumkontakte mit Diffusionssperre und sind zukunftsorientiert für eine bleifreie Lötung ausgelegt. Die hochwertige Kontaktart sichert zudem eine anwenderfreundliche Bestückung und hohe Zuverlässigkeit des Temperatursensors im Betrieb zu.

Ein guter linearer Kennlinienverlauf, großer Temperaturmessbereich und hohe Messgenauigkeit bei unvergleichbar guter Langzeitstabilität machen diese normierten Temperatursensoren zur ersten Wahl.

Die Auslieferung erfolgt gegurtet. Eine notwendige Lagerung auch über viele Monate ist problemlos möglich.

## Bauform PCS



### Temperatursensoren in Pappgurt-Verpackung\*

Typ	Temperatursensor				
	R <sub>0</sub> / $\Omega$	B	L	H	s
PCS 1.1302.1	1x100	1,3	2,0	0,5	0,38
PCS 1.1302.5	1x500	1,3	2,0	0,5	0,38
PCS 1.1302.10	1x1000	1,3	2,0	0,5	0,38
PCS 1.1503.1	1x100	1,5	3,1	0,8	0,64
PCS 1.1503.5	1x500	1,5	3,1	0,8	0,64
PCS 1.1503.10	1x1000	1,5	3,1	0,8	0,64

Lötanschluss	
Werkstoff	L1
Sn + (Ni-Sperrschicht)	0,4
Sn + (Ni-Sperrschicht)	0,4
Sn + (Ni-Sperrschicht)	0,4
Sn + (Ni-Sperrschicht)	0,5
Sn + (Ni-Sperrschicht)	0,5
Sn + (Ni-Sperrschicht)	0,5

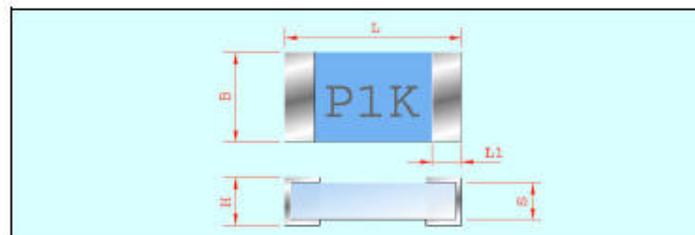
Teile-Nr. für Toleranzklasse		
F0,15	F0,3	Bauform
(Klasse A)		(Klasse B)
00535998	00427145	0805
a. A.	00427146	0805
a. A.	00427147	0805
a. A.	00309087	1206
a. A.	00595670	1206
00529558	00595486	1206

Maßtoleranzen:  $\Delta B = \pm 0,2 / \Delta L = \pm 0,2 / \Delta H = \pm 0,2 / \Delta S = \pm 0,05 / L1 = \text{ca. Maße}$   
 Maßangaben in mm.

\* Kleinmengen, Lieferung auch lose in Tüten verpackt.

Definition der Toleranzklassen siehe  
 Typenblatt 906000

### Maßzeichnung



2014-10-09/00336845

**JUMO GmbH & Co. KG**

Hausadresse: Moritz-Juchheim-Straße 1, 36039 Fulda, Germany  
 Lieferadresse: Mackenrodtstraße 14, 36039 Fulda, Germany  
 Postadresse: 36035 Fulda, Germany

Telefon: +49 661 6003-722/724  
 Telefax: +49 661 6003-601/688  
 E-Mail: mail@jumo.net  
 Internet: www.jumo.net



Typenblatt 906125

Seite 3/3

**Technische Daten**

Norm	DIN EN 60751:2009-05
Temperaturkoeffizient	$\alpha = 3,850 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (zwischen 0 und 100 °C)
Temperaturbereich	-50 bis +150 °C
Toleranz	Temperaturgültigkeitsbereich Klasse F0,15 (Klasse A): -30 bis +150 °C Temperaturgültigkeitsbereich Klasse F0,3 (Klasse B): -50 bis +150 °C
Messstrom/Maximalstrom	Pt100 empfohlen 1,0 mA, maximal 7,0 mA Pt500 empfohlen 0,7 mA, maximal 3,0 mA Pt1000 empfohlen 0,1 mA, maximal 1,0 mA
SMD-Baugröße	Die Typen PCS 1.1302.x (Baugröße 0805) und PCS 1.1503.x (Baugröße 1206) erfüllen die Anforderungen der Normen CECC 40401-004/DIN 45921.
Verarbeitung	Reflowlöten (Löttemperatur/-zeit $\leq 240 \text{ } ^\circ\text{C}/8 \text{ s}$ ) Schwall-Wellenlöten (Löttemperatur/-zeit $\leq 260 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ s}$ ) Es sind nur Leiterplatten mit angepasstem Ausdehnungskoeffizienten zulässig.
Lötanschlüsse	galvanisch verzinnete Rundumkontaktierung mit Diffusionssperre, Lötbarkeit siehe DIN IEC 68 Teil 2
Einsatzbedingungen	Platin-Chip-Temperatursensoren dürfen nicht ungeschützt in feuchter Umgebung oder in aggressiven Atmosphären eingesetzt werden. Vor dem Einsatz ist ggf. eine Überprüfung durch den Anwender durchzuführen. Bitte beachten Sie auch die Montageanleitung B 906121.4 „Hinweise für den Einsatz von Platin-Chip-Temperatursensoren.“
Langzeitstabilität	max. RD-Drift $\leq 0,05 \text{ } \%/ \text{Jahr}$ (Definition siehe Typenblatt 906000)
Isolationswiderstand	$> 10 \text{ M}\Omega$ bei Raumtemperatur
Erschütterungsfestigkeit	DIN EN 60751, Abs. 4.4.2.
Eigenerwärmung	$\Delta t = I^2 \times R \times E$ (Definition siehe Typenblatt 906000)
Verpackung	Originalverpackung, 5.000 Stück in Pappgurt auf 7"-Kunststoffrolle, mit Rollenvorlauf. Kleinmengen, Lieferung auch lose in Tüten verpackt.
Lagerung	In der (Standard-) Gurtverpackung können JUMO-Temperatursensoren der Bauform PCS mindestens 12 Monate in normaler Umgebung gelagert werden. Eine Lagerung in aggressiver Atmosphäre oder in korrodierenden Medien sowie unter hoher Luftfeuchte ist unzulässig.
RoHS-konform	ja
REACH-konform	ja

**Eigenerwärmungskoeffizienten und Ansprechzeiten**

Typ	Eigenerwärmungskoeffizient E in K/mW		Ansprechzeiten in Sekunden			
	In Wasser (v = 0,2 m/s)	In Luft (v = 2 m/s)	In Wasser (v = 0,4 m/s)		In Luft (v = 1 m/s)	
			t <sub>0,5</sub>	t <sub>0,9</sub>	t <sub>0,5</sub>	t <sub>0,9</sub>
PCS 1.1302.1	0,02	0,15	0,1	0,3	2,6	7,9
PCS 1.1302.5	0,02	0,15	0,1	0,3	2,6	7,9
PCS 1.1302.10	0,02	0,15	0,1	0,3	2,6	7,9
PCS 1.1503.1	0,02	0,20	0,1	0,3	3,3	9,5
PCS 1.1503.5	0,02	0,20	0,1	0,3	3,3	9,5
PCS 1.1503.10	0,02	0,20	0,1	0,3	3,3	9,5

2014-10-09/00336645

## 17.16. JUMO Typenblatt 90600

JUMO GmbH & Co. KG

Hausadresse: Moltkestraße 13–31, 36039 Fulda, Germany  
Lieferadresse: Mackenrodtstraße 14, 36039 Fulda, Germany  
Postadresse: 36035 Fulda, Germany

Telefon: +49 661 6003-722  
Telefax: +49 661 6003-601/688  
E-Mail: mail@jumo.net  
Internet: www.jumo.net



Typenblatt 90.6000

Seite 1 / 11

### Aufbau und Anwendung von Platin-Temperatursensoren

#### Einleitung

Schon vor mehr als 130 Jahren unterbreitete 1871 Sir William Siemens den Vorschlag, die Änderung des elektrischen Widerstandes von Metallen in Abhängigkeit von der Temperatur, zur Messung der Temperatur heranzuziehen. Als Material sollte das Edelmetall Platin verwendet werden. Denn Platin weist Merkmale auf, die von anderen Metallen nicht zu erwarten sind. 1886 entwickelte dann Siemens das Platin-Widerstandsthermometer weiter und konstruierte durch geeignete Schutzmaßnahmen ein Präzisions-Widerstandsthermometer, welches sich für Messungen hoher Temperaturen eignete.

Seitdem werden Platin-Widerstandsthermometer als unentbehrliche Bauteile zur Messung der physikalischen Größe Temperatur eingesetzt. Speziell abgestimmte Bauformen ermöglichen in heutiger Zeit eine Vielzahl von Anwendungen im Temperaturbereich zwischen  $-200$  und  $+850$  °C. So werden Platin-Widerstandsthermometer neben der industriellen Messtechnik auch in den Bereichen wie Heizungs- und Klimatechnik, Haushaltsgerätektechnik, Medizin- und Elektrotechnik sowie in der Automobiltechnik verwendet.

Als temperaturempfindliches Herzstück werden im Inneren der Widerstandsthermometer sowohl drahtgewickelte Platin-Temperatursensoren in Glas- oder Keramik-Baufom als auch in Dünnschichttechnik hergestellte Platin-Chip-Temperatursensoren eingebaut.

#### Temperaturabhängiger Widerstand

Platin-Temperatursensoren nutzen den Effekt der Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes vom Edelmetall Platin. Da der elektrische Widerstand hierbei mit steigender Temperatur zunimmt, handelt es sich um einen positiven Temperaturkoeffizienten, man spricht bei solchen Temperatursensoren auch von einem PTC (Positiv Temperature Coefficient).

Um diesen Effekt bei Temperaturmessungen verwenden zu können, muss das Metall seinen elektrischen Widerstand in Abhängigkeit von der Temperatur auf reproduzierbare Weise ändern. Die charakteristischen Eigenschaften des Metalles dürfen sich während der Betriebsphase nicht verändern, da es ansonsten zu

Messfehlern kommen würde. Der Temperaturkoeffizient sollte möglichst unabhängig von Temperatur, Druck und chemischen Einflüssen sein.

#### Normierte Platin-Temperatursensoren

Seit nun mehr als 130 Jahren wird Platin als prädestinierter Basiswerkstoff für temperaturempfindliche Sensoren verwendet. Zu den Vorteilen des Platins zählt die hohe chemische Beständigkeit, vergleichsweise leichte Bearbeitung (insbesondere bei der Drahtherstellung), die hochreine Darstellung und die gute Reproduzierbarkeit der elektrischen Eigenschaften. Zur Sicherstellung oben genannter Kriterien und Gewährleistung von Austauschbarkeit sind diese Eigenschaften in der international gültigen Norm IEC 751 (deutsche Übersetzung DIN EN 60 751) definiert.

Diese Norm beinhaltet z. B. Vorgaben zum elektrischen Widerstand in Abhängigkeit von der Temperatur (Grundwertetabelle), zulässige Grenzabweichungen (Toleranzklassen), Kennlinienverlauf und Einsatztemperaturbereich.

Zur Berechnung der Kennlinien bestimmenden Koeffizienten unterscheidet man zwischen den Temperaturbereichen von

$-200 \dots 0$  °C und von  $0 \dots 850$  °C.

Für den Bereich von  $-200 \dots 0$  °C gilt ein Polynom dritten Grades:

$$R(t) = R_0(1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot (t - 100) \cdot t^3)$$

Für den Bereich von  $0 \dots 850$  °C gilt ein Polynom zweiten Grades...

$$R(t) = R_0(1 + A \cdot t + B \cdot t^2)$$

...mit den Koeffizienten:

$$\begin{aligned} A &= 3,9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \\ B &= -5,775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2} \\ C &= -4,183 \times 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4} \end{aligned}$$

Die Größe  $R_0$  wird als Nennwert bezeichnet und gibt den Widerstandswert bei 0 °C an.

Nach der Norm DIN EN 60 751 beträgt der Nennwert 100.000  $\Omega$  bei 0 °C. Man spricht daher auch von dem Begriff Pt 100.

Darüber hinaus werden auf dem Markt auch Temperatursensoren mit höheren Nennwerten, z. B. als Pt 500 oder Pt 1000 angeboten. Diese verfügen über eine

höhere Empfindlichkeit, da sich der Steigungsfaktor der Kennlinie direkt proportional zum Nennwert  $R_0$  verhält. Der Vorteil liegt also in einer stärkeren Änderung ihres Widerstandswertes in Abhängigkeit von der Temperatur begründet.

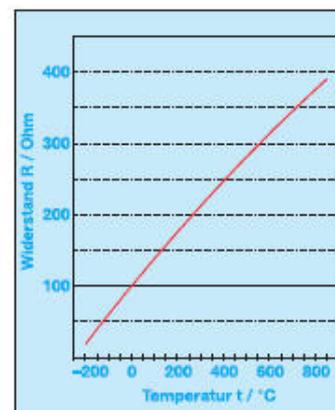


Abb. 1: Pt-100-Kennlinie

Die Widerstandsänderungen im Temperaturbereich bis 100 °C betragen ca.:

0,4  $\Omega$ /K bei Pt-100-Temperatursensoren,

2,0  $\Omega$ /K bei Pt-500-Temperatursensoren

und

4,0  $\Omega$ /K bei Pt-1000-Temperatursensoren.

Als weitere Kenngröße definiert die DIN einen mittleren Temperaturkoeffizienten zwischen 0 und 100 °C. Er gibt die gemittelte Widerstandsänderung, bezogen auf den Nennwert bei 0 °C, an:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \times 100 \text{ } ^\circ\text{C}} = 3,850 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$R_0$  bzw.  $R_{100}$  sind die Widerstandswerte bei den Temperaturen 0 °C und 100 °C.

#### Berechnung der Temperatur aus dem Widerstand

In der Anwendung als Thermometer wird aus dem Widerstand des Temperatursensors auf die zugehörige Temperatur geschlossen. Die genannten Formeln geben die Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von der Temperatur wieder.

Für Temperaturen oberhalb 0 °C lässt sich

1.05/00089161

**JUMO GmbH & Co. KG**

Hausadresse: Moltkestraße 13-31, 36039 Fulda, Germany  
 Lieferadresse: Mackenrodtstraße 14, 36039 Fulda, Germany  
 Postadresse: 36035 Fulda, Germany

Telefon: +49 661 6003-722  
 Telefax: +49 661 6003-601/688  
 E-Mail: mail@jumo.net  
 Internet: www.jumo.net



Typenblatt 90.6000

Seite 2 / 11

zur Ermittlung der Temperatur eine geschlossene Form der Darstellung aus der Kennlinie nach DIN EN 60751 ableiten:

$$t = \frac{-R_0 \times A + \sqrt{[(R_0 \times A)^2 - 4 \times R_0 \times B \times (R_0 - R)]^{1/2}}}{2 \times R_0 \times B}$$

R = gemessener Widerstand in  $\Omega$   
 t = berechnete Temperatur in  $^{\circ}\text{C}$   
 $R_0, A, B$  = Parameter nach DIN EN 60751

**Grenzabweichungen**

Bei den Grenzabweichungen unterscheidet die DIN zwei Toleranzklassen:

Klasse A:  $\Delta t = \pm (0,15 + 0,002 \times |t|)$   
 Klasse B:  $\Delta t = \pm (0,30 + 0,005 \times |t|)$

t = Temperatur in  $^{\circ}\text{C}$  (ohne Vorzeichen)

Für die Berechnung der Grenzabweichung  $\Delta R$  in  $\Omega$  bei einer Temperatur von  $t > 0^{\circ}\text{C}$  gilt:

$$\Delta R = R_0 (A + 2 \times B \times t) \times \Delta t$$

Bei  $t < 0^{\circ}\text{C}$  gilt:

$$\Delta R = R_0 (A + 2 \times B \times |t| - 300 \times |t|^2 + 4 \times C \times |t|^3) \times \Delta t$$

Die Toleranzklasse A gilt für Temperaturen von  $-200 \dots +600^{\circ}\text{C}$ .

Für die Toleranzklasse B gilt der gesamte Definitionsbereich von  $-200 \dots +850^{\circ}\text{C}$ .

**Erweiterte Toleranzklassen**

Immer wieder zeigt sich, dass für bestimmte Anwendungen die beiden in der Norm aufgeführten Toleranzklassen nicht ausreichen. Basierend auf den genormten Toleranzen hat JUMO eine weitere Einteilung der Toleranzklassen definiert, um den unterschiedlichsten Anforderungen auf dem Markt gerecht zu werden.

Neben den Definitionsgleichungen der temperaturabhängigen Abweichungen werden auch die Geltungsbereiche definiert. Aufgrund des nicht exakt-linearen Zusam-

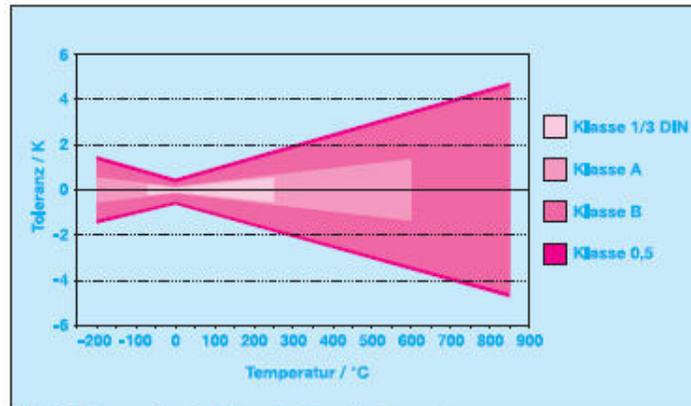


Abb. 2: Toleranzverlauf in Abhängigkeit von der Temperatur

menhangs zwischen Widerstand und Temperatur sind für die Bestimmung der Abweichungsfunktion von der Norm-Kurve 3 (für  $t > 0^{\circ}\text{C}$ ) bzw. 4 (für  $t < 0^{\circ}\text{C}$ ) Messpunkte bei verschiedenen Temperaturen erforderlich. Bei der Serienproduktion der Temperatursensoren werden Prüfungen im Allgemeinen nur bei  $0^{\circ}\text{C}$  und  $100^{\circ}\text{C}$  durchgeführt. So kann die individuelle Funktion des Temperatursensors nicht exakt bestimmt werden. Da einerseits die Messunsicherheit bei der Prüfung nicht beliebig reduziert werden kann und andererseits der Kennlinienverlauf produktionsbedingt Schwankungen unterliegt, muss der Geltungsbereich der eingegengten Toleranzklassen gegenüber dem Messbereich des Temperatursensors eingeschränkt werden.

Hieraus resultiert auch, dass die Toleranzklassen nicht beliebig eingegengt werden können.

**Für die Praxis**

Temperatursensoren mit eingeschränkten

Temperatur	Klasse 1/3 DIN B	Klasse A	Klasse B	Klasse 0,5
$-200^{\circ}\text{C}$		0,55 K	1,30 K	1,70 K
$-70^{\circ}\text{C}$	0,22 K	0,29 K	0,65 K	0,92 K
$0^{\circ}\text{C}$	0,10 K	0,15 K	0,30 K	0,50 K
$100^{\circ}\text{C}$	0,27 K	0,35 K	0,80 K	1,10 K
$250^{\circ}\text{C}$	0,53 K	0,65 K	1,55 K	2,00 K
$350^{\circ}\text{C}$		0,85 K	2,05 K	2,60 K
$600^{\circ}\text{C}$		1,35 K	3,30 K	4,10 K
$850^{\circ}\text{C}$			4,55 K	5,60 K

Tab. 2:  $\pm$  Toleranz in K je Klasse

Toleranzen besitzen meist einen weitaus größeren Messbereich. So bedeutet dies für die Praxis, dass Temperatursensoren, welche bis zur oberen bzw. unteren Temperaturgrenze eingesetzt werden, die Toleranzeinhaltung aber nur im Geltungsbereich sicherstellen. Außerhalb des Geltungsbereiches ist eine Toleranzüberschreitung möglich, wodurch die Standardtoleranz Klasse B zugrunde gelegt werden muss.

Toleranzklasse	Sensor-Kategorie	Temperaturbereich	Toleranz in K
Klasse 1/3 DIN B	Dünnschicht	$-50 \dots +200^{\circ}\text{C}$	$\pm (0,10 \text{ K} + 0,0017 \times  t )$
	Draht	$-70 \dots +250^{\circ}\text{C}$	
Klasse A	Dünnschicht	$-70 \dots +300^{\circ}\text{C}$	$\pm (0,15 \text{ K} + 0,002 \times  t )$
	Draht	$-200 \dots +600^{\circ}\text{C}$	
Klasse B	Dünnschicht	$-70 \dots +600^{\circ}\text{C}$	$\pm (0,30 \text{ K} + 0,005 \times  t )$
	Draht	$-200 \dots +850^{\circ}\text{C}$	
Klasse 0,5	Dünnschicht	$-70 \dots +600^{\circ}\text{C}$	$\pm (0,50 \text{ K} + 0,006 \times  t )$
	Draht	$-200 \dots +850^{\circ}\text{C}$	

Tab. 1: Toleranzklassen – Temperaturgültigkeitsbereich

*|t|* = Messtemperatur in  $^{\circ}\text{C}$  (ohne Vorzeichen)

1.05/00089161

## 17.17. Analogeingangsmodul NI 9217



Technischer Vertrieb  
Österreich  
0662 4579900  
ni.austria@ni.com

### NI 9217

Analogeingangsmodul mit 4 Kanälen, 100  $\Omega$  RTD, 24 bit

- 4 RTD-Analogeingänge für 100  $\Omega$
- 3- und 4-Draht-RTDs, integrierte Stromerregung und automatische Erkennung
- Abtastrate bis zu 400 S/s
- NIST-konforme Kalibrierung
- Auflösung von 24 bit, Rauschunterdrückung von 50/60 Hz



### Übersicht

Das Modul NI 9217 von National Instruments ist ein Analogeingangsmodul für RTDs mit vier Kanälen und einer Auflösung von 24 bit für Messungen mit Widerstandsthermometern im Bereich von 100  $\Omega$ . Das NI 9217 kann für zwei verschiedene Abtastraten konfiguriert werden. Ist das Modul für eine hohe Abtastrate konfiguriert, lassen sich Kanäle mit bis zu 400 S/s (100 S/s pro Kanal) abtasten. Ist das Modul für eine hohe Auflösung konfiguriert, lassen sich Kanäle mit 5 S/s (1,25 S/s pro Kanal) mit einer integrierten Rauschunterdrückung von 50/60 Hz abtasten.

Das NI 9217 unterstützt 3- und 4-Draht-RTD-Messungen und erkennt automatisch, welcher RTD-Typ (3- oder 4-Draht) an den Kanal angeschlossen ist und konfiguriert jeden Kanal entsprechend. Das Modul bietet eine Stromerregung von 1 mA pro Kanal und weniger als 1 °C Präzisionsabweichung über den gesamten Betriebstemperaturbereich. Es verfügt zudem über eine NIST-konforme Kalibrierung und eine doppelte Isolierung von Kanal gegen Masse, die für Sicherheit, Rauschunempfindlichkeit sowie einen hohen Gleichaktspannungsbereich sorgt.

Als Anschlusszubehör empfiehlt NI den Anschlussblock NI 9939 mit Zugentlastung.

Für kanalweise isolierte RTD-Messungen sollte das universelle Modul NI 9219 verwendet werden.

### Spezifikationen

#### Spezifikationsdokumente

- Spezifikationen
- Datenblatt

#### Überblick über Spezifikationen

##### Allgemein

Produktfamilie Industrial I / O

Messtyp RTD  
Temperature

Form Factor CompactDAQ  
CompactRIO

Betriebssystem / Zielsystem Echtzeit

	Windows
RoHS-konform	Ja
Isolierungstyp	Isolierung Kanal gegen Masse
Analogeingabe	
Single-ended-Kanäle	0
Differenzielle Kanäle	4
Auflösung am Analogeingang	24 bit
Simultane Abtastung	No

### Simultaneous Sampling

A property of a measurement system in which each input or output channel is digitized or updated at the same instant. You will need simultaneous sampling for applications where the time relationship between inputs is important, such as phase analysis of AC signals.

Because channel-dedicated analog-to-digital converters (ADCs) are used to sample data simultaneously between inputs, the maximum sample rate is applicable to each channel and is not divided by the total number of channels. Devices that don't have simultaneous sampling capabilities use multiplexing to connect each channel to its ADC.

Interval scanning is a low-cost option to simulate simultaneous sampling for low-frequency signals such as temperature or pressure. This method scans the input channels at one interval and uses a second interval to determine the time before repeating the scan. The input channels are scanned within microseconds, creating the effect of simultaneously sampling the input channels.

Erregerstrom	1 mA
Signalkonditionierung	Stromerregung
Analogausgabe	
Anzahl von Kanälen	0
Digital-I / O	
Bidirektionale Kanäle	0
Input-Only-Kanäle	0
Output-Only-Kanäle	0
Counter / Timer	
Counter	0
Physikalische Spezifikationen	

Länge	9 cm
Breite	2.3 cm
I/O-Steckverbinder	Schraubklemmenanschlüsse
Betriebstemperatur	-40 °C - 70 °C

### Ressourcen

---

#### Weitere Produktinformationen

- [Produktabmessungen](#)
- [Produktspezifikationen \(2\)](#)

© 2014 National Instruments Corporation. All rights reserved.

## 17.18. Pyrometer



## optris® CT LT

Präzise berührungslos Temperaturen messen  
von -50°C bis 975°C



## VORTEILE

- Einer der kleinsten Infrarotmessköpfe weltweit mit 22:1 optischer Auflösung
- Robust und ohne Kühlung einsetzbar bis 180°C Umgebungstemperatur
- Separate Elektronik mit leicht zugänglichen Programmier Tasten und beleuchtetem LCD-Display
- Wählbarer Analogausgang: 0/4-20 mA, 0-5 V, 0-10 V, Thermoelement Typ K oder J
- Optionales steckbares USB, RS232, RS485, CAN oder Profibus DP-Interface incl. Software bzw. GSD-Datei
- Installation von max. 32 Sensoren in einem Netzwerk (mit RS485)
- CTEX: Version mit Explosionsschutz (ATEX) 

## Allgemeine Parameter

Schutzklasse	IP 65 (NEMA-4)
Umgebungstemperatur	Messkopf: -20°C bis 180°C (130°C bei LT02) Elektronik: -20°C bis 85°C
Lagertemperatur	Messkopf: -40°C bis 180°C (130°C bei LT02) Elektronik: -40°C bis 85°C
Relative Luftfeuchtigkeit	10 - 95%, nicht kondensierend
Vibration (Messkopf)	IEC 68-2-6: 3 G, 11-200 Hz, jede Achse
Schock (Messkopf)	IEC 68-2-27: 50 G, 11 ms, jede Achse
Gewicht	Messkopf: 40 g Elektronik: 420 g

## Elektrische Parameter

Ausgänge/analog	Kanal 1: 0/4-20 mA, 0-5/10 V, Thermoelement J, K Kanal 2: Messkopftemperatur (-20°C bis 180°C als 0-5 V oder 0-10 V), Alarmausgang
Alarmausgang	24 V/50 mA (open collector)
Optional	Relais: 2 x 60 V DC/42 V AC <sub>alt</sub> ; 0,4 A; potentialfrei
Ausgänge/digital (optional)	USB, RS232, RS485 (wahlweise), CAN-, Bus, Profibus DP, Ethernet
Ausgangsimpedanzen	mA max. 500 Ω (bei 0-36 V DC) mV min. 100 kΩ Lastwiderstand Thermoelement 20 Ω
Eingänge	programmierbare Funktionseingänge für externe Emissionsgradeinstellung, Hintergrundstrahlungskompensation, Trigger (Rücksetzen der Haltefunktionen)
Kabellänge	1 m (Standard), 3 m, 8 m, 15 m
Stromverbrauch	max. 100 mA
Spannungsversorgung	8-36 V DC

## Messtechnische Parameter

Temperaturbereiche (skalierbar über Programmier Tasten oder Software)	-50°C bis 975°C (LT22) -50°C bis 600°C (LT15) -50°C bis 600°C (LT02)
Spektralbereich	8-14 μm
Optische Auflösung (90 % Energie)	22:1 (Präzisionsglasoptik) 15:1 (Präzisionsglasoptik) 2:1 (mit Plan-Frontfenster)
CF-Vorsatzlinse (optional)	0,6 mm @ 10 mm (mit LT22) 0,8 mm @ 10 mm (mit LT15) 2,5 mm @ 23 mm (mit LT02)
Systemgenauigkeit <sup>1,2)</sup> (bei Umgebungstemperatur 23 ± 5°C)	± 1% oder ± 1°C
Reproduzierbarkeit <sup>1,2)</sup> (bei Umgebungstemperatur 23 ± 5°C)	± 0,5% oder ± 0,5°C
Temperaturauflösung (Anzeige)	0,1°C
NETD <sup>3)</sup>	0,05 K (LT22/LT15) 0,1 K (LT02)
Einstellzeit	150 ms (95 %)
Emissionsgrad/Verstärkung (einstellbar über Programmier Tasten oder Software)	0,100 - 1,100
Transmissionsgrad (einstellbar über Programmier Tasten oder Software)	0,100 - 1,100
Signalverarbeitung (Parameter einstellbar über Programmier Tasten oder Software)	Maximal-, Minimalwerthaltung, Mittelwert, erweiterte Haltefunktionen mit Threshold und Hysteresis
Software	optris Compact Connect

<sup>1)</sup> es gilt der jeweils größere Wert

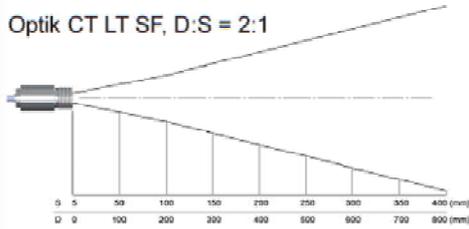
<sup>2)</sup> bei Objekttemperaturen > 0°C, ε=1

<sup>3)</sup> bei Zeitkonstante von 200 ms und T<sub>obj</sub> 25°C

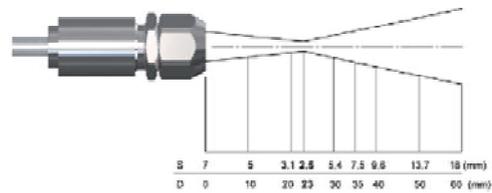
# optris® CT LT

## Optische Parameter

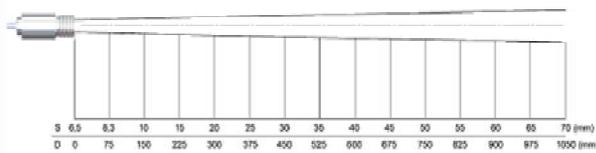
Optik CT LT SF, D:S = 2:1



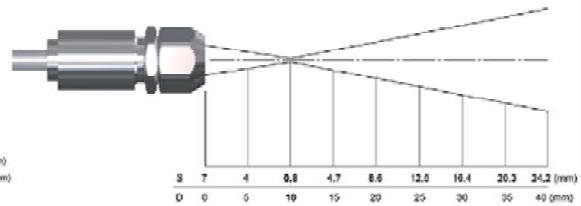
Optik CT LT CF, D:S = 2:1 (Fernfeld = 2,5:1)



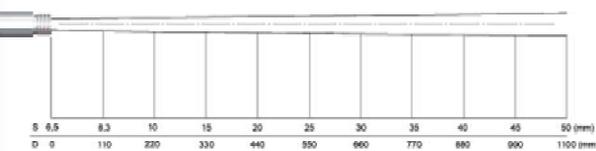
Optik CT LT SF, D:S = 15:1



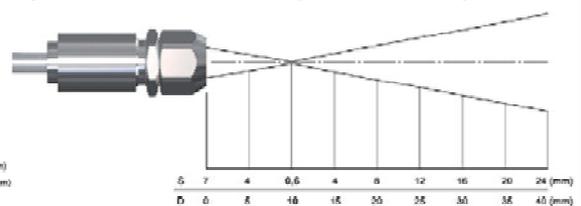
Optik CT LT CF, D:S = 15:1 (Fernfeld = 1,5:1)



Optik CT LT SF, D:S = 22:1

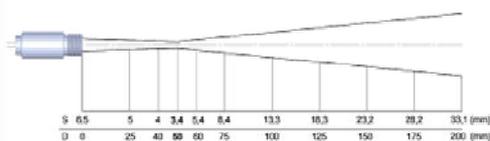


Optik CT LT CF, D:S = 22:1 (Fernfeld = 1,5:1)

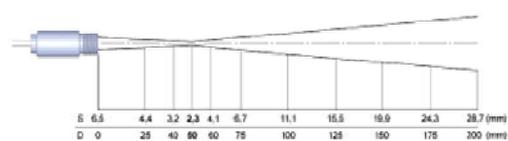


## Varianten mit eingebaute CF-Linse

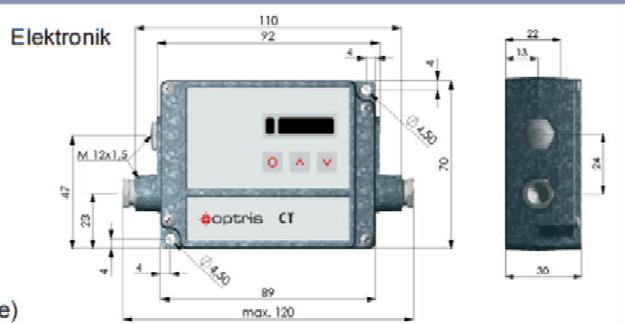
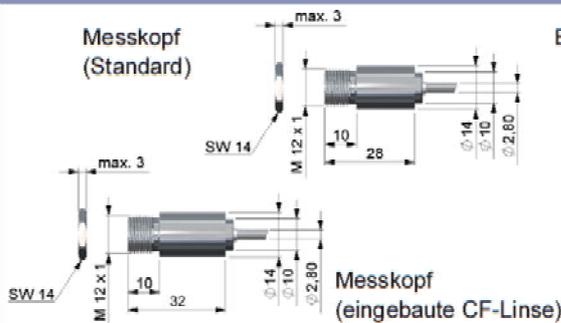
Optik CT LT CF, D:S = 15:1 (Fernfeld = 5:1)



Optik CT LT CF, D:S = 22:1 (Fernfeld = 6:1)



## Abmessungen



## 17.19. Drucksensor

**10<sup>-n</sup>**  
**mbar** VACOM

### Aktiver Pirani-Vakuumsensor mit Konvektionsausgleich CVM-211

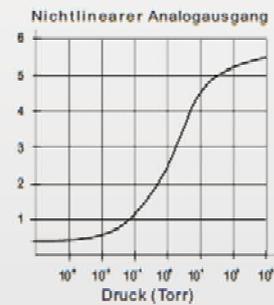
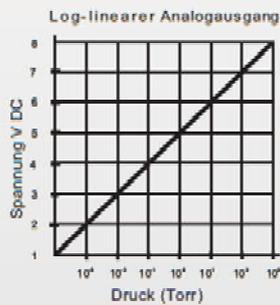
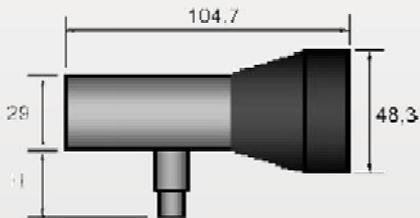
- Atmosphärendruck bis 10<sup>-4</sup> mbar
- Stabile und reproduzierbare Messung
- Integrierte Digitalanzeige: mbar oder Torr (nicht umschaltbar)
- Analogausgang: nichtlinear oder log-linear
- 1 Relaisausgang
- Kompakte Bauform
- Einfache Installation
- Optimal für Prozesskontrolle
- Optional aufsteckbares Batterie-Netzteil
- Kompatibel zu Mini-Convectron®-Basismodulen



[www.vacom.de](http://www.vacom.de)

### Technische Daten

Typische Messgenauigkeit	±2 % im Bereich atm bis 500 mbar ±10 % im Bereich 500 bis 1 x 10 <sup>-3</sup> mbar
Inneres Volumen	26 cm <sup>3</sup>
Leckrate	< 1 x 10 <sup>-9</sup> mbar l/s He
Ausheiztemperatur	70 °C ohne Kabel
Betriebstemperatur	0 bis 40 °C
Versorgungsspannung	11 bis 30 V DC (gegen Einschalt- und Überspannungsspitzen geschützt)
Analogausgang	log-linear : 1 bis 8 V DC (1 V/Dekade) oder nichtlinear: 0,375 bis 5,659 V DC (0 mbar bis atm; für N <sub>2</sub> )
Relaisausgang	1 einpoliger Umschalter: 1 A, 30 V DC
Stecker	SUB-D male, 9-polig
Anzeige	LED, 3-stellig, mbar oder Torr (nicht umschaltbar)
Material	vakuumseitig: Wolfram (vergoldet), Edelstahl, Glas, Nickel, Teflon® Gehäuse: Kunststoff
Gewicht	136 g
Einbaulage	unterhalb 1 mbar beliebig, oberhalb 1 mbar Sensorachse horizontal empfohlen
CE-konform	



### Bestellinformationen

Art.-Nr.		Flansch*	Analogausgang	H (mm)
Anzeigeeinheit: Torr	mbar			
CVM211GBA	CVM211GBA-B-L	DN16KF	log-linear	33
	CVM211GBA-B-NL		nichtlinear	
CVM211GEA	CVM211GEA-B-L	DN16CF	log-linear	37,3
	CVM211GEA-B-NL		nichtlinear	

\* andere Vakuumanschlüsse auf Anfrage

### Zubehör

Art.-Nr.	Bezeichnung
PS-12VDC-SUBD9	Netzteil-Adapter 100/230 V AC auf 12 V DC
PS402-A	Batterie-Netzteil (2 x 9 V), aufsteckbar

VACOM  
 Vakuum Komponenten & Messtechnik GmbH  
 Gabelsbergerstraße 9 • 07749 Jena • Deutschland  
 Tel. +49(0)3641 4275-0 • Fax +49(0)3641 4275-82  
 info@vacom.de • www.vacom.de

